



HAL
open science

Pour un entretien routier durable : prise en compte des conséquences de l'interaction chaussée-véhicule dans l'aide à la décision des politiques de resurfacement - illustration par un cas autoroutier français

Anne de Bortoli

► **To cite this version:**

Anne de Bortoli. Pour un entretien routier durable : prise en compte des conséquences de l'interaction chaussée-véhicule dans l'aide à la décision des politiques de resurfacement - illustration par un cas autoroutier français. Eco-conception. Université Paris Est, 2018. Français. NNT : . tel-02162111v1

HAL Id: tel-02162111

<https://hal.science/tel-02162111v1>

Submitted on 21 Jun 2019 (v1), last revised 13 Dec 2019 (v2)

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Université Paris-Est - Ecole Doctorale Ville, Transports et Territoires
Laboratoire Ville Mobilité Transport

Thèse de doctorat
Spécialité Aménagement de l'espace, Urbanisme

POUR UN ENTRETIEN ROUTIER DURABLE

Prise en compte de l'interaction chaussée-véhicule dans
l'aide à la décision des politiques de resurfaçage

Illustration par un cas autoroutier français

Anne de BORTOLI

Thèse soutenue publiquement le 21 décembre 2018

À l'Ecole des Ponts ParisTech

Membres du jury :

Philippe LEPERT, IFSTTAR, Président de Jury

Natacha GONDRAN, Ecole des Mines de Saint-Etienne, Rapporteur

François MIRABEL, Université de Montpellier, Rapporteur

Cécile BULLE, Université du Québec à Montréal, Examinatrice

Anne VENTURA, IFSTTAR, Examinatrice

Adélaïde FERAILLE, Ecole des Ponts ParisTech, Co-encadrante de thèse

Fabien LEURENT, Ecole des Ponts ParisTech, Directeur de thèse

Cette thèse a été réalisée au Laboratoire Ville Mobilité Transport (LVMT), financée par l'Ecole des Ponts et Chaussées, grâce au mécénat de la Chaire ParisTech-VINCI « Ecoconception des Ensembles Bâti et des Infrastructures ».

Les avis exprimés dans ce document n'engagent que l'auteur et ne sauraient être considérés comme constituant des prises de position officielles.

*Quelle vérité que ces montagnes bornent,
qui est mensonge au monde qui se tient au-delà ?*

Montaigne

RÉSUMÉ

Le transport routier est un déterminant de notre bien-être: nous y dépensons 4 ans de nos vies, 10% de nos revenus, et un tiers de nos émissions de GES. Entretenir de manière optimale le réseau d'infrastructures qui le supporte selon des objectifs de durabilité avec des budgets toujours plus contraints nécessite un outil d'aide à la décision adapté. Les outils de gestion patrimoniale routière sont focalisés sur les contraintes techniques et financières. Les méthodes préconisées par le Ministère (ESE, EIE) évaluent partiellement les performances sociales et environnementales de projets de construction. De plus, le ralentissement de l'entretien des routes des 20 dernières années s'est accompagné d'une déformation des chaussées, provoquant une augmentation des consommations des véhicules (carburant, pneumatiques et pièces de suspension). Dès lors, le véritable enjeu dans l'arbitrage de stratégies durables d'entretien des routes est d'explicitier comparativement la distribution au sein des parties prenantes des coûts et avantages des différents programmes d'entretien, en tenant compte des interactions chaussée-véhicule qui génèrent potentiellement des transferts d'impacts importants (*hypothèse*).

Nous avons développé une méthode répondant à ces enjeux, basée sur une approche analytique puis systémique de l'entretien des routes, dans un souci d'équité de représentation des parties prenantes et d'exhaustivité des impacts majeurs de l'entretien. Le modèle développé permet l'évaluation quantitative, multicritère et sur cycle de vie, des stratégies de resurfacement des routes interurbaines françaises. Adossé à une représentation physique de l'entretien du tronçon routier, il combine ensuite des méthodes d'évaluation éprouvées dans d'autres secteurs et ajustées ici à l'objet étudié : analyse environnementale et économique du cycle de vie, analyse Input-Output, évaluations financières et socioéconomiques. Sa batterie d'indicateurs inclut toutes les parties prenantes de l'entretien: usagers, riverains, gestionnaire, environnement, et société. Il utilise des données et modèles nouveaux en techniques routières, environnement, acoustique et économie, construits dans le cadre de la thèse. Une enquête que nous avons réalisée auprès des gestionnaires routiers français nourrit le propos et la modélisation du point de vue qualitatif et quantitatif sur les pratiques française d'entretien des routes. Un apport particulier est également fourni en nouvelles données d'Inventaires de Cycle de Vie pour l'entretien des routes (resurfacement et consommations véhiculaires) et en coûts des techniques routières.

Le modèle est appliqué à un tronçon autoroutier français de 10 km. Comparé à la stratégie d'entretien actuelle de cette autoroute, un entretien accru mènerait à des gains pour l'emploi et la production nationale, l'environnement (santé, biodiversité, ressources), et l'utilisateur (dépenses). Des optimums d'entretien - sanitaire et financier - apparaissent autour de +50% d'investissement par rapport aux pratiques actuelles : les gains atteignent alors 4€ pour les usagers et plus de 700€ en vie humaine (riverains sur la supply chain complète) pour chaque euro supplémentaire dépensé en resurfacement. En revanche, le bilan des dépenses du gestionnaire, des recettes pour l'État, et du temps passé par l'utilisateur est amélioré par une baisse de l'entretien. Nous proposons des pistes de réflexion pour aligner les différents intérêts du modèle économique de l'entretien autoroutier en France.

Des analyses de sensibilité sur le trafic, la vitesse de dégradation de surface routière et le type de technique d'entretien permettent de vérifier la robustesse des conclusions. De plus, elles montrent que, sur autoroute, la performance environnementale des politiques d'entretien ne dépend pas de celle des matériaux routiers utilisés. Enfin, notre hypothèse est confirmée : l'interaction chaussée-véhicule est dimensionnante de la performance de l'entretien autoroutier. La validation expérimentale de certains sous-modèles reste préconisée. De plus, des analyses complémentaires devront être menées avec notre modèle sur d'autres types de routes afin de se prononcer sur l'entretien des réseaux à moindre trafic.

ABSTRACT

As the principal conveyor of transportation, roads are a determinant of population well-being. Nevertheless, the budgets for the maintenance of public infrastructure keep on shrinking in most countries, along with the overall quality of road pavements. Literature has shown that a substantial surface deterioration leads to road vehicle overconsumption – in fuel, tires and suspension spare parts – with financial, macroeconomic, social and environmental impacts. Thus, considering road pavement-vehicle interactions is crucial to maintain roads in a sustainable way: we developed such a method to compare pavement resurfacing programs on a sustainable point of view for French intercity roads.

First, an analytical then systemic approach led to an inventory of the stakeholders of road maintenance, and to develop indicators to quantify the impacts of different pavement overlay strategies on these stakeholders. The eleven indicators chosen to assess the sustainability of road maintenance are: the discounted expenses for the road manager; the discounted expenses and the time spent for the users; the road noise and health damages to local communities; the damages to non-renewable resources and to biodiversity for the environment; the national production and employment, the tax collection and the overall cost for the Nation.

This assessment model is integrated, on the life-cycle. The calculation of indicators combines well-known methods used in other sectors and adapted to the studied subject: environmental life-cycle and life-cycle cost assessments, input-output analysis, financial and socioeconomic appraisals. We completed these methods with new data and statistical models about road maintenance techniques, environment, acoustics and economy. We sent a questionnaire to the managers of the different kinds of intercity roads in France to refine our models. Based on these answers with good representativeness, we built environmental Life Cycle Inventories and prices of road overlay techniques for the French market.

We then applied this method to a ten-kilometer-long highway section in France to compare 5 scenarios of resurfacing, and highlighted few lessons learnt from this case study for sustainable highway maintenance programs. We first presented the studied road section – its characteristics, the current maintenance strategy of the manager – then explained the parametrization and scenario development to use the method, before analyzing and interpreting the results. The baseline scenario consisted in overlaying the road with 2.5 cm of hot mix asphalt every $T=13$ years period of time. Based on it, we quantified gains for the different stakeholders to change this period according to the following alternative scenarios: “Minimal Investment”: $T=19.5$ years; «50% Increased Investment »: $T=9.8$ years; « Ambitious Practices »: $T=7.8$ years; « Maximal investment »: $T=5.7$ years.

An increased investment would lead to gains in terms of production, employment, environment (health, biodiversity, non-renewable resource consumption) and user expenses. Optima of public health return and user savings on maintenance investment have been spotted around +50% of investment compared to current practices: gains reach up to 700€ for local communities’ health and 4€ for users for each extra euro spent in road resurfacing program. On the contrary, rising the road maintenance investment entails losses in terms of tax incomes for the Nation, road manager expenses and time spent by users.

Sensitivity analyses have also been conducted over three parameters: the traffic level, the resurfacing techniques and the speed of road surface deterioration. These analyses show that the more important traffic and speed of deterioration are, the higher environmental gains and users savings are. Moreover, environmental gains do not depend on road pavement materials: almost 100% of the environmental gains or losses come from the fuel consumption dependence on road surface condition.

REMERCIEMENTS

Une thèse est un travail de recherche de longue haleine un peu à l'image du mouvement brownien. La théorie du chaos explique la complexité d'identification déterministe des particules rencontrées et qui ont contribué au chemin comme au résultat. Prêtons-nous tout de même à l'exercice des remerciements de thèse, comme le veut la tradition. Mais si la saveur des choses ne vaut que par ses contraires, permettez donc que je commence par des "amerciements". Je ne remercie pas les individus qui, tôt dans mon éducation, m'auraient volontiers dévié du chemin que j'avais envie d'emprunter, du fait de mon sexe. Messieurs (en majorité, pas que), vous êtes un véritable fléau qui freine la réalisation de 49% de l'humanité. Non, je ne vous remercie pas. Et je souhaite du courage aux femmes, dans la science comme ailleurs, qui se heurteront aux préjugés de votre grande confrérie de la misogynie, assumée ou insidieuse, consciente ou inconsciente. Il leur faudra du soutien et de la détermination pour vous vaincre. Cela fait, je peux maintenant remercier le cœur plus léger.

Je commencerai, comme de coutume, par remercier mes encadrants de thèse, Fabien Leurent et Adélaïde Féraïlle. Fabien m'a offert de bonnes conditions de thèse dans un pays qui ne veut plus financer sa recherche publique. Il m'a transmis un certain goût pour l'intérêt public. Attaché à sa vision systémique, il m'a poussé à affronter la complexité. Résolu, il n'hésite pas à s'affranchir des carcans pour atteindre ses objectifs, et son efficacité est parfois à couper le souffle. Pour ce qu'il m'a apporté, je remercie ce directeur de thèse atypique. Adélaïde a co-encadré ma thèse. Elle m'a introduit à la méthode d'Analyse de Cycle de Vie et à son réseau en France, à OpenLCA, au yoga pendant les coups durs et au kéké. Elle m'a accompagné sur plusieurs études d'ACV et a veillé à mon approvisionnement régulier de dattes du bled (le cerveau, ce grand consommateur de sucre !). Je la remercie pour le temps qu'elle m'a consacré. Merci également aux membres du jury de soutenance pour leur lecture et leur investissement, aux rapporteurs de ma thèse Natacha Gondran et François Mirabel pour leur travail particulièrement méticuleux, et à Cécile Bulle qui a examiné ma thèse et dont le bel enthousiasme n'a pas été entamé par une nuit passée sur la corde à linge sur le red-eye Montréal-Paris de pré-soutenance.

Au cours de ces 4 années de thèse, j'ai eu la chance de recevoir beaucoup d'aide de toutes parts, ce qui a largement contribué à l'aboutissement victorieux face à ce challenge doctoral transdisciplinaire. Merci d'abord aux membres de mon comité miroir de la chaire ParisTech-VINCI, qui ont écouté tous les semestres, pendant une demi-journée, mes discours académiques avec patience et ouverture d'esprit, et y ont instillé une réalité opérationnelle qui manque à tant de travaux de recherche. Pour m'avoir permis de faire de la recherche indépendante des intérêts privés et, j'espère, utile de manière pratique à la société dans son ensemble, je remercie Patrick Lerat, Eric Layerle et Christine Deneriaz, membres de la première heure, Christophe Hug, Clara Lorinquer et Sophie Debost qui les ont rejoints ou remplacés, ainsi que les membres élargis du comité, Ivan Drouadaine et Antoine Treboz. Ils sont nombreux à m'avoir fourni des données ou des retours de terrain sans lesquels les apports de ma thèse pour la communauté scientifique et routière seraient moindres. Contactés sur leurs conseils, merci à Yann Moreau pour l'accès aux données patrimoniales autoroutières, et à Luc-Amaury George qui m'a valeureusement sauvé dans ma longue quête des données d'IRI... Merci à Christophe Gobin, visionnaire intrépide du BTP (se munir d'un dictionnaire tout de même) pour les discussions de haute altitude lors des journées d'échange de la chaire : on les aura !? On les a eus ! Et puis, un grand, un immense merci à Maxime Trocme, coordinateur de la Chaire bienveillant, efficace et convivial, qui a insufflé beaucoup d'énergie partenariale dans mon projet de thèse et mes travaux de recherche parallèles en ACV des transports, et avec qui j'ai toujours eu un grand plaisir à interagir pendant six ans.

Cette thèse a aussi bénéficié du bon fonctionnement du Réseau Scientifique et Technique du Ministère de l'Écologie. Je remercie Anne-Marie Herbourg, directrice de l'Association des Directeurs Techniques des Métropoles, des Départements et des Régions, d'avoir diffusé mon enquête sur le resurfaçage, et aux 36 gestionnaires routiers français, dont je me dois de respecter l'anonymat, qui ont pris le temps d'y

répondre. Merci à Maxime Pasquier de l'ADEME pour les projections de pénétration des véhicules électriques. Merci à Pascal Rossigny, Sébastien Wasner, Nicolas Delobeau et Renaud Martin du CEREMA pour leurs conseils et leurs réponses à mes questions techniques. Je remercie aussi mes collègues de l'IFSTTAR. Carlos de Melo est le plus rapide des reprographes que je connaisse. Jean-Marc Martin et Hugues Vialletel m'ont aidé sur la question des données de surface routière (relevés, algorithmes de traitement et indicateurs). Michel Dauvergne, Anne Ventura, Véronique Cerezo, Minh-Tan Do et Tristan Lorino du laboratoire EASE m'ont rapidement ouvert les portes de leurs travaux antérieurs, et m'ont offert un lieu d'échange privilégié sur l'avancée de mes recherches. Merci aux acousticiens du Laboratoire d'Acoustique Environnementale qui m'ont donné un accès rapide aux études idoines, base de données acoustiques et méthodes admissibles à mettre en pratique dans ma thèse, Michel Bérengier et Benoît Gauvreau. Big up pour la gentillesse, l'altruisme et l'accompagnement de Benoît, qui m'a mis en contact avec son doctorant Rodolphe Meyer, et qui a entièrement relu et annoté de 466 commentaires mes 500 pages de manuscrit, avec tout son savoir acoustique et son humour (toute erreur résiduelle en acoustique m'étant totalement imputée). Merci à Rodolphe du Luxembourg Institute of Science and Technology, d'avoir partagé et discuté avec moi ses travaux de thèse et ses résultats de la plus grande fraîcheur en ACV acoustique routière, que j'ai pu implémenter directement dans mes propres travaux. Merci à Thomas Gibon, également du LIST, de m'avoir aidé à naviguer dans l'EIO-LCA. Enfin, un immense merci à Philippe Lepert : deux heures de discussion au congrès mondial de la route à Seoul en 2015 puis sur la planète skype en 2017, et deux tournants essentiels dans mon projet de thèse. Il m'a permis de fixer mon hypothèse de recherche (c'est toujours un pari) et d'avancer dans le connu et l'inconnu scientifique en toute sérénité. Je n'aurais pu espérer président de jury plus averti et enthousiaste, et son intérêt pour l'entretien routier se reflète bien dans les 378 commentaires « bénévoles » dont il a eu la générosité d'annoter mon manuscrit.

Merci aux personnes croisées à l'Ecole des Ponts qui ont contribué de près ou de loin à ce travail de thèse. Merci à mon ancien professeur d'économie, Pierre Ralle, qui m'a orienté dans les méthodes d'évaluation macroéconomiques et m'a mis en contact avec Ronan Mahieu de l'INSEE. Je remercie ce dernier pour l'accès privilégié aux données économiques françaises de qualité qu'il m'a fournies. Certains de mes élèves ont également prêté main forte à mes travaux : ceux des projets scientifiques – David, Margaux, Charlie, Antoine et Réda en 2014, Eida, Nargisse, Simon, Romain, Theo, Côme, Aimery, Pierrick, Paul, Thomas, William, Laure et Aurianne en 2015, mes stagiaires de l'été 2015 Victor et Danish, et mes élèves du mastère PAPDD en 2016 – Vianney, Geoffrey, Quentin et Benoît. Merci à mes collègues du LVMT pour l'ambiance conviviale générale de cet agréable laboratoire. Special thanks à Alexis Poulhes pour ses coups de pouce en programmation, Maylis Poirel (et sa maman !) pour l'accès VIP à une bibliothèque digne de Poudlard, David Meunier pour ses connaissances en analyse économique, Virginie Boutueil pour les données VUL et VE et ses conseils, Caroline Gallez pour son assistance en tant que directrice de l'Ecole Doctorale VTT, Marianne Ollivier-Trigalo pour sa critique joyeuse et toujours bien sentie, le pôle administratif pour son efficacité réjouie – Sandrine Vanhoutte, Sandrine Fournials et Virginie Debusshere – orchestré d'une main de maître par Sophie Cambon, avec qui les week-ends de gastronomie équestre en Bourgogne auront par ailleurs été très agréables.

Merci à mes voisins pour les réjouissances carthartiques : Edith, Katia et Natalie.

Merci à mes amis. Amaury pour les données de terrain sur les garages automobiles (so long depuis le primaire !). Charlotte, à la maîtrise de l'ACV, la convivialité et l'engagement citoyen hors du commun. Ceux rencontrés à Berkeley qui m'ont introduit au monde du doctorat et de leurs engagements citoyens, Anne-Perrine et Albert. Celui qui m'a soutenu avec générosité et ferveur pendant de nombreuses années, Florian. Celui avec qui mes questions académiques et existentielles ont résonné un temps, Alex. Ceux de l'ENPC, Ahmed – mathématicien (!) qui a relu mon introduction de thèse –, et Guilhem, évidemment,

partenaire du dimanche, grand stratège, ami fidèle, aux côtés de qui travailler le week-end, finalement, était (presque) une partie de plaisir.

Et puis, avec la plus vive émotion et une gratitude immense, je remercie ma famille, mes grands frères (médecins, qu'il a fallu dépasser dans la tâche doctorale : allez, sans rancune !), ma grande sœur qui m'a beaucoup soutenu et m'a apporté dès petite une partie de ma force, et puis, bien sûr, mes parents. Avec eux, j'ai pu grandir à l'abri des lieux communs, m'incarner en kaléidoscopie, laisser libre cours à mon imagination. Je crois qu'ils m'ont rendu capable, m'ont donné une certaine confiance, un franc-parler, une analyse critique et, j'espère, de l'honnêteté intellectuelle, une curiosité et une polyvalence, qui sont des outils précieux pour tous les jours. Je leur dois l'incommensurable.

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION	25
1 Contexte	26
1.1 La route : brève histoire sociotechnique.....	26
1.2 Bilan holistique de la route et outils d'évaluation rationnelle	27
2 Cadrage du mémoire	30
2.1 Problématique.....	30
2.2 Objectifs.....	31
2.3 Méthode	32
2.4 Contribution	35
3 Plan.....	36
4 Bibliographie.....	38
CHAPITRE 1 – Systémique de l'entretien routier	41
1 Introduction à la systémique et l'approche intégratrice.....	45
1.1 Systémique : origines et principe	45
1.2 Vers une approche intégratrice.....	45
1.3 Application au système de transport routier	46
1.4 Focus sur la maintenance routière	47
2 Infrastructures routières	50
2.1 Caractéristiques fonctionnelles fondamentales.....	50
2.2 Éléments structuraux	54
2.3 Techniques routières.....	56
2.4 Conception des chaussées	56
2.5 Géométrie de surface.....	58
2.6 Conclusion	60
3 Maintenance des infrastructures routières	60
3.1 Complexité de la maintenance.....	60
3.2 Détérioration des chaussées	62
3.3 Techniques de maintenance	68
3.4 Pratiques opérationnelles de la maintenance.....	76
3.5 Outils d'aide à l'entretien routier.....	80
4 Véhicules routiers.....	82
4.1 Parc français	82

4.2	Usure des véhicules.....	84
4.3	Consommations énergétiques et émissions	89
4.4	Bruit du trafic routier.....	98
5	Conclusion	100
6	Bibliographie.....	101
CHAPITRE 2 - Systémique des impacts du resurfacement des chaussées		125
1	Introduction : représentations de l'objet étudié.....	128
1.1	Des impacts hétéroclites	128
1.2	Trois strates représentatives complémentaires.....	128
2	Système géophysique terrestre	129
2.1	Représentation: approche et causalités.....	129
2.2	Capital abiotique	130
2.3	Système climatique	133
2.4	Hydrologie et circulations aériennes.....	135
2.5	Températures	139
2.6	Orographie.....	139
2.7	Environnement sonore.....	139
2.8	Synthèse	140
3	Système écologique.....	141
3.1	Ancrage théorique : l'écologie routière (Fourès et Pech 2015)	141
3.2	Processus environnementaux affectés par le transport routier par milieu naturel	142
3.3	Approche multi-échelle des impacts de l'entretien routier	143
3.4	Biodiversité et gestion patrimoniale des espèces.....	147
4	Système socioéconomique.....	151
4.1	Penser le système socioéconomique de l'entretien routier	152
4.2	Impacts socioéconomiques de l'entretien routier	160
5	Conclusion	196
6	Bibliographie.....	197
Annexes		206
CHAPITRE 3 – Indicateurs routiers d'état de surface et de performance : revue et questionnements ..		227
1	Indicateurs d'état de surface de chaussée : caractérisation et évolution	229
1.1	Panorama d'IRI français.....	230
1.2	Lien entre NBO et IRI	231
1.3	Loi d'évolution de l'IRI.....	234
1.4	Effet de la technique de resurfacement sur l'IRI.....	237

2	Indicateurs usuels d'évaluation de la performance routière	237
2.1	Planification publique des transports et protocoles d'évaluation	238
2.2	Indicateurs financiers	240
2.3	Indicateurs macroéconomiques	247
2.4	Indicateurs de performance routière	249
2.5	Indicateurs environnementaux par analyse du cycle de vie	251
2.6	Conclusion	254
3	Conclusion : nécessité d'une nouvelle méthode combinatoire d'évaluation des stratégies d'entretien routier.....	255
4	Bibliographie.....	258
CHAPITRE 4 – Méthode d'évaluation équitable et durable du resurfçage		265
1	Architecture globale de la méthode d'évaluation.....	275
2	Indicateur pour le gestionnaire : coût d'entretien.....	277
2.1	Règles de calcul	277
2.2	Indexation des prix	277
2.3	Conclusion	281
3	Indicateurs pour l'utilisateur : dépenses et temps	281
3.1	Consommation de temps	281
3.2	Coûts véhiculaires.....	284
4	Indicateurs pour la Nation : production, emplois, recettes publiques et coût global	309
4.1	Production et emplois : calcul par analyse entrées-sorties	309
4.2	Recettes fiscales et solidarité sociale	311
4.3	Coût global sociétal	313
5	Indicateurs pour les riverains : pollution et bruit.....	313
5.1	Pollution atmosphérique.....	313
5.2	Bruit.....	314
6	Indicateurs complémentaires pour l'environnement : biodiversité et ressources non renouvelables	329
6.1	Domage à la biodiversité.....	330
6.2	Consommation de ressources non renouvelables	330
7	Conclusion	330
8	Bibliographie.....	333
CHAPITRE 5 – Construction de données environnementales spécifiques		343
1	Introduction.....	344
2	ICV des opérations de resurfçage des routes interurbaines françaises	345

2.1	Resurfaçage : cycle de vie et contributions environnementales.....	346
2.2	Revue de littérature des ICV.....	348
2.3	Développement d'Inventaires français	355
3	ICV de maintenance des véhicules routiers	379
3.1	Revue de littérature des ICV.....	380
3.2	Développement d'Inventaires français	385
4	Conclusion	401
5	Bibliographie.....	403
CHAPITRE 6 - Étude de cas autoroutière.....		415
1	Présentation de l'étude de cas.....	417
1.1	Une autoroute représentative de la France	417
1.2	Stratégie d'entretien actuelle.....	417
1.3	Sélection et présentation du tronçon d'étude	419
2	Opérationnalisation autoroutière de la méthode.....	420
2.1	Définition du système de référence	420
2.2	Scénarisation : programmes de resurfaçage testés	421
2.3	Paramétrage du calcul.....	422
2.4	Calcul numérique et données complémentaires	425
3	Résultats et discussion	426
3.1	Performance des scénarios de resurfaçage : impacts absolus.....	426
3.2	Approche marginale : avantages des programmes d'entretien alternatifs	427
3.3	Analyses de sensibilité.....	439
4	Enseignements	449
4.1	Résumé technique des résultats de l'étude de base.....	449
4.2	Résumé technique des résultats d'analyses de sensibilité	451
5	Conclusion	452
6	Bibliographie.....	455
CONCLUSION		457
1	Contributions de la thèse à l'évaluation dans le domaine routier	458
1.1	Apports chapitre par chapitre	458
1.2	Enseignements et recommandations sur les pratiques de resurfaçage	459
2	Portée et limites	461
2.1	Périmètre.....	461
2.2	Aspect systémique.....	462
2.3	Incertitudes et variabilité	462

2.4	Statique, dynamique et prospective	463
2.5	Calage et validation des modèles	463
3	Pistes de recherche	464
3.1	Résilience de la méthode	464
3.2	Questionnements d'ordre méthodologique	465
3.3	Approfondissement de la physique routière.....	468
4	Bibliographie.....	470
GLOSSAIRE		472

LISTE DES ACRONYMES

Acronyme	Signification
2RM	Deux-Roues Motorisées
AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ACB	Analyse Coût Bénéfice
ACCV	Analyse des Coûts en Cycle de Vie
ACV	Analyse de Cycle de Vie
ACVa	ACV attributionnelle
ACVc	ACV conséquentielle
ACVs	ACV sociale
ADEME	Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie
AFITF	Agence de Financement des Infrastructures de Transport de France
AFNOR	Association Française de NORmalisation
AIPCR	Association Internationale Permanente des Congrès de la Route (association mondiale de la route)
Andra	Agence Nationale pour la gestion des Déchets Radioactifs
ANSES	Agence Nationale de Sécurité Sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail
APL	Analyseur de Profil Longitudinal
ARFCOM	Australian Road Fuel CONsumption Model
Artemis	Assessment and Reliability of Transport Emission Models and Inventory Systems
ASF	Autoroutes du Sud de la France
ASFA	Association des Sociétés Françaises d'Autoroutes
BAU	Bande d'Arrêt d'Urgence
BBCS	Béton Bitumineux à Chaussée Souple
BBDr	Béton Bitumineux Drainant
BBM	Béton Bitumineux Mince
BBME	Béton Bitumineux à Module Élevé
BBSG	Béton Bitumineux Semi-Grenu
BBTM	Béton Bitumineux Très Mince
BBUM	Béton Bitumineux Ultra Mince
BDD	Base de Données
BE	Bien-être
BRRC	Belgian Road Research Centre
Caltrans	Département des transports de l'État de Californie, USA
CAS	Centre d'Analyse Stratégique
CD	Conseil Départemental
CEI	Centres d'Exploitation d'Interventions
CEREA	Centre d'Étude et de Recherche sur l'Environnement Atmosphérique
CEREMA	Centre d'Expertise pour les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement
CETE	Centres d'Études Techniques de l'Équipement
CEV	Coût d'Exploitation des Véhicules (ou Convention d'Engagement Volontaire)
CFT	Coefficient de Frottement Transversal
CFTR	Comité Français pour les Techniques Routières
CGDD	Commissariat Général au Développement Durable
CIRC	Centre International de Recherche sur le Cancer
CITEPA	Centre Interprofessionnel Technique d'Études de la Pollution Atmosphérique

CNIR	Centre National d'Information Routière
CNR	Comité National Routier
COPERT	COmputer Program to calculate Emissions from Road Transport
CSTB	Centre Scientifique et Technique du Bâtiment
DALY	Année de vie ajustée sur l'incapacité (de l'anglais « Disability Adjusted Life Years »)
DDE	Directions Départementales de l'Équipement
DDHC	Déclaration des Droits de l'Homme et du Citoyen
DEP	Déclaration Environnementale Produits
DGITM	Direction Générale des Infrastructures, des Transports et de la Mer
DIR	Direction Interdépartementale des Routes
DIT	Direction des infrastructures et des Transports
DoT	Department of Transportation
DR	Direction des Routes
DVT	Durée de Vie Typique
EGR	Exhaust Gas Recirculation
EIE	Étude d'Impact Environnemental
EPSF	Établissement Public de Sécurité Ferroviaire
ESE	Évaluation Socio-Économique
ESU	Enduit Superficiel d'Usure
ETP	Équivalent Temps Plein
ETRMA	European Tyre & Rubber Manufacturers Association
USA	États-Unis d'Amérique
FDES	Fiches de Déclarations Environnementales et Sanitaires
FHWA	Federal Highway Administration
GB	Grave-Bitume
GC	Grave-Ciment
GD	Gêne Diurne
GES	Gaz à Effet de Serre
GiRR	Gestion intelligente des Réseaux Routiers
GMAO	Gestion de la Maintenance Assistée par Ordinateur
GNT	Grave Non Traitée
GPL	Gros Poids Lourd
HBEFA	Handbook of Emission Factors
HCM	Highway Cost Model
HDM	Highway Development and Management
HPMS	Highway Performance Monitoring System
ICV	Inventaires de Cycle de Vie
IdF	Ile-de-France
IDRRIM	Institut des Routes, des Rues et des Infrastructures pour la Mobilité
IFSTTAR	Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux
INRS	Institut National de Recherche et de Sécurité
INSEE	Institut National de la Statistique et des Études Économiques
IPC	Indices des Prix à la Consommation
IQRN	Image Qualité des Routes Nationales
IREX	Institut pour la Recherche appliquée et l'Expérimentation en génie civil
IRI	« International Roughness Index », traduit ici comme « Indice de Rugosité Nationale »
IUCN	International Union for Conservation of Nature

LAeq	Niveau de bruit équivalent
LAm _{ax}	Niveau sonore maximum observé
LCPC	Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
Lden	Indicateur de niveau sonore global (pondération jour-soirée-nuit)
Ln	Niveau sonore nocturne
LOLF	Loi Organique relative aux Lois de Finances
LRPC	Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées
LVMT	Laboratoire Ville Mobilité Transport
MB	Matériaux Bitumineux
MEDDE	Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie
METL	Ministère de l'Égalité des Territoires et du Logement
MTLH	Matériau Traitée au Liant Hydraulique
MTQ	Ministère des Transports du Québec
NBO	Note (ou Notation) par Bande d'Onde
NEDC	New European Driving Cycle
NOAA	National centers for environmental information
OCDE	Organisation de Coopération et de Développement Économiques
OMS	Organisation Mondiale de la Sante
ONISR	Observatoire National Interministériel de la Sécurité Routière
PDU	Plans de Déplacements Urbains
PF	Plateforme
PIARC	Permanent International Association of Road Congresses
PIB	Produit Intérieur Brut
PL	Poids Lourd
PLF	Poids Lourd de Fret
PMP	Profondeur Moyenne de Profil
PMS	Pavement Management Systems
PPL	Petit Poids Lourd
PST	Partie Supérieure de Terrassement
PTAC	Poids Total Autorisé en Charge
R&M	Réparation & Maintenance
RC	Réseau Communal ou Route Communale
RD	Réseau Départemental ou Route Départementale
RNc	Route Nationale concédée
RNI	Réseau National Interurbain
RNnc	Route Nationale non concédée
RRN	Réseau Routier National
RRNc	Réseau Routier National concédé
RRNnc	Réseau Routier National non concédé
Sanef	Société des autoroutes du nord et de l'est de la France
SCA	Société Concessionnaire d'Autoroute
SCRIM	Sideway force Routine Investigation Machine
SETRA	Service d'Études sur les Transports, les Routes et leurs Aménagements
SFA	Société Française d'Acoustique
SICRE	Système d'Information sur la Connaissance du Réseau routier national
SOeS	Service de l'Observatoire et des Statistiques
SPRIR	Syndicat professionnel régional de l'industrie routière

Pour un entretien routier durable

TEE	Tableau Économique d'Ensemble
TES	Tableaux Entrées-Sorties
TICPE	Taxe Intérieure de Consommation sur les Produits Énergétiques
TMJA	Trafic Moyen Journalier Annuel
TPC	Terre-Plein Central
TR	Trains Routiers
TRI	Taux de Rentabilité Interne
TS	Trouble du Sommeil
TVA	Taxe sur la Valeur Ajoutée
UE	Union Européenne
URF	Union Routière de France
USIRF	Union des Syndicats de l'industrie Routière Française
UVP	Unité de Véhicule Particulier
VA	Valeur Ajoutée
VAN	Valeur Actualisée Nette
VAN-SE	Valeurs Actualisée Nette SocioEconomique
VE	Véhicule Électrique
VL	Véhicule Léger
VP	Voiture Particulière
Vth	Véhicule thermique
VUL	Véhicules Utilitaires Légers
VVS	Valeur de la Vie Statistique

COMPOSÉS CHIMIQUES

Formule ou Symbole	Substance chimique
NO_x	Oxydes d'azote
As	Arsenic
Ba	Baryum
Cd	Cadmium
CFC	Chlorofluorocarbure
CH₄	Méthane
CO	Monoxyde de carbone
CO₂	Dioxyde de carbone
COV	Composé Organique Volatil
COVNM	Composé Organique Volatil Non Méthanique
Cr	Chrome
Cu	Cuivre
HAP	Hydrocarbure Aromatique Polycyclique
HCN	Cyanure d'hydrogène
N₂	Diazote
N₂O	Protoxyde d'azote
NH₃	Ammoniac
Ni	Nickel
NO	Monoxyde d'azote
NO₂	Dioxyde d'azote
O₂	Dioxygène
Pb	Plomb
PM	Particules fines
PM₁₀	Particules fines de diamètre inférieur à 10 µm
PM_{2,5}	Particules fines de diamètre inférieur à 2.5 µm
Se	Sélénium
SO₂	Dioxyde de soufre
SO_x	Oxydes de soufre
Zn	Zinc

UNITÉS

Symbole	Unité
L	Litre
N	Newton
g	Gramme
m	Mètre
mkm	millier de kilomètres
Pa	Pascal
t	Tonne
Wh	Wattheure
dB(A)	Décibel pondéré A

INTRODUCTION

Table des matières

1	Contexte	26
1.1	La route : brève histoire sociotechnique.....	26
1.1.1	Enjeu de la vitesse de mobilité et réponses technologiques	26
1.1.2	Renouveau du transport routier : automobiles et infrastructures	26
1.1.3	Accroissement des contraintes environnementales et réponse politique internationale 27	
1.2	Bilan holistique de la route et outils d'évaluation rationnelle.....	27
1.2.1	Bilan actuel du transport routier.....	27
1.2.2	Outils de rationalisation des politiques de transport routier et application à l'entretien 28	
1.2.3	Vers une gestion systémique de l'entretien routier ?.....	29
2	Cadrage du mémoire.....	30
2.1	Problématique.....	30
2.2	Objectifs.....	31
2.3	Méthode	32
2.3.1	Approches de travail.....	32
2.3.2	Positionnement transdisciplinaire.....	33
2.3.3	Périmètre.....	34
2.4	Contribution	35
2.4.1	Fonctions de la méthode d'évaluation.....	35
2.4.2	Originalité	35
3	Plan.....	36
4	Bibliographie.....	38

1 Contexte

1.1 La route : brève histoire sociotechnique

1.1.1 Enjeu de la vitesse de mobilité et réponses technologiques

L'histoire de l'humanité a montré le caractère stratégique de la portée et de la rapidité des déplacements humains, de la survie des hommes du paléolithique dans un environnement aux ressources locales limitées (Cavaillès 1946, p13; Bihoux 2014) au bien-être de l'homme de l'anthropocène grâce à l'accès aux emplois, services et loisirs, en passant par des enjeux militaires¹ (Cavaillès 1946, p114, p183) et commerciaux² (Cavaillès 1946, p7). En réponse à cet objectif de vitesse, la découverte d'énergies nouvelles (charbon, pétrole, électricité) et une mécanisation concomitante ont fait émerger des technologies permettant une mobilité toujours plus rapide et étalée³, passant des vitesses antérieures à la révolution industrielle globalement inférieures à 20 km/h à celles bien plus élevées de la locomotive à vapeur⁴, du tramway, du métro, de la voiture thermique, et de l'avion (Desportes et Picon 1997). En particulier, avec l'invention du moteur à explosion à la fin du XIX^{ème} siècle puis la démocratisation de l'automobile générée par le Fordisme dans la première moitié du XX^{ème} siècle aux États-Unis, et plutôt dans la seconde moitié du siècle en France (Dupuy 1995), c'est « une nouvelle vitesse [qui empoigne] la biologie humaine » (Le Corbusier 1935) et une nouvelle technologie qui « conquiert la planète » (Dupuy 1995). Non sans changement de paradigme pour les infrastructures routières.

1.1.2 Renouveau du transport routier : automobiles et infrastructures

Durant le second moitié du XX^{ème} siècle, les évolutions des véhicules routiers – bien plus rapides, plus lourds, et plus nombreux (Cavaillès 1946, p298) – nécessitent une forte adaptation des routes (Cavaillès 1946, p297). Lorsque le fameux modèle T d'Henri Ford révolutionne la diffusion de l'automobile en 1908, la France compte déjà 534 000 km d'infrastructures routières (Cavaillès 1946, p280): 12 000 km héritées des Romains et développées pour des chars à bœufs ou à cheval, le reste du réseau ayant été majoritairement construit entre 1855 et 1910 (Guillerme 1984) pour l'hippomobilité. Les structures romaines constituées d'une superposition d'empierrements d'un mètre d'épaisseur n'avaient été remises en question qu'au XVIII^{ème} siècle par l'ingénieur des Ponts et Chaussées Trésaguet, repensant notamment la géométrie et la surface des routes pour en améliorer l'étanchéité et le drainage, augmentant ainsi la longévité des chaussées. Cette doctrine routière doit néanmoins être repensée pour répondre aux nouvelles contraintes relatives au développement du véhicule thermique. L'augmentation des sollicitations mécaniques due au poids et au nombre accrus de véhicules nécessite adaptation du dimensionnement structurel de chaussée comme amélioration de l'état de surface (charges dynamiques) (OCDE 1998). La vitesse nouvelle des voitures pose quant à elle deux principaux problèmes : un manque de visibilité dû à la géométrie routière et au soulèvement de poussières⁵ (Cavaillès 1946, p297), ainsi qu'une adhérence insuffisante (surface et géométrie routière). En réponse à ces trois difficultés, on révisé les règles géométriques (rayons de courbure, dévers, pentes, niveaux d'uni⁶) (Cavaillès 1946, p301-302) et on développe la cohésion des matériaux par ajout de liants hydrocarbonés aux granulats. À l'entre-deux-guerres, le développement

¹ Conquêtes romaines ou napoléoniennes pour n'en citer que quelques-unes

² Jonction des lieux de productions aux lieux de consommation dès le Moyen-Âge, avant un glissement mondial

³ +30% de distance journalière parcourue en 30 ans pour un budget-temps constant (Conseil Economique, Social et Environnemental 2009)

⁴ 100 km/h en 1835

⁵ Matériaux routiers non cohésifs à l'époque

⁶ Caractérise la régularité de la surface aux plus grandes longueurs d'onde (à partir de 50cm)

du réseau national permet déjà de pratiquer des vitesses atteignant 90-120 km/h (Cavaillès 1946, p312), vitesses portées à 130 km/h dès 1955 grâce à l'autoroute⁷.

1.1.3 Accroissement des contraintes environnementales et réponse politique internationale

L'intensification kaléidoscopique du transport routier au XXème siècle en accroît fortement ses impacts environnementaux. Individuellement, sécurité et confort des véhicules ont été renforcés, ceux-ci devenant plus lourds (Cavaillès 1946, p298), donc plus consommateurs de ressources non renouvelables pour leur construction (métaux et plastiques) et leur utilisation (pétrole), et ainsi plus émetteurs de substances polluantes. Leurs niveaux d'émissions sonores s'élèvent également avec la vitesse. Ces évolutions à l'échelle du véhicule sont d'autant plus importantes qu'elles se combinent à l'accroissement fort du parc de voitures⁸, et à son usage. L'impact environnemental des infrastructures croît également. L'importation d'engins de chantier à grands rendements développés pendant la seconde guerre mondiale pour construire les grands espaces américains permet de doubler la taille du réseau routier en France en moins d'un siècle, réseau par ailleurs construit avec des matériaux toujours plus sophistiqués⁹, sophistication allant souvent de pair avec des impacts unitaires accrus. Les réactions politiques internationales à la montée globale des contraintes générées par les activités humaines sur l'environnement naturel et humain sont nombreuses, de la conférence des Nations-Unies sur l'environnement humain en 1972¹⁰ et son rapport du club de Rome (Meadows et Club of Rome 1972) aux plus récents Grenelle de l'Environnement¹¹ et Accords de Paris (UNFCCC 2016), en passant par le rapport Brundtland définissant la notion de développement durable (Commission mondiale sur l'environnement et le développement de l'Organisation des Nations unies, présidée par Gro Harlem Brundtland 1987), le premier sommet de la Terre en 1992 proposant un programme d'action¹² pour le mettre en œuvre, et les accords de Kyoto relatifs au changement climatique en 1997¹³. En tant que contributeur important aux impacts environnementaux, le transport routier en est une cible phare.

1.2 Bilan holistique de la route et outils d'évaluation rationnelle

1.2.1 Bilan actuel du transport routier

« Expression la plus ancienne et la plus claire de la vie de relations » (Cavaillès 1946), la route comme fournisseur de services socioéconomiques et secteur d'activité propre a vu sa performance en termes de vitesse, d'accessibilité et de confort croître à mesure que sa performance environnementale globale chutait. Si certains de ses aspects environnementaux se sont améliorés au cours des deux dernières décennies grâce à des mesures politiques réussies¹⁴, le transport routier qui compte aujourd'hui pour presque 90% du trafic de personnes (en passagers-kilomètres) et de marchandises (en tonnes-kilomètres) en France (MEDDE 2014b) reste un secteur crucial : il engendre 28% des émissions de Gaz à Effet de Serre (GES) françaises (données SECTEN-Citepa 2015¹⁵), 26 000 décès

⁷ http://routes.wikia.com/wiki/Autoroute_fran%C3%A7aise

⁸ Le parc passe de 100 000 véhicules en 1918 à presque 20 fois plus en 1933 en France (Cavaillès 1946, p342)

⁹ Exemple des bitumes et liants modifiés par ajout de polymères

¹⁰ http://www.diplomatie.gouv.fr/sites/odysee-developpement-durable/files/1/Declaration_finale_conference_stockholm_1972.pdf

¹¹ http://www.side.developpement-durable.gouv.fr/userfiles/memento_maires.pdf

¹² <http://www.un.org/french/events/rio92/rio-fp.htm>

¹³ http://unfccc.int/portal_francoophone/essential_background/kyoto_protocol/items/3274.php

¹⁴ En 2015, contribution aux émissions et réduction en 20 ans :

NOx : 55% et -38% ; PM2.5 : 16% et -44% ; SO2 : 2% et -81% ; (données SECTEN)

¹⁵ <https://www.citepa.org/fr/activites/inventaires-des-emissions/secten>

annuels prématurés du fait des émissions de particules fines¹⁶ pour une facture d'une quinzaine de milliards d'euros¹⁷, sans parler d'autres impacts tels que les effets sanitaires du bruit, la consommation forte de ressources, la production de déchets, ou l'impact aux écosystèmes. Aujourd'hui, le système routier français compte 38 millions de véhicules dont 85% de Voitures Particulières (VP), 13% de Véhicules Utilitaires Légers (VUL) et 2% de Poids Lourds (PL) (MEDDE 2014b), ainsi que plus d'un million de kilomètres d'infrastructures, dont 62% de routes communales, 36% de routes départementales et 2% de routes nationales (MEDDE 2014b). Les diverses branches du transport routier représentent 8% des emplois français (2.5 millions), 40 milliards d'euros de recettes fiscales, et participent à hauteur de 13% au Produit Intérieur Brut (PIB) national (URF 2016). Les ménages possèdent en moyenne 1.4 véhicule (Hubert, Pistre, et Madre 2016), pour des dépenses excédant les 10% de leur budget (Visse 2013) – répartis pour 2/3 en coûts d'utilisation et pour 1/3 en coûts d'achat (MEDDE 2014b). Selon les pratiques de mobilité actuelles, ce ne sont pas moins de 4 années cumulées que nous aurons passé sur les routes à la fin de notre vie. Du point de vue patrimonial, le réseau routier constitue également un capital national significatif : en France, il serait l'actif public le plus élevé, estimé à environ 2000 milliards d'euros (USIRF 2017) dont plus de 10%¹⁸ pour le réseau national (Saintillan 2013), soit environ le PIB annuel du pays. Le transport routier constitue ainsi un levier socioéconomique et environnemental crucial, à la fois vecteur potentiel d'iniquité socioéconomique (Jouffe et al. 2015) et d'injustice environnementale (Faburel 2008) et inversement de développement économique, d'équilibre des territoires (Conseil Economique, Social et Environnemental 2009) ou de capacité (Sen 1985, p10).

1.2.2 Outils de rationalisation des politiques de transport routier et application à l'entretien

Ces chiffres soulignent l'intérêt d'évaluer les politiques de transport routier dans le but de participer à l'amélioration du fonctionnement du pays. Pour cela, les décideurs doivent s'appuyer sur des outils d'évaluation quantifiée fiables. À l'heure actuelle, la prise de décision politique relative aux transports est un processus en entonnoir tant du point de vue de l'échelle géographique que de la spécification du projet. À l'échelle du projet routier, d'un côté s'effectuent des Évaluations Socio-Économiques (ESE) (Instruction du Gouvernement du 16 juin 2014 relative à l'évaluation des projets de transport¹⁹) et des Études d'Impacts Environnementales (EIE) selon les préconisations du Ministère de l'Écologie, de l'autre et selon l'appel d'offre, des évaluations environnementales quantitatives mais partielles des infrastructures ou plus rarement des véhicules routiers (cas de lignes de transport en commun), du type bilan d'émissions de GES ou plus largement Analyse de Cycle de Vie. Si certains types d'études comme l'ESE et l'EIE sont totalement intégrés au processus des projets, l'aspect quantitatif est limité, et en particulier la portée pragmatique du calcul socioéconomique dans l'aide à la décision politique peut être questionnée (Eliasson et al. 2014; Annema et al. 2016), de même que la complétude des effets évalués²⁰ – en termes d'indicateurs comme de phénomènes physiques ou socioéconomiques sous-jacents – et que la signification des quantifications effectuées,

¹⁶ 48 000 décès imputés à la pollution aux PM2.5 (Santé Publique France 2016), et 55% des émissions dues au transport routier (données SECTEN)

¹⁷ <https://www.ccomptes.fr/sites/default/files/EzPublish/20160121-discours-rapport-politiques-publiques-lutte-contre-pollution-air.pdf> (p6)

¹⁸ Dans le compte général de l'État, les infrastructures routières qui regroupent les autoroutes, les ouvrages d'art, les dépendances (assainissement) les aires et l'équipement (signalisation ; glissières ; systèmes d'exploitation) sont valorisés au bilan de l'État au « coût de remplacement déprécié », soit le coût de reconstruction à neuf diminué du coût d'entretien

¹⁹ http://www.bulletin-officiel.developpement-durable.gouv.fr/fiches/BO201412/met_20140012_0100_0047.pdf

²⁰ Voir la note produite à ce propos par l'Autorité Environnementale : http://www.cgedd.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/170913_-_note_evaluation_socio-economique_-_deliberee_cle0bea57.pdf

notamment par le biais de la monétarisation. D'abord en termes d'effets étudiés : les impacts environnementaux quantifiés par l'ESE sont globalement restreints aux GES et à certains polluants atmosphériques liés à la seule phase d'exploitation du projet, tandis que les effets économiques larges (parfois appelés « effets systémiques ») ont peine à être calculés (Quinet et al. 2013). L'EIE vient compléter cette évaluation en considérant l'impact aux écosystèmes locaux, mais est davantage adaptée aux projets de construction d'infrastructures neuves. Ces projets étant maintenant moins fréquents, l'amélioration de systèmes existants, et en particulier l'entretien des routes, se présente comme un enjeu sociétal substantiel. L'ESE et l'EIE sont peu adaptées à cette activité, notamment en termes de phénomènes considérés, puisqu'elles n'outillent pas pour la modélisation des conséquences de la dégradation des routes sur l'interaction véhicule-chaussée.

1.2.3 Vers une gestion systémique de l'entretien routier ?

1.2.3.1 Gestion physico-budgétaire du patrimoine

Avec le désengagement étatique progressif du secteur routier²¹, les budgets alloués à l'entretien des routes²² comme les compétences opérationnelles seraient globalement à la baisse (USIRF 2015), impliquant le virage d'un entretien préventif à une gestion plutôt curative, sans connaissance des conséquences d'un tel virage. Aujourd'hui, on consacre 16 milliards d'euros à la gestion des routes, soit moins d'1% de leur valeur de reconstruction (USIRF 2017). L'âge moyen des couches de surface des chaussées augmente, et la profession prédit des dégradations exponentielles, parlant volontiers de « dette grise », i.e. de retards d'entretien dont les économies à court terme impliqueraient un surinvestissement fort à moyen ou long terme, ou à défaut l'abandon de routes comme cela se produit déjà aux États-Unis²³. Par transposition aux chaussées, exercice toujours périlleux, l'opinion publique ne peut que s'inquiéter de l'effondrement d'ouvrages d'art en Europe²⁴ comme cela s'est produit de manière spectaculaire à Gêne durant l'été 2018, effondrements qui seraient « facilement » attribués à un mauvais entretien des infrastructures²⁵. Toutefois, les connaissances scientifiques actuelles sur les lois de dégradations des infrastructures en général et des routes en particulier sont encore insuffisantes pour prévoir sur plus de quelques années leur comportement spécifique, malgré des règles de dimensionnement largement acceptées. Ce domaine constitue d'ailleurs une thématique de recherche historique foisonnante.

1.2.3.2 À l'aube d'une importance croissante des interactions véhicule-chaussée en France ?

Si l'effet d'emballlement des dégradations routières dû à la réduction des budgets d'entretien ne semble pas, à l'heure actuelle, présenter de preuve tangible, il en est différemment de l'impact de la détérioration surfacique de chaussée sur la performance globale du système routier. En effet, l'état des routes influence non seulement leur durabilité propre²⁶, mais aussi la performance globale du

²¹ Par exemple, vente des parts des sociétés d'autoroutes en 2005 et décentralisation de 18 000 km de routes nationales vers les départements en 2006 (Fayard, Gaeta, et Quinet 2005)

²² Il est difficile de trouver des chiffres sur l'investissement routier. En reprenant des données de consommation nette de bitume en France (Michou 2017), on trouve une diminution linéaire moyenne de presque 100 kt par an entre 2004 et 2016 ($R^2=0.87$). Le bitume n'ayant pas de concurrent aujourd'hui en tant que liant routier, malgré la recherche de liants biosourcés, cela prouve la baisse d'investissement routier en France puisque 90% du bitume est consommé par ce secteur.

²³ www.lemonde.fr/m-le-mag/article/2017/03/18/aux-etats-unis-pas-d-argent-pas-de-goudron_5096582_4500055.html

²⁴ https://www.francetvinfo.fr/monde/italie/effondrement-d-un-pont-a-genes/plus-de-800-ponts-menaces-d-effondrement-en-france-quatre-questions-sur-ce-chiffre-inquietant_2898709.html

²⁵ https://www.huffingtonpost.fr/2018/08/17/dapres-un-expert-italien-il-y-aurait-10-000-ponts-en-italie-susceptibles-aussi-de-seffondrer_a_23504103/

²⁶ Notamment lorsque l'imperméabilité de la route est en jeu (LCPC-Sétra 1994, p67)

système routier par exemple du fait de la sensibilité des coûts d'utilisation des véhicules (Chatti et Zaabar 2012) et de la détérioration des marchandises transportées (Zaabar et Chatti 2012). Ces effets sont notamment évalués dans les modèles HDM (pour Highway Development and Management) développés pour la Banque Mondiale depuis plusieurs dizaines d'années (Watanatada et al. 1987; Bennett 1996; Kerali, Odoki, et Stannard 2006). La Banque Mondiale avançait ainsi une augmentation des coûts d'exploitation de 1.4 à 45 euros par an et par euro économisé en maintenance²⁷, selon une méta-analyse coûts-bénéfices de stratégies de maintenance routière de 33 pays (Heggie et Vickers 1998).

1.2.3.3 Impulsions récentes pour un entretien routier durable

La Convention d'Engagement Volontaire (CEV) des acteurs de la construction routière signée en 2009 comme le paquet vert autoroutier (décret du 26 mars 2010) du Grenelle de l'Environnement ont officialisé un engagement, au moins à l'époque, des principaux acteurs de la route dans une démarche de développement durable. Cette CEV a abouti au développement d'éco-comparateurs routiers – ECORCE, SEVE, Variways – permettant l'Analyse de Cycle de Vie (ACV) des phases constructives des routes dont l'entretien lourd (De Bortoli 2015), méthode qui n'était jusqu'alors que très peu mobilisée en France²⁸ pour les bilans environnementaux routiers. De plus, le discours officiel semblant émerger des organisations stratégiques du secteur routier met en avant un intérêt fort pour le développement d'une nouvelle doctrine d'entretien routier, intégrant des critères de développement durable, et qui faciliterait et rationaliserait la prise de décision et l'évaluation des stratégies patrimoniales. Diverses initiatives ont été menées dans ce sens²⁹ ou sont à l'étude, comme la refonte de la politique d'entretien des chaussées du réseau national (DGITM 2014b, 2014a), l'étude GEPUR pour la gestion et l'entretien du patrimoine urbain et routier (CoTITA Est - IDRRIM - USIRF 2016), le projet SBaDFoRM pour l'optimisation de la gestion de l'entretien des routes³⁰, le projet « Durée de Vie Des Chaussées »³¹ et l'Observatoire National des Routes³². Toutefois, l'aspect intégratif systémique reste autant primordial que difficile à modéliser.

2 Cadrage du mémoire

2.1 Problématique et hypothèse

Dans le contexte décrit précédemment, cette thèse aborde le sujet de l'évaluation des stratégies d'entretien routier en France pour répondre aux enjeux du développement durable. Aujourd'hui, les pratiques les plus avancées en entretien des routes françaises restent majoritairement façonnées par une approche de gestion patrimoniale infrastructurelle classique, soit une compréhension mécanique et statistique d'un objet de génie civil. L'entretien routier tel qu'opéré aujourd'hui poursuit trois grands objectifs : (1) assurer la sécurité des usagers par le biais d'une adhérence suffisante et d'une bonne visibilité, (2) préserver le patrimoine routier (longévité structurelle) dans un but de performance financière et socioéconomique, et, dans une certaine mesure et selon le type de réseau, (3) permettre la meilleure efficacité infrastructurelle grâce à (i) une capacité routière suffisante limitant la congestion générée par des travaux ou des incidents, (ii) un bon niveau de confort (solllicitations mécaniques, bruit dans l'habitacle) et (iii) une gêne sonore limitée pour les

²⁷ Respectivement pour des routes supportant des trafics de 300 et 10 000 véhicules par jour

²⁸ La première ACV routière française n'aurait été réalisée qu'en 2005 (Abdo 2011)

²⁹ Par l'IFSTTAR (ex-LCPC), par les établissements publics et privés de gestion routière

³⁰ <http://jtr2013.ifsttar.fr/presentations/265-LORINO-JTR2013.pdf>

³¹ http://www.usirf.com/wp-content/uploads/DVDC_plaquette_2016-02-01.pdf

³² <http://www.usirf.com/observatoire-national-de-la-route-2230/>

riverains routiers, notamment en agglomération. Parmi ces objectifs, l'état de surface de chaussée reste communément peu pris en compte dans l'arbitrage des stratégies d'entretien des routes en France, bien qu'il puisse l'être ailleurs dans le monde³³. Or, des surcoûts atteignant 16% en consommation de carburant et 70% en usure des véhicules entre route en excellent état et route dégradée ont encore été mis en évidence récemment aux États-Unis (Chatti et Zaabar 2012). La chute de la qualité de surface des routes qui résulterait de possibles baisses d'investissements routiers³⁴ pourrait amplifier certains phénomènes relatifs à ces interactions route-véhicule probablement jusqu'alors négligeables.

Avec la prégnance politique des questions environnementales et socioéconomiques et une certaine volonté politique d'appuyer la prise de décision sur des raisonnements en coût global (cf. Stratégie nationale de développement durable adoptée le 3 juin 2003), l'évaluation et les pratiques relatives à l'entretien routier françaises ne répondent peut-être donc plus entièrement aux enjeux sociétaux afférents. Si du point de vue opérationnel il n'existe aujourd'hui pas d'outil répondant à ces nouvelles problématiques, du point de vue académique nous soulignons l'absence de modèle à la fois :

- Systémique, i.e. incluant l'interaction route-véhicule ;
- Holistique, i.e. tenant compte des impacts socioéconomiques, environnementaux et financiers affectant l'ensemble des parties prenantes de l'entretien routier ;
- Spécifique à la France, i.e. adapté au cas du contexte infrastructurel et véhiculaire français, lui-même mouvant.

Partant du constat de la forte évolution de l'objet routier – dans sa structure mécanique propre comme dans sa portée sociétale, nous souhaitons analyser dans quelle mesure une prise en compte plus globale des impacts de l'état de surface de chaussée pourrait changer le paradigme de l'entretien routier, selon des considérations environnementales, socioéconomiques et financières, et *in fine* modifier les « bonnes pratiques », voire suggérer de nouveaux modèles économiques pour l'entretien des chaussées. L'hypothèse que nous étudierons sera donc le caractère dimensionnant de l'interaction chaussée-véhicule dans la définition de politiques de resurfacement durables.

2.2 Objectifs

Afin de questionner l'évaluation de l'entretien des routes dans une dynamique de développement durable, nous souhaitons étudier les mécanismes et l'ampleur des conséquences socioéconomiques, environnementales et financières de la maintenance routière afin de comprendre comment les travaux d'entretien – selon leur temporalité et les choix techniques réalisés entre autres – viennent impacter les parties prenantes du transport routier. Le but est ensuite de se mettre en capacité de comparer quantitativement les effets holistiques de plusieurs stratégies d'entretien sur un tronçon routier, neuf ou en état d'usage.

Plus spécifiquement, les objectifs de la thèse sont les suivants :

- Compréhension fine du système de transport routier français ;

³³ Par exemple en Californie (3.53 m/km avant 2014, 2.86 m/km maintenant), et plus largement dans le plan national stratégique de la FHWA aux États-Unis d'Amérique (USA) (FHWA 1998) qui proposait un seuil d'IRI de 2.7 m/km à ne pas dépasser

³⁴ Il n'existe pas encore de statistiques temporelles exhaustives et unifiées de l'état patrimonial et des investissements sur l'ensemble du réseau routier français, mais le chiffre d'affaire de l'industrie routière a enregistré une baisse de 30% entre 2007 et 2015 (Croisement des données de la FNTP (rapports « Chiffres Clés » annuels) et du rapport USIRF 2015), soit une baisse annuelle de plus de 4%

- État de l’art des pratiques d’entretien routier ;
- Compréhension qualitative et quantitative des impacts des stratégies d’entretien ;
- Identification des parties prenantes de l’entretien : le gestionnaire routier, l’usager, les riverains routiers, la « Nation macroéconomique » et l’environnement ;
- Construction fine d’un référentiel relatif à ces impacts et ces parties prenantes et sélection argumentée d’indicateurs et de méthodes de calcul ;
- Développement spécifique d’une méthode opérationnelle d’évaluation holistique comparative des stratégies de renouvellement des couches de surface de tronçons routiers interurbains français ;
- Application à un tronçon pour démonstration opératoire sur une étude de cas
- Mise en évidence de premiers enseignements tendanciels français sur la base de ce travail ;

Finalement, à la question historique en économie des transports « qui doit payer pour une nouvelle infrastructure et selon quelle modalité » (Desportes et Picon 1997, p47), nous souhaitons apporter des éléments de réponse au virage vers le maintien de ces nouvelles infrastructures aujourd’hui presque totalement déployées et vieillissantes dans un contexte de prise de conscience environnementale et avec une considération plus complète des parties prenantes socioéconomiques, se restreignant d’ordinaire à un système binaire usagers/financeur. Ainsi, nous proposerons une méthode multicritère pour quantifier « les coûts potentiels supportés directement ou indirectement, monétairement ou non, par les parties prenantes de l’entretien routier selon les stratégies de maintenance adoptées » (Desportes et Picon 1997, p47).

2.3 Méthode

2.3.1 Approches de travail

Notre méthode de travail propose d’aborder dans un premier temps la question de l’entretien routier par une approche analytique classique, présentant l’agencement technique du système routier, ses grandes caractérisations et sa gestion. Ce travail s’appuie à la fois sur une revue de littérature (majoritairement grise), des échanges avec la profession routière, ainsi qu’un questionnaire sur les pratiques de « resurfacement » en France, soit le renouvellement des revêtements routiers ou couches de surface. Ce questionnaire a été diffusé à toutes les Sociétés Concessionnaires d’Autoroutes françaises, à la Direction des Infrastructures de Transport pour toucher les Directions Interdépartementales des Routes – exploitants des routes nationales non concédées, ainsi qu’aux Conseils Départementaux par le biais de l’ADTECH, Association des Directeurs Techniques des départements, métropoles et régions.

Cette première entrée étant insuffisante pour quantifier précisément les effets d’interaction et de rétroaction des composants du système de l’entretien routier, elle sera ensuite complétée par une approche systémique des impacts basée sur une littérature plus académique : appréhension qualitative puis quantitative des conséquences des programmes de maintenance. Cela permet ensuite de dégager les types de performance auxquelles sont sensibles les parties prenantes de l’entretien. Les gestionnaires s’intéressent aux coûts d’entretien et à l’état du patrimoine routier ; les usagers sont principalement sensibles aux coûts d’utilisation des véhicules, à la sécurité routière, au temps passé sur la route et au confort de roulement ; le riverain réagira aux pollutions atmosphériques et sonores locales ainsi qu’à sa sécurité ; l’État surveillera les bilans financiers publics, le produit intérieur brut, le chômage et l’emploi ; l’environnement sera atteint par des ponctions et des rejets impactant le changement climatique, la consommation de ressources non

renouvelables, la dégradation de ses écosystèmes donc la biodiversité, et la production de déchets de natures diverses.

Nous développerons ensuite dans le détail le processus de construction de la méthode quantitative et les choix réalisés pour chaque sous-modèle de calcul. D'abord, nous présenterons l'architecture globale de la méthode d'évaluation répondant aux performances attendues par les parties prenantes et au système routier français: entrées, sorties, chainage des sous-modèles. Nous procéderons ensuite à une sélection détaillée argumentée des sous-modèles : comparaison critique des sous-modèles de la littérature pour sélection et bouclage éventuel des plus adéquats au cas de l'interurbain français, et/ou adaptation au cas français. Le module de calcul se sépare en deux grands blocs. D'abord, la modélisation physique : composition et évolution des tronçons routiers et des flottes de véhicules ; ensuite, le calcul de chaque indicateur de performance. Ces blocs s'appuient aussi sur un recueil de données de littérature et industrielles qui aura également été réalisé et détaillé.

Le caractère opérationnel de la méthode de calcul sera testé sur un tronçon réel français, afin d'en montrer ses possibilités ainsi que quelques résultats de quantification.

2.3.2 Positionnement transdisciplinaire

Par différence aux positionnements majoritairement mono-disciplinaires de l'entretien des chaussées, l'intégration des intérêts de l'ensemble des parties prenantes dans une même méthode nécessite une approche fondamentalement pluridisciplinaire et intégrative, c'est-à-dire transdisciplinaire.

À partir d'une description physique quantitative d'une infrastructure et de son trafic, de lois d'évolution de cette infrastructure et du trafic porté, et d'un programme d'entretien routier, nous solliciterons l'évaluation socioéconomique et financière, l'évaluation acoustique, l'analyse de cycle de vie et la méthode input/output afin de calculer des indicateurs de performance multipartites d'un programme de resurfaçage.

2.3.2.1 Génie civil et modélisation de l'objet routier

La description physique de l'infrastructure et de son évolution s'appuie sur la discipline du génie routier, croisant lui-même des connaissances physiques mécaniques et des connaissances empiriques et stochastiques. Nous en sortirons une classification des types de route et une description de la géométrie, du type de revêtement et de la caractérisation de son état de surface. Nous ferons appel à des lois d'évolution d'indicateurs d'état de surface de chaussée, relatifs à l'uni et à la mégatexture, qui permettront de calculer, en utilisant des modèles spécifiques d'HDM-4, la consommation en carburant et l'usure des véhicules (pneumatiques et coûts hors pneumatiques) relatifs à cet état de surface. La caractérisation du programme de resurfaçage routier renseignée par l'utilisateur de la méthode permettra également d'en sortir, basé sur des retours d'expérience gestionnaires, les coûts financiers, la gêne à l'usager, les bilans de matériaux, d'énergie et d'émissions polluantes ou sonores afférents.

2.3.2.2 Macroéconomie et bilan national

Les phases de travaux routiers ont diverses implications macroéconomiques. Elles génèrent en particulier de l'emploi dans le secteur de l'industrie routière. Mais en contrepartie, elles peuvent créer de la congestion et nécessiter des déviations selon le mode de gestion de chantier impliquant une « sur-utilisation » véhiculaire : cela a un impact sur les secteurs économiques relatifs à l'utilisation des véhicules. Ensuite, la politique d'entretien d'une route va en déterminer son état de surface, variable à laquelle sont également sensibles les consommations véhiculaires en termes d'énergie de traction, de pneumatiques, et d'entretien général par exemple, consommations qui a

leur tour auront un impact macroéconomique. Réaliser un bilan macro-économique quantitatif de ces échanges peut être réalisé en mobilisant la méthode input-output, analyse macroéconomique basée sur des tables statistiques de comptabilités nationales qui permettent de dégager les liens économiques entre secteurs d'activité. Cette méthode permettra, à partir des consommations relatives à une politique d'entretien calculées pour chaque secteur industriel impacté, d'en quantifier le bilan sur l'emploi, les finances publiques et l'impact en termes de production en France.

2.3.2.3 Économie des transports et externalités sociales

La stratégie d'entretien des routes va également générer des impacts socioéconomiques pour l'utilisateur, le riverain, et l'environnement, selon la congestion créée pendant les phases de travaux et l'état surfacique routier dont dépend la performance du système routier. Ces externalités socioéconomiques, relatives aux critères de performance déjà cités pour ces trois parties prenantes, pourront pour la plupart être monétarisées par le biais de valeurs tutélaires, ou rester sous la forme de grandeurs physiques (e.g. temps perdu par type d'utilisateur). L'approche s'inspire de la méthode du calcul socioéconomique cadrée en France par l'Instruction relative aux méthodes d'évaluation économique des projets de transport en date du 16 juin 2014³⁵, elle-même s'adossant sur une approche microéconomique, soit à l'échelle de l'agent.

2.3.2.4 Analyse de Cycle de Vie et impacts environnementaux

Elle-même fondamentalement transdisciplinaire et souvent adossée à l'écologie industrielle ou au génie des procédés, l'ACV est une méthode qui sollicite de nombreuses disciplines afin de modéliser les chaînes de causalités entre consommations et émissions de substances (i.e. flux physiques) et impacts environnementaux. Parmi ces disciplines, citons entre autres les sciences du climat, la biologie, l'écologie, la toxicologie et l'épidémiologie, associées à des connaissances industrielles et économiques fortes. Nous mobiliserons cette méthode afin de quantifier les impacts environnementaux des stratégies de resurfacement. Nous couplerons aussi les émissions acoustiques routières à une approche novatrice d'évaluation environnementale de l'effet du bruit par ACV.

2.3.3 Périmètre

Nous restreignons la question de l'entretien routier aux *opérations de resurfacement* qui influencent fortement les textures et en partie l'uni routiers et représentent une part financière importante des opérations d'entretien des routes : environ 30% des dépenses tous réseaux confondus³⁶ (USIRF 2015).

Nous ne considérons pas l'impact des programmes de resurfacement sur la durée de la vie des chaussées, ni sur la sécurité des usagers (question de l'adhérence).

Nous étudions uniquement les *routes interurbaines* afin de s'affranchir des effets de congestion en réseau qui peuvent être très forts en milieu urbain lors des opérations d'entretien des routes (ce qu'il conviendrait de modéliser avec un modèle de simulation de trafic complexe, et qui ferait peut-être ressortir davantage de variabilité dans les résultats de l'application de la méthode d'évaluation développée) mais également de phénomènes de superposition d'effets non linéaires de tronçons routiers situés dans la même zone géographique (e.g. non-additivité des niveaux sonores en interurbain).

Nous nous concentrons sur le cas de la *France*, déjà largement hétérogène en termes de gestion routière entre autres, mais aussi de géométrie, cette dernière ayant un impact sur la gestion des travaux (alternat, déviation, basculement).

³⁵ <http://www.afitf.net/instruction-cadre-relative-aux-methodes-d-a51.html>

³⁶ Ce chiffre inclut néanmoins toutes les grosses réparations dont la mise hors-gel et le renforcement en plus du renouvellement des couches de surface

Nous analysons des *tronçons routiers homogènes*, bien qu'une approche en réseau se présente comme une bonne extension de ce travail de thèse dans une optique plus opérationnelle, particulièrement afin de tenir compte des contraintes budgétaires des gestionnaires.

2.4 Contribution

Le référentiel d'évaluation des politiques de maintenance routière construit ainsi que la méthode de quantification des impacts ont été restreints à l'entretien lourd, i.e. au renouvellement de surface.

2.4.1 Fonctions de la méthode d'évaluation

La méthode d'évaluation développée permet de comparer, sur une durée donnée à horizon potentiel de plusieurs décennies, plusieurs programmes d'entretien routier – en termes de fréquences de resurfaçage comme de techniques – avec des évolutions de trafic paramétrables. Elle sort une comparaison en radar des stratégies ainsi évaluées, un histogramme des gains de modification d'une stratégie par rapport à une référence, et des indicateurs de rentabilité. Ces résultats sont donnés sur trois indicateurs environnementaux – dommage aux ressources non renouvelables, à la biodiversité et à la santé humaine – deux indicateurs sociaux – temps passé et impact sanitaire du bruit – deux indicateurs macroéconomiques – production et emplois – et enfin 4 indicateurs financiers – coût pour le gestionnaire, les usagers, l'État (recettes fiscales) et la Nation. Ces 11 indicateurs représentent les intérêts de toutes les parties prenantes de l'entretien routier. Nous attirons l'attention sur le fait que ces indicateurs ne sont pas pondérés entre eux. En effet, leur importance relative ne pouvant être jugée objectivement puisqu'elle dépend de valeurs morales, nous laissons le choix d'une possible pondération aux décideurs, dans un but « démocratique ». De plus, soulignons que certains indicateurs intègrent les natures d'impacts d'une même cause physique sur plusieurs parties prenantes. Par exemple, la modulation de l'usure pneumatique et donc de la consommation afférente selon l'évolution de l'état de la route se traduit à la fois par des impacts environnementaux relatifs au cycle de vie du pneu, par des impacts économiques en termes d'emplois et de production dans l'industrie pneumatique et ses secteurs de consommations intermédiaires, ainsi que par des impacts financiers pour l'utilisateur.

2.4.2 Originalité

La méthode développée présente plusieurs forces et originalités. D'abord, elle propose d'importer dans la rationalisation des politiques d'entretien routier la prise en compte de l'action de la dégradation de surface de la chaussée sur les véhicules déjà effective dans certains pays, et qui pourrait être particulièrement adaptée face à cette situation de niveaux de dégradation de chaussée potentiellement inédits auxquels la France fait face. Pour cela, des lois d'évolution des surfaces routières sont proposées. Elle est en ce sens prospectiviste puisqu'elle vise à anticiper l'étendue potentielle des impacts sociétaux possibles du vieillissement de surface des réseaux français. Elle se veut équitable, dans la mesure où elle quantifie les impacts d'une stratégie de maintenance routière donnée sur les « parties prenantes d'ordre 1 et 2 » a minima plutôt que d'ordre 1 comme usuellement (constructeurs routiers, gestionnaires/financeurs) puis les transferts d'impacts générés par une stratégie alternative. Elle est la première méthode à coupler un ensemble de modèles d'évaluation adaptés au calcul quantifié des impacts de l'entretien routier sur cette large gamme de parties prenantes. Elle est autant adaptée aux tronçons à forts qu'à faibles trafics, et pourrait ainsi permettre de définir de grandes orientations en termes de maintenance selon des paramètres clés des routes étudiées, si suffisamment d'études de cas ou d'études de sensibilité étaient réalisées, à un contexte donné fixe. En bref, étudier comment la stratégie de gestion des couches de surfaces joue sur un bilan multi-acteur global apporte un éclairage nouveau. Proposer un calcul d'effets au-delà des pratiques classiques ainsi qu'un calcul de « l'équilibre » de certains impacts entre entretien et usage (e.g. impacts environnementaux, coûts financiers, etc.) constitue également un challenge

scientifique et un outil de réponse à une question d'intérêt public: quels seraient les impacts d'une modification des niveaux d'investissement en entretien en termes de durabilité ?

3 Plan

Chapitre 1 – Systémique de l'entretien routier

Le premier chapitre de la thèse consiste en une présentation du système de l'entretien routier. Elle définit ainsi ses sous-systèmes – l'infrastructure et les véhicules, leurs caractéristiques physiques principales, leurs dégradations, ses facteurs et ses modélisations. Cette partie s'attache également à expliquer le contexte particulier de la France. Cela inclut d'une part les différents types de réseaux, leur évolution dans le temps et la diversité de modes de gestion rattachés à ces divers réseaux, et d'autre part le parc routier français, ses consommations en énergie et son vieillissement. Quelques outils majeurs de gestion de l'entretien routier, internationaux ou français, sont présentés afin de faire ressortir le spectre d'évaluation des stratégies d'entretien routier modernes, domestiques ou internationales.

Chapitre 2 – Systémique des impacts du resurfaçage des chaussées

Le second chapitre s'attache à présenter une approche systémique, majoritairement qualitative, des impacts sociétaux déterminants du resurfaçage des routes. Pour cela, les chaînes de causalité des impacts de l'entretien routier sont étudiées selon trois strates représentatives complémentaires, faisant appel à des disciplines ou ensemble de disciplines différentes.

La première approche consiste en une étude du système sous l'angle de la géophysique terrestre : les chaînes de causalité sont étudiées sur la base de variables d'état en évolution du fait de l'entretien des routes, ces variables pouvant être des variables de stocks de ressources biotiques ou abiotiques, des variables climatiques, ou encore des variables acoustiques.

La seconde approche aborde la question du vivant, et les perturbations biologiques ou chimiques des milieux naturels – atmosphère, hydrosphère, lithosphère – liées à l'entretien des routes, à différentes échelles, et annonce quelques grandes tendances sur l'évolution de l'écosphère, tout en adressant les enjeux de la préservation de la biodiversité.

La troisième et dernière approche s'attaque à la strate socioéconomique, faisant appel à une réflexion à la fois philosophique, politique, économique et sociale : quel est le modèle institutionnel français aujourd'hui et ses valeurs ? Qu'est-ce que l'intérêt collectif et le bonheur individuel, et dans quelle mesure s'imbriquent-ils ? Selon le parti pris, quels sont les enjeux et donc notre définition de la performance socioéconomique de l'entretien des routes ?

Chapitre 3 – Indicateurs routiers d'état de surface et de performances : revue et questionnements

En décrivant, au chapitre précédent, d'un point de vue principalement qualitatif, les effets de l'état de surface des routes selon plusieurs conceptions de la réalité terrestre – géophysique, écologique et socioéconomique –, nous avons vu comment l'entretien des routes est impliqué dans le fonctionnement de ces systèmes, et comment il impacte la performance du transport routier. Ce chapitre 3 s'attache d'abord à présenter plus en détail les indicateurs existants en termes d'état de surface présentés au chapitre 1, à caractériser les valeurs classiques de ces indicateurs sur le réseau français, à interpréter leurs valeurs, l'évolution dans le temps de ces valeurs, et à étudier les liens entre l'Indice de Rugosité International (IRI) IRI et les Notes par Bande d'Onde (NBO). En effet, l'IRI n'étant pas utilisé en France contrairement aux NBO, un des objectifs est de permettre à un gestionnaire ne disposant que de données en NBO d'utiliser tout de même la méthode que nous développerons. Dans un second temps, puisque nous souhaitons évaluer la performance holistique

des programmes d'entretien des routes, nous recenserons les indicateurs de performance existants pour les infrastructures routières et particulièrement l'entretien quand ils existent, afin d'orienter la sélection ou le développement d'indicateurs spécifiques au chapitre 4. En conclusion, il met en évidence le besoin de recombinaison et compléter les méthodes et indicateurs existants pour développer une architecture de méthode d'évaluation globale sur la base des effets qualitatifs de l'entretien routier mis en évidence au chapitre 2.

Chapitre 4 – Méthode d'évaluation équitable et durable du resurfaçage

Sur cette base à la fois analytique et systémique, le chapitre 4 détaille la construction d'une méthode d'évaluation intégrée des stratégies d'entretien routier adaptée aux problématiques sociétales actuelles : architecture globale et calcul d'indicateurs partie prenante par partie prenante. Ce chapitre analyse les sous-modèles existants et les compare quand cela est nécessaire. Cela permet une sélection argumentée des sous-modèles dans l'état de l'art, ou une adaptation des sous-modèles existants, basée sur la constatation des spécificités françaises selon le cas.

Ces sous-modèles incluent des méthodes d'évaluation partielles rattachées à des caractéristiques de surface routière. Ainsi, un travail est également mené sur la caractérisation de surface routière et les lois d'évolution.

Le fonctionnement global de la méthode proposée est donc clairement présenté, ainsi que les indicateurs de sortie du modèle. Nous choisissons de ne proposer aucune pondération entre indicateurs, ce travail restant à la discrétion du décideur puisqu'il est fortement moral, donc rattaché à un système de valeur par essence subjectif.

Chapitre 5 – Construction de données environnementales spécifiques

Le calcul des indicateurs environnementaux précédemment sélectionnés nécessite des données spécifiques à l'utilisation de notre méthode dans le cas français. Ce chapitre s'attache à les construire. Il s'agit d'Inventaires de Cycle de Vie (ICV), données environnementales nécessaires à l'évaluation par ACV des trois indicateurs de dommage à l'environnement. Après revue de littérature approfondie et comparaison des ICV existants, nous proposons les ICV routiers et véhiculaires à utiliser dans la méthode. Dans le cas des produits de resurfaçage, un certain nombre d'ICV étaient préexistants, mais datés ou peu adaptés au contexte technologique de la France. Ce travail a permis une contextualisation des ICV de resurfaçage. Dans le cas des consommations de pièces d'usure véhiculaires, quelques ICV existaient pour certaines catégories de pneumatiques tandis que nous n'avons trouvé trace d'aucune donnée environnementale concernant le cycle de vie des pièces d'usure des suspensions. Nous avons construit des ICV les plus adaptés possibles à la réalité du cycle de vie de ces produits sur le marché actuel français.

Chapitre 6 – Étude de cas : programmes de resurfaçage d'un tronçon autoroutier

Ce dernier chapitre fait la démonstration de l'applicabilité de la méthode ainsi développée sur un tronçon autoroutier français de 10 km et 10 000 véhicules par jour et par sens (2x2 voies). Il étudie les impacts de 5 scénarii d'investissement en resurfaçage routier sur une durée de vie de chaussée de 39 ans. L'augmentation de l'investissement en entretien a un effet positif sur la majorité des 11 indicateurs de la méthode d'évaluation. Plus précisément, nous observons un comportement inverse de deux groupes d'indicateurs par rapport au sens d'évolution de l'investissement en entretien des routes, comparé au niveau d'investissement actuel : corrélation positive entre investissement et sept types de gains – macroéconomiques, environnementaux, et sociaux – et corrélation négative pour les 4 autres types de gains : recettes fiscales, économies pour le gestionnaire, économie globale pour la société, et temps gagné par l'utilisateur. Dans l'étude de base, chaque euro supplémentaire investi en entretien permet d'économiser environ entre 2 et 3.5 euros pour les usagers, tandis que dans le

scénario de réduction de l'investissement en resurfacement, 1€ économisé par le gestionnaire coûte 5.4 € aux usagers. En termes de « rentabilité humaine » marginale, une augmentation d'un euro de l'investissement en entretien permet d'économiser en vie humaine entre 420 et 710 euros. Dans le cas d'une diminution par deux de l'investissement, 1€ économisé par le gestionnaire coûte 1100 € en vies humaines. Ces deux types de rentabilité permettent de mettre en évidence une sorte d'optimum monocritère de la durée entre deux resurfacement.

La question de la robustesse de la méthode proposée est également abordée. À ce titre, quelques analyses de sensibilité ont été réalisées : sur le niveau de trafic, la vitesse de dégradation de la route, et la technique de resurfacement choisie. Les gains environnementaux et financiers pour les usagers sont à peu près proportionnels au niveau de trafic et à la vitesse de dégradation de la surface routière. En revanche, le type de revêtement choisi pour resurfacer la route n'est pas un levier environnemental si l'on ne considère pas de vitesses de dégradation associées spécifiques. Quatre types de gains sont en revanche fortement sensibles à la technique utilisée : les deux gains macroéconomiques, l'économie globale et le gain pour le gestionnaire.

4 Bibliographie

Abdo, Joseph. 2011. « Analyse du cycle de vie de structures routières ». T89. Collection Technique CimBéton - BÉTON ET DÉVELOPPEMENT DURABLE. CIMBETON. <http://www.infociments.fr/publications/route/collection-technique-cimbeton/ct-t89>.

Annema, Jan Anne, Koen Frenken, Carl Koopmans, et Maarten Kroesen. 2016. « Relating Cost-Benefit Analysis Results with Transport Project Decisions in the Netherlands ». *Letters in Spatial and Resource Sciences*, juillet. <https://doi.org/10.1007/s12076-016-0175-5>.

Bennett. 1996. « The HDM-4 road user effects model ». University of Birmingham. http://www.lpcb.org/index.php/component/docman/doc_view/430-1996-workshop-on-road-user-effects?Itemid=.

Bihouix, Philippe. 2014. *L'âge des low tech: vers une civilisation techniquement soutenable*. Anthropocène Seuil. Paris: Éditions du Seuil.

Cavaillès, Henri. 1946. *Ma route française - son histoire, sa fonction - Etude de géographie humaine*. Librairie Armand Colin.

Chatti, Karim, et Imen Zaabar. 2012. *Estimating the effects of pavement condition on vehicle operating costs*. NCHRP report 720. Washington, D.C: Transportation Research Board. http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/nchrp_rpt_720.pdf.

Commission mondiale sur l'environnement et le développement de l'Organisation des Nations unies, présidée par Gro Harlem Brundtland. 1987. « Rapport Brundtland ». http://www.diplomatie.gouv.fr/sites/odyssee-developpement-durable/files/5/rapport_brundtland.pdf.

Conseil Economique, Social et Environnemental. 2009. « Infrastructures et développement durable des territoires : un autre regard - une nouvelle vision ». Année 2009 n°23. Avis et Rapports du Conseil Economique, Social et Environnemental. <http://www.cgpme.fr/upload/docs/TardyDaniel.pdf>.

- CoTITA Est - IDRRIM - USIRF. 2016. « GEPUR : Gestion et Entretien du Patrimoine Urbain et Routier - Méthodes, outils et techniques ». Volet n°1 : Routes Interurbaines et traverses d'agglomérations. http://www.fnpt.fr/upload/docs/application/pdf/2016-09/guide_gepur_juin_2016.pdf.
- De Bortoli, Anne. 2015. « Assessing environmental impacts of road projects : the recent development of specialized eco-comparators in France ». In *Proceedings of the XXVth World Road Congress*. Seoul, North Korea: World Road Association.
- Desportes, Marc, et Antoine Picon. 1997. *De l'espace au territoire: l'aménagement en France XVIe - XXe siècles*. Paris: Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées.
- DGITM. 2014a. « Nouveau référentiel d'évaluation des projets de transport ». DGITM.
- . 2014b. « Politique pour l'entretien des chaussées du réseau routier national non concédé ». Volume 2-Rapport sur les simulations budgétaires.
- Dupuy, Gabriel. 1995. *Les territoires de l'automobile*. Collection Villes. Paris: Anthropos : Diffusion Economica.
- Eliasson, Jonas, Maria Börjesson, James Odeck, et Morten Welde. 2014. « Does benefit/cost-efficiency influence transport investment decisions? » *Working papers in Transport Economics*, avril. https://ideas.repec.org/p/hhs/ctswps/2014_006.html.
- Faburel, Guillaume. 2008. « Les inégalités environnementales comme inégalités de moyens des habitants et des acteurs territoriaux - Pour que l'environnement soit un facteur réel de cohésion urbaine ». *Espace Populations Sociétés*, n° 2008/1 : Populations, vulnérabilités et inégalités écologiques: 111-26.
- Fayard, Alain, Francesco Gaeta, et Emile Quinet. 2005. « French Motorways: Experience and Assessment ». *Research in Transportation Economics* 15 (janvier): 93-105. [https://doi.org/10.1016/S0739-8859\(05\)15008-2](https://doi.org/10.1016/S0739-8859(05)15008-2).
- FHWA. 1998. « FHWA National Strategic Plan ». Washington, DC.
- Guillerme, A. 1984. *Corps à corps sur la route. Les routes, les chemins et l'organisation des services au XIXeme siècle*. Paris: Presses de l'ENPC.
- Heggie, et Vickers. 1998. « Commercial Management and Financing of Roads ». World Bank. http://siteresources.worldbank.org/INTROADSHIGHWAYS/Resources/338993-1115316562809/10-poor_rd_maint.pdf.
- Hubert, Jean-Paul, Pierre Pistre, et Jean-Loup Madre. 2016. « L'utilisation de l'automobile par les ménages dans les territoires peu denses : analyse croisée par les enquêtes sur la mobilité et le Recensement de la population », *ÉCONOMIE ET STATISTIQUE*, , n° N° 483-484-485: 26p.
- Jouffe, Yves, David Caubel, Sylvie Fol, et Benjamin Motte-Baumvol. 2015. « Faire Face Aux Inégalités de Mobilité: Tactiques, Stratégies et Projets Des Ménages Pauvres En Périphérie Parisienne ». *Cybergeo*, janvier. <https://doi.org/10.4000/cybergeo.26697>.
- Kerali, Odoki, et Stannard. 2006. *HDM-4 - Vue d'ensemble de HMD-4 (Version 2)*. Vol. 1. AIPCR - Banque Mondiale. http://www.hdmglobal.com/esp/hdm4v2_downloadGSPDF.asp?File=HDM4Version2_Vol1_Fra_wbversion.pdf.

LCPC-Sétra, France. 1994. *Conception et dimensionnement des structures de chaussée*. Paris; Bagnaux: LCPC ; SETRA.

Le Corbusier. 1935. *La ville radieuse*. Edition de l'architecture d'aujourd'hui.

Meadows, Donella H., et Club of Rome, éd. 1972. *The Limits to growth; a report for the Club of Rome's project on the predicament of mankind*. New York: Universe Books.

MEDDE. 2014. « Chiffres clés du transport - Edition 2014 ». http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/fileadmin/documents/Produits_editoriaux/Publications/Reperes/2014/reperes-chiffres-cles-transport-ed2014-v2.pdf.

OCDE. 1998. « Technical report - Dynamic interaction between vehicles and infrastructure experiment (Divine) ». <http://www.oecd.org/sti/transport/roadtransportresearch/2754406.pdf>.

Quinet, E, et al. 2013. « L'évaluation socioéconomique des investissements publics - Rapport final ». Tome 1.

Saintillan, Christophe. 2013. « Refonte de la politique d'entretien en France ». présenté à conférence-débat du Conseil, Rome (Italie), novembre 7. <http://www.piarc.org/fr/2013-11-07,20756.htm>.

Sen, Amartya. 1985. *Commodities and capabilities*. Professor Dr. P. Hennisman lectures in economics, v. 7. Amsterdam ; New York : New York, N.Y., U.S.A: North-Holland ; Sole distributors for the U.S.A. and Canada, Elsevier Science Pub. Co.

UNFCCC. 2016. « Rapport de la Conférence des Parties sur sa vingt et unième session, tenue à Paris du 30 novembre au 13 décembre 2015 ». <http://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/fr/10a01f.pdf>.

URF. 2016. « Faits & chiffres 2016 - Statistiques des transports en France et en Europe ». http://www.unionroutiere.fr/wp-content/uploads/2016/11/FAITS-CHIFFRES-2016_Basse-def.pdf.

USIRF. 2015. « La dépense de gestion, d'entretien et d'investissement routier en France : Quelles réalités derrière les chiffres globaux et leurs évolutions pour les Travaux Publics ? - Etude sur neuf départements tests ». <http://www.usirf.com/wp-content/uploads/USIRF-Rapport-d%C3%A9tude-sur-la-d%C3%A9pense-de-gestion-d'entretien-et-d'investissement-routier-en-France-30.10.2015.pdf>.

———. 2017. « L'état de la route 2016 ». USIRF. http://www.usirf.com/wp-content/uploads/USIRF_EDLR2016_BD.pdf.

Visse, Pierre-Edouard. 2013. « Évolution du budget automobile des ménages français depuis 1990 ». 14. DGCCRF éco. DGCCRF. http://www.economie.gouv.fr/files/directions_services/dgccrf/documentation/dgccrf_eco/dgccrf_eco14.pdf.

Watanatada, Harral, Paterson, Dhareshwar, Bhandari, et Tsunokawa. 1987. *The HDM standards model – Description of the HDM-III Model*. Vol. 1. The highway design and maintenance standards series 9951. The Johns Hopkins University Press. http://www.worldbank.org/transport/roads/rd_tools/hdm-iii%20_vol-1.pdf.

Zaabar, Imen, et Karim Chatti. 2012. « Impact of road roughness features on damage to transported goods ». In . Stockholm, Sweden. <https://trid.trb.org/view.aspx?id=1366970>.

CHAPITRE 1 – Systémique de l’entretien routier

Le premier chapitre de cette thèse présente les enjeux de maintenance routière responsable et durable, en détaillant techniquement les impacts de la chaussée sur la performance du transport routier. Il consiste dans un premier temps en une analyse technique du transport routier français sous-système par sous-système – les sous-systèmes considérés étant l’infrastructure, les véhicules, et enfin l’exploitation – et en l’étude des interactions déterminant le fonctionnement global du système de transport. Il se focalise notamment sur les mécanismes de dégradation des deux premiers sous-systèmes. Il est important de noter que les connaissances techniques proviennent massivement d’une littérature « grise » – notamment de rapports techniques, présentations, et échanges informels avec le Réseau Scientifique et Technique³⁷ (RST) du Ministère en charge des transports. En effet, pour l’infrastructure, bien qu’elles s’appuient sur des sciences dures éprouvées comme la mécanique ou la chimie organique et minérale, les techniques routières ne sont pas des sciences exactes, notamment du fait du grand nombre de paramètres qu’il faudrait pouvoir mettre en équation pour expliquer de manière significative les phénomènes relatifs aux chaussées par exemple. De plus, ces lois étant utilisées sur un temps long – le dimensionnement d’une chaussée est souvent fait pour 30 ans, il y aurait de fortes incertitudes sur les paramètres dimensionnants, par exemple la météorologie, en lien avec le climat qui semble se dérégler de manière différentielle avec forçage climatique d’origine anthropique.

³⁷ Le RST est un réseau d’organismes d’expertise et de recherche opérationnelle intervenant dans les champs de compétences de l’aménagement et du développement durables. Il a été très actif en France dans le secteur routier, particulièrement avant la loi de Décentralisation. Il est aujourd’hui constitué d’une trentaine d’organismes - établissements publics et services du MEDDE et du METL – qui représentent plus de 30 000 chercheurs, experts, ingénieurs, techniciens et personnels administratifs. Parmi eux, on citera en 2018 : l’ENPC, l’IFSTTAR, le CEREMA, l’ENTPE, l’ADEME, l’Ecole Centrale de Nantes, l’EPSF, et Météo-France.

Table des matières

1	Introduction à la systémique et l'approche intégratrice.....	45
1.1	Systémique : origines et principe	45
1.2	Vers une approche intégratrice.....	45
1.3	Application au système de transport routier	46
1.3.1	Cartographie simplifiée des acteurs de production du transport routier en France	46
1.3.2	La systémique : un prérequis à l'évaluation des systèmes complexes	46
1.4	Focus sur la maintenance routière.....	47
1.4.1	La maintenance routière : opération d'un système complexe	47
1.4.2	Interactions intra-systèmes et facteurs d'influence.....	48
1.4.3	Dynamique de l'entretien routier	48
2	Infrastructures routières	50
2.1	Caractéristiques fonctionnelles fondamentales	50
2.1.1	Fonctions pour l'utilisateur	50
2.1.2	Fonctions pour le territoire	52
2.2	Éléments structuraux	54
2.2.1	Éléments d'une route et terminologie	54
2.2.2	Structure multicouche.....	55
2.2.3	Corps de chaussée.....	55
2.3	Techniques routières.....	56
2.3.1	Matériaux de chaussées	56
2.3.2	Familles de chaussées	56
2.3.3	Exemple du réseau national.....	56
2.4	Conception des chaussées	56
2.4.1	Modèle de dimensionnement	57
2.4.2	Guides techniques	57
2.4.3	Protocole de dimensionnement.....	57
2.5	Géométrie de surface.....	58
2.5.1	Paramètres	58
2.5.2	Segmentations de longueur d'onde : uni, mégatexture, macrotexture, microtexture	58
2.5.3	Indicateurs d'état de surface.....	59
2.6	Conclusion	60
3	Maintenance des infrastructures routières	60
3.1	Complexité de la maintenance.....	60

3.1.1	Terminologie.....	60
3.1.2	Enquête sur le resurfaçage routier en France.....	61
3.2	Détérioration des chaussées	62
3.2.1	Types de dégradations	62
3.2.2	Facteurs d'usure	63
3.2.3	Modélisation prédictive des dégradations.....	65
3.3	Techniques de maintenance	68
3.3.1	Entretien des revêtements.....	68
3.3.2	Système de production des matériaux.....	70
3.3.3	Coûts des techniques	71
3.3.4	Mode opératoire	74
3.4	Pratiques opérationnelles de la maintenance	76
3.4.1	RRN non concédé	76
3.4.2	RRN concédé	79
3.4.3	Réseau départemental	79
3.4.4	Réseau communal	80
3.5	Outils d'aide à l'entretien routier.....	80
3.5.1	Outils de gestion patrimoniale routière	80
3.5.2	Outils globaux.....	81
4	Véhicules routiers.....	82
4.1	Parc français	82
4.1.1	Typologies.....	82
4.1.2	Inventaires et projections.....	83
4.2	Usure des véhicules.....	84
4.2.1	Pneumatiques.....	84
4.2.2	Usure des pièces détachées (Odoki et Kerali 2000)	88
4.3	Consommations énergétiques et émissions	89
4.3.1	Déterminants de la consommation.....	90
4.3.2	Éléments quantitatifs de la consommation	93
4.3.3	Émissions	95
4.3.4	Modèles de consommation et d'émission	95
4.4	Bruit du trafic routier	98
4.4.1	Sources de bruit.....	98
4.4.2	Facteurs de bruit	98
4.4.3	Modélisation des émissions sonores.....	99

5	Conclusion	100
6	Bibliographie.....	101

1 Introduction à la systémique et l'approche intégratrice

1.1 Systémique : origines et principe

L'approche systémique a été théorisée par le biologiste L. Von Bertalanffy dès 1937 avec son concept de système ouvert, et a abouti durant la seconde moitié du XX^{ème} siècle à son ouvrage de référence *General System Theory* (Bertalanffy et Chabrol 1973). Cette théorie s'accorde à analyser un système (Figure 1) – boîte noire qui transforme des variables d'entrées en variables de sortie – dans son environnement, en prenant en compte non seulement l'objet mais tout le système auquel il appartient, considérant que l'ensemble des propriétés individuelles de sous-systèmes est différent des propriétés du système global qu'ils constituent, du fait des interactions et relations entre sous-systèmes plongés dans leur environnement. Les phénomènes de rétroaction, découverts notamment au travers du croisement des travaux de Wiener et Rosenblueth, est une notion centrale en approche systémique : il correspond à des effets des variables de sorties sur les variables d'entrée.

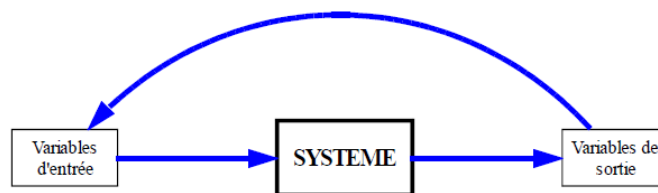


Figure 1 Principe de système

L'approche systémique s'oppose à l'approche analytique qui isole les éléments, considère la nature des interactions mais pas leurs effets, et modifie une variable à la fois plutôt que des groupes de variables simultanément. En systémique, les modèles peuvent être insuffisamment rigoureux pour servir de base aux connaissances, mais utilisés en revanche dans la décision et l'action. C'est une approche efficace lorsque les interactions sont non linéaires et fortes (de Rosnay 1975).

On peut considérer que la dynamique des systèmes fait partie de la théorie systémique. Elle s'attache à comprendre le comportement d'un système complexe via des équations d'état et permet de montrer les impacts sur le système de la modification de la valeur d'un paramètre.

1.2 Vers une approche intégratrice

Approche plus récente que la systémique, elle l'englobe pour y adjoindre une vision spécialisée et proactive (Prades 1995). L'approche spécialisée se concentre sur l'examen du « système-acteurs », i.e. « l'ensemble des forces anthropiques (sociales) qui sont en rapport avec l'origine des situations qui font problème, ainsi qu'avec la possibilité de trouver des solutions idéales ou réelles » (Prades 1995). L'approche proactive réside en le fait qu'elle ne se contente pas d'un diagnostic, mais permet de simuler l'évolution du système dans la recherche de « collaborations effectives entre les différents participants de ce système-acteurs » (Prades 1995). Elle nécessite une approche interdisciplinaire du fait de « la prodigieuse multidimensionnalité du réel », et une approche intersectorielle³⁸ permettant la collaboration des parties prenantes vers la résolution des problèmes (Prades 1995). Finalement, selon Prades (1995), l'approche intégratrice s'impose de manière évidente pour traiter un problème selon une perspective éthique, et ce aux plans théoriques comme pratiques.

Nous proposons d'adopter une méthodologie systémique intégratrice pour étudier le transport routier, puis la maintenance routière, afin de définir un premier cadre d'analyse.

³⁸ Entre le secteur public (« gouvernement des différentes unités nationales, régionales et locales »), les organisations non gouvernementales (syndicales, culturelles, environnementales, etc.), les experts indépendants (centres et équipes de recherche) et le secteur privé (entreprises et organisations commerciales, industrielles et financières).

1.3 Application au système de transport routier

Le système routier se compose de trois éléments essentiels : un réseau d'infrastructures, sur lequel des usagers à bord de véhicules se déplacent, et peuvent également transporter des objets (marchandises ou biens personnels). Ces trois sous-entités sont en interactions fortes entre elles, au sein d'un système d'acteurs.

1.3.1 Cartographie simplifiée des acteurs de production du transport routier en France

Le transport routier ne constitue pas qu'un système technique : sa production et son évolution dépendent de nombreux acteurs. Comprendre la production d'un système tel que le transport routier, déterminer ses contraintes et ses leviers d'amélioration, nécessitent d'en étudier les acteurs principaux : la Figure 2 propose une cartographie simplifiée du système de production du transport routier en France. Ceci montre comment les améliorations sont aujourd'hui effectuées en silo, avec d'un côté les acteurs agissant sur les infrastructures routières, de l'autre ceux influant sur les véhicules, et à l'interface les acteurs qui déterminent le trafic. Côté infrastructures, nous trouvons le système de décision public vertical avec des collectivités publiques sous l'égide de prescripteurs publics, clientes d'infrastructures de transport voire parfois de systèmes complets dans le cas des transports publics. Elles passent des commandes, régies par le code du marché public, à une maîtrise d'ouvrage qui conçoit le projet – parfois aidée d'une assistance à maîtrise d'ouvrage – et qui va gérer la production du système des constructeurs (maîtrise d'œuvre). Ces constructeurs peuvent sous-traiter une partie de leurs tâches à des prestataires. Le gestionnaire des infrastructures peut être public ou privé, et se charge de l'exploitation. Il est rare que concepteur ou constructeur gèrent l'entretien des infrastructures. Les véhicules sont produits à la fois en adéquations aux normes fixées aux niveaux européen (normes Euro) et national, et en réponse à la demande. À l'interface, des acteurs se chargent du bon fonctionnement de l'exploitation, avec les acteurs de contrôle (forces de l'ordre) et de l'information voyageur. Côté organismes publics, on peut citer le Centre National d'Information Routière (CNIR) ou Centre Régional d'Information et de Coordination Routières (CRICR), et les radios trafic. Côté privé, on retrouve par exemple les systèmes collaboratifs types Waze.

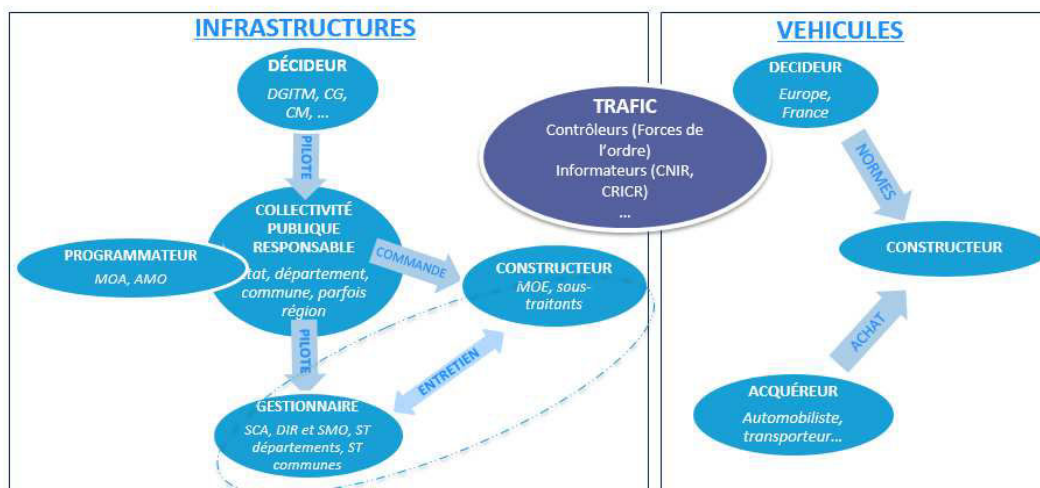


Figure 2 Cartographie simplifiée des principaux acteurs de production du transport routier

1.3.2 La systémique : un prérequis à l'évaluation des systèmes complexes

1.3.2.1 Pourquoi évaluer

Un processus d'évaluation a pour objectif de mesurer, quantifier (par méthodes statistiques) et/ou caractériser une situation, une entité, un résultat ou une performance. Cette démarche nécessite le recours à diverses méthodes et outils, et un référentiel, i.e. un ensemble de données permettant de décrire un système et par rapport auquel l'on peut l'évaluer.

L’évaluation de projets permet d’effectuer un choix appuyé sur des valeurs entre plusieurs variantes. Un référentiel d’évaluation de l’entretien des routes, associé à une méthode, composent un outil qui permet de comparer plusieurs stratégies d’entretien afin de choisir de manière rationnelle une solution répondant à certains objectifs jugés prioritaires par les donneurs d’ordres.

1.3.2.2 L’évaluation des transports routiers en France

Voilà plus d’un demi-siècle que la France évalue ses projets de transport avant leur mise en œuvre, afin d’en vérifier la performance, la rentabilité et l’efficacité (Quinet et al. 2013). Le système routier peut être l’objet de plusieurs types d’évaluations. Ces évaluations peuvent être à caractère environnemental, social, ou économique, ou encore à caractères mixtes, mais il n’existe pas de méthode d’évaluation du transport intégré multicritère et holistique (Tableau 1). Elles concernent souvent séparément l’infrastructure – analyse socio-économique justifiant un projet, étude d’impact environnemental, évaluation patrimoniale (investissement) – et le véhicule – évaluation de la consommation motivée par l’impact commercial, évaluation des émissions rendues obligatoires par les normes Euros, plus récemment évaluation environnementale globale par Analyse de Cycle de Vie. Elles portent également parfois sur la mobilité ou l’organisation des déplacements (Plans de Déplacements Urbains et leur évaluation décennale).

Tableau 1 Outils d’évaluation des composantes du transport routier selon les trois piliers du développement durable

		PROJET DE TRANSPORT					Plans de déplacements urbains et leurs évaluations
		Véhicule		Infrastructure		Déplacements	
		Construction	Exploitation	Construction	Exploitation		
	Social	Analyse de cycle de vie sociale (ACVs)					
				Analyse socio-économique			
		GMAO					
	Économie	Outils divers de gestion de budgets					
		Analyse des coûts en cycle de vie (ACCV)					
				Eco-comparateur Variways			
	Environnement	Études constructeur		Normes Euros Bonus-Malus Ingénierie-système	Eco-comparateurs routier type SEVE et ECORCE		
		Étude d’impacts environnementale					
		Analyse de Cycle de Vie environnementale (ACVe)					

GMAO = Gestion de la Maintenance Assistée par Ordinateur

Une fois réunis, ces périmètres standards d’évaluation du système routier dressent un tableau relativement général des impacts environnementaux et sociaux de ce système. Cependant, une évaluation multicritère intégrée du système routier est rarement adoptée. À titre d’exemple, les ACV d’infrastructures routières n’incluent quasiment jamais les impacts de la phase d’exploitation dans leur bilan (Santero, Masanet, et Horvath 2011a), malgré l’impact majeur que cette phase pourrait avoir (T. Wang, Lee, Kendall, et al. 2012; De Bortoli 2014).

Le caractère multicritère d’un outil d’évaluation est primordial afin d’éviter les transferts d’impacts (Jolliet, Saadé, et Crettaz 2005), soit une amélioration de certaines caractéristiques de l’objet évalué générant la dégradation inattendue d’autres caractéristiques.

1.4 Focus sur la maintenance routière

L’analyse systémique est particulièrement adaptée à l’étude préliminaire d’un système complexe plongé dans un environnement avec lequel il est en forte interaction, dans le but final de le comprendre pour en améliorer son fonctionnement.

1.4.1 La maintenance routière : opération d’un système complexe

Comme nous le montrerons au cours des prochains chapitres, la maintenance routière est une succession d’opérations organisées en vue d’atteindre un but donné sur un système complexe au sens

de la définition de Cluzel et al. (2012). Ce système, dans son périmètre le plus restreint, est constitué d'une infrastructure et de véhicules l'utilisant. Mais il irradie à large échelle : la France entière est maillée de routes qui nécessitent d'être entretenues, et dont les matériaux, engins, et mains d'œuvre nécessaires à la maintenance proviennent de diverses zones géographiques. Les véhicules routiers dépassent le parc statique français, et sont constitués d'éléments aux caractéristiques variées : gabarit, masse, technologie de traction, performance énergétique, fonction.... Le cycle de vie de ses sous-systèmes est difficilement prédictible sur le long terme au moment de la conception, notamment côté route : malgré certaines bases statistiques, on ne sait pas prévoir avec assurance le moment auquel le niveau de dégradation de chaussée va nécessiter une opération d'entretien. Par rapport au cycle de vie total de l'infrastructure, on utilise un risque de calcul qui correspond à la probabilité de ruine de l'ouvrage avant l'écoulement de la durée de vie utilisée dans le processus de dimensionnement. Mais l'on manque de recul pour estimer la durée de vie réelle des infrastructures, les routes modernes les plus anciennes n'ayant pas 100 ans, sans parler des impacts probables du changement climatique sur la stabilité des comportements.

De plus, il existe différentes durées de vie selon les éléments considérés. Concernant l'infrastructure, la couche de roulement est refaite régulièrement, tous les 5 à 30 ans, tandis que la plateforme de chaussée peut survivre à la ruine du corps de chaussée qui apparaît à l'issue de quelques dizaines d'années après la construction. Les véhicules routiers contiennent une partie d'éléments « consommables » plus ou moins rapidement tels que les pneumatiques, éléments de suspension, freins, filtres et autres. Les durées de vie sont en interaction étroite avec l'environnement de l'infrastructure. Pour la route, elles dépendent par exemple des conditions hydrologiques et thermiques, mais également en partie des caractéristiques géotechniques.

Enfin, la gestion des infrastructures, et en particulier la maintenance des routes, est gérée par décision humaine via les établissements publics ou privés qui en ont la charge.

L'entretien routier consistant en une opération sur un système complexe, son évaluation est de ce fait délicate à effectuer, et nécessite donc une étude préalable fine de ses dimensions techniques, économiques, sociales, écologiques et politiques par approche systémique.

1.4.2 Interactions intra-systèmes et facteurs d'influence

1.4.3 Dynamique de l'entretien routier

La question de l'entretien routier n'est pas statique. Nous proposons maintenant une approche mettant davantage en évidence la dynamique du système de l'entretien routier, et qualifiant les liens intra-système. De manière très simplifiée, l'état d'une route va dépendre du trafic réel qu'elle supporte et des contraintes environnementales, qui provoquent des dégradations structurelles et/ou surfaciques, mais aussi des opérations de maintenance qu'elle subit et qui traitent totalement ou partiellement ces dégradations, ou qui préviennent l'apparition de dommages.

La Figure 3 représente un schéma analytique du système concerné par la maintenance routière et des facteurs importants qui influencent son bilan de durabilité. Il met en évidence les liens – causalité, interactions – qui se jouent au sein du triptyque {infrastructure, véhicule, usager} composant le système routier, au travers des opérations dynamiques le concernant, qu'il s'agisse du trafic routier lui-même pouvant être considéré à plusieurs échelles spatiotemporelles, des accidents routiers, ou encore des opérations de maintenance des routes, des véhicules, ou de la circulation.

Ce schéma souligne que les conditions des infrastructures et des véhicules sont interdépendantes, mais qu'elles sont également conditionnées par d'autres éléments tels que l'utilisateur ou l'environnement de l'infrastructure. Il met en évidence (en bleu) les dépendances positives et négatives principales à la fois entre les facteurs de dégradation des infrastructures et des véhicules qui les utilisent, et entre les caractéristiques des sous-systèmes de transport routier et la performance globale du système.

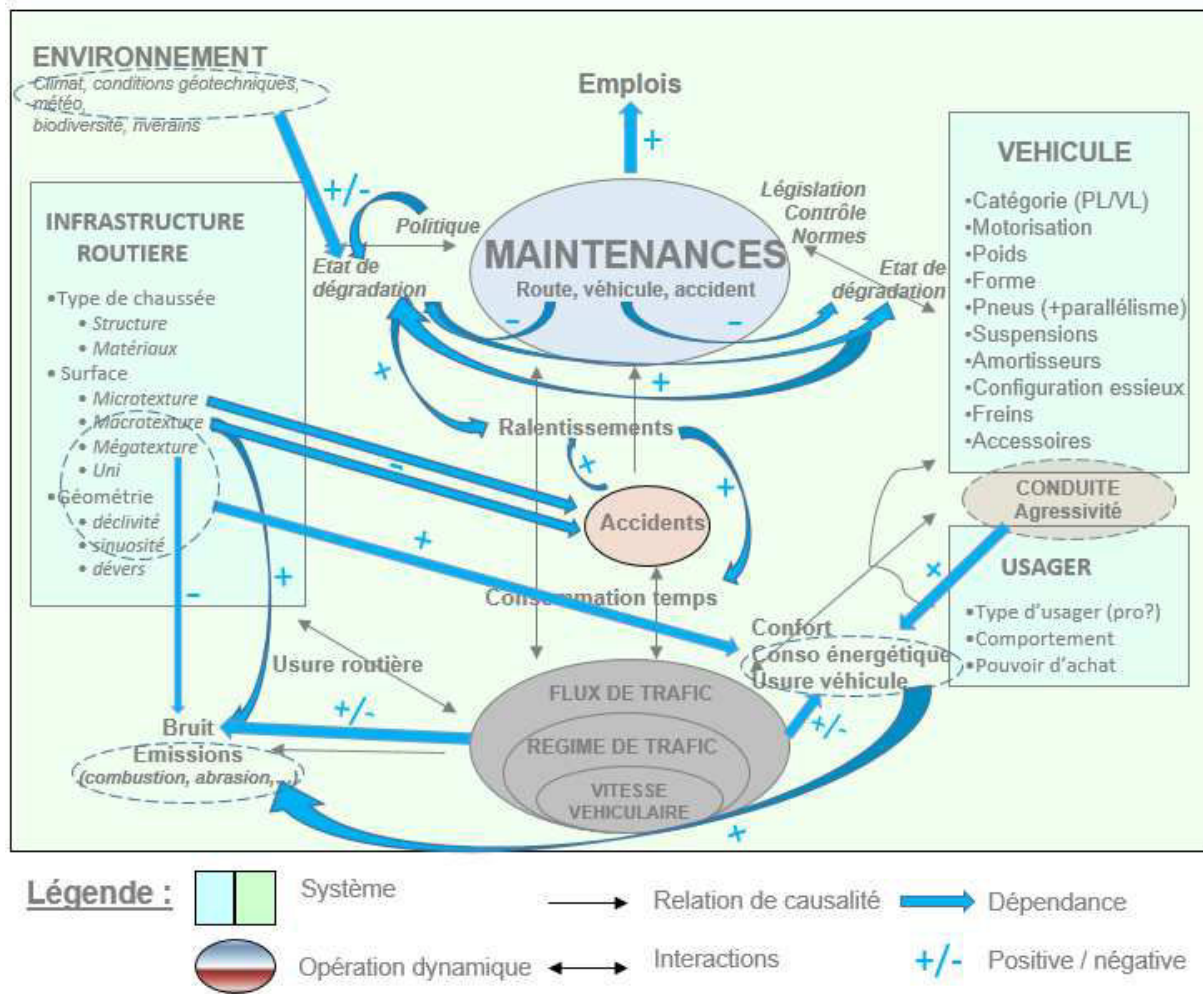


Figure 3 Dynamiques de l'état de dégradation des infrastructures et des véhicules, et des caractéristiques des trois sous-systèmes routiers sur les impacts routiers

Sans détailler entièrement ce schéma, nous en donnons une indication de lecture à travers quelques exemples : il renseigne que lorsque l'état de dégradation d'une route augmente (c'est-à-dire lorsque les dégradations croissent), cela crée des ralentissements qui provoquent des pertes de temps pour les usagers. De plus, des variables environnementales liées au climat, aux conditions géotechniques et à la météo ont également des effets sur l'état de la route, tout comme la politique de maintenance routière, mais ces dépendances ne sont pas détaillées plus précisément : elles le seront davantage par la suite. Enfin, plus une route est dégradée, plus les véhicules y circulant se dégradent, et inversement plus les véhicules sont dégradés, plus ils sont susceptibles de dégrader l'infrastructure support : l'effet est particulièrement notable pour les poids lourds, concernant leur système de suspension par exemple, ce que nous expliquerons plus tard dans ce chapitre.

Nous voyons bien dans ces schémas de conceptualisation que l'appréhension précise de la maintenance routière et de ses implications nécessite une étude complète du système routier. L'entretien routier est inclus dans un système complexe. Or, la simplification du compliqué appliqué au complexe a pour conséquence une aggravation de la complexité selon Le Moigne (1984), père français de la systémique. Il est donc nécessaire de connaître « suffisamment » les différentes facettes de ce système et leur fonctionnement.

Pour cela, nous proposons un état de l'art technique détaillant les infrastructures et véhicules routiers, qui justifiera les schémas présentés dans cette introduction à la problématique du sujet, et qui permettra d'aborder dans toute leur complexité les enjeux sociétaux de la maintenance routière.

2 Infrastructures routières

Une infrastructure est un ensemble d'ouvrages constituant la fondation et l'implantation sur le sol d'une construction ou d'un ensemble d'installations (Larousse). Une infrastructure routière est l'ensemble des ouvrages, linéaires (i.e. sections courantes dont dépendances) et ponctuels (i.e. ouvrages d'art tels que ponts, tunnels, mais également structures de recharge énergétique (stations-services ou bornes électriques...), aires de services, signalisation, etc.) qui permettent le roulement de véhicules de transports adaptés. Dans ce chapitre sont détaillés les aspects à la fois techniques et organisationnels liés aux infrastructures routières.

2.1 Caractéristiques fonctionnelles fondamentales

2.1.1 Fonctions pour l'utilisateur

Une route permet le franchissement de l'espace à bord de véhicules. Elle doit donc être adaptée au trafic et au niveau de service recherché par le Maître d'Ouvrage, tout en assurant un maximum de sécurité. Elle doit en particulier permettre au véhicule de s'arrêter avant de percuter un éventuel obstacle en assurant autant que faire se peut une visibilité supérieure ou égale à la distance nécessaire à l'arrêt du véhicule.

2.1.1.1 Conception géométrique

Aujourd'hui, trois familles d'éléments « macro-géométriques » sont pris en compte dans la détermination de l'emplacement d'une nouvelle route, car ils sont réglementés : le tracé en plan (route vue du ciel), le profil en long (coupe longitudinale : pentes et rampes) et le profil en travers (dévers, coupe transversale). Afin d'aménager au mieux son réseau routier, l'État a établi plusieurs types d'instructions techniques : pour la conception générale des routes (type de route, catégorie, nombre de voies, phasages), les règles de visibilité (d'où découlent des règles pour la conception du tracé en plan et profil en long), le choix des profils en travers, les points d'échange, les équipements. Il existe des normes pour le dimensionnement des chaussées et pour les essais sur les matériaux, mais pas pour la conception géométrique. Suivre ces instructions n'est pas obligatoires pour les autorités locales – conseils départementaux et communaux. En revanche, ces documents valent normes pour les routes de l'État. Parmi les documents techniques de référence, deux instructions détaillées dans le Tableau 2 concernent les routes extra-urbaines. Le guide technique « Commande et contrôle des reconnaissances géotechniques de tracés » du LCPC (Laboratoire central des ponts et chaussées (France) 2001) et le guide « aménagement des carrefours interurbains » du Sétra (1998) viennent compléter l'ARP afin d'aménager les carrefours.

Tableau 2. Instructions techniques de conception géométrique des routes du réseau national français

Acronyme	Nom complet	Routes concernées	Dates	Détail
ARP ou ICTARN	Instruction sur les Conditions Techniques d'Aménagement des Routes Nationales	Routes ordinaires et artères interurbaines en rase campagne	(2000b)	Recueil de recommandations techniques pour l'aménagement des routes principales (hors autoroutes et routes à 2x2 voies dénivelées)
ICTAAL	Instruction sur les Conditions Techniques d'Aménagement des Autoroutes de Liaison	Autoroutes et routes express	1985 (2000a)	Recommandations techniques applicables pour les autoroutes et routes à 2x2 voies dénivelées situées en rase campagne et en sites difficiles

2.1.1.2 Trafic

Le trafic peut être défini comme un ensemble d'entités mobiles en mouvement ou à l'arrêt. Ses trois principales caractéristiques quantitatives sont le débit (q), la vitesse (v) et la concentration (k) (Figure 4).

Le débit définit la répartition des véhicules dans le temps : c'est le nombre d'entités mobiles écoulées par une section d'infrastructure pendant une durée de temps dt . Il est le plus souvent exprimé en 50

véhicules par heure, mais il existe des variations temporelles. Annuellement, en mobilité routière, on utilise le trafic moyen journalier annuel (TMJA), trafic d'une journée moyenné sur une année. Il existe ensuite des variantes multiples, discrétisées selon les jours ouvrables ou fériés, etc. : mensuelles, journalières, ou horaires. En trafic horaire, les heures de pointe du matin et du soir sont particulièrement importantes car dimensionnantes pour l'infrastructure.

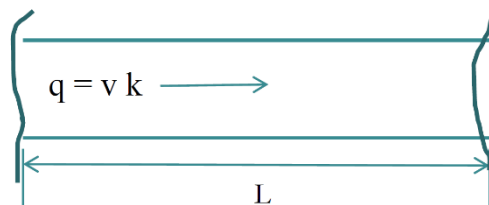


Figure 4 Principales caractéristiques quantitatives du trafic

Il existe deux niveaux d'entités, le véhicule ou le voyageur/le fret, et on définit parfois le trafic comme le produit du débit par la longueur du trajet : on mesure alors le trafic en v.km, un v.km étant un kilomètre parcouru par un véhicule, ou en p.km pour le transport de voyageur et t.km pour le fret, un p.km étant le parcours d'un kilomètre par un passager, et respectivement pour une tonne de marchandise.

2.1.1.3 Capacité (Cohen et Danech-Pajouh 2000)

La capacité d'un réseau routier détermine l'offre de transport routier, puisqu'elle représente le nombre maximal de véhicules susceptibles de circuler sur une section durant une période donnée.

A/ Définition

En ingénierie du trafic, la capacité d'une infrastructure routière représente le débit maximal, donc la capacité au « seuil de concentration » critique³⁹. C'est une valeur qui dépend d'une infrastructure mais également de ses conditions d'exploitation de la route. Son calcul nécessite des relevés de terrain, puis une régression comme présenté sur l'exemple de la Figure 5.

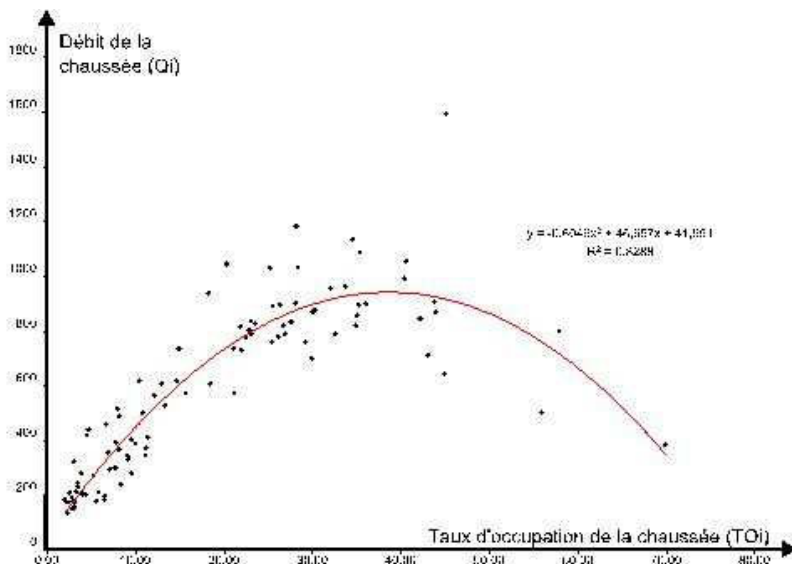


Figure 5 Diagramme débit-taux d'occupation d'une chaussée (Enault 2012), avec le taux d'occupation de la chaussée en % en abscisse et le débit de la chaussée en UVP/h

³⁹ Capacité = Débit maximal = $q_{\max} = q(k_c)$

B/ Facteurs de capacité

La capacité dépend de nombreux facteurs, internes et externes à la route. En ce qui concerne les facteurs internes, elle est d'abord liée à la géométrie routière puisque celle-ci influence à la fois la vitesse maximale autorisée (et donc la distance inter-véhiculaire) et évidemment le nombre de voies et leur largeur. Elle dépend également de la géométrie de surface (conception, état de chaussée), qui influe sur la vitesse. Elle dépend enfin de la composition du trafic. En effet, elle s'exprime en Unités de Véhicule Particulier (UVP) qui permet de convertir le nombre de véhicules réels en unités standards, un camion n'ayant pas le même effet d'encombrement sur une route qu'un vélo. On prend les conventions suivantes : un véhicule léger ou une camionnette = 1 UVP ; un poids lourd = 2 UVP ; un cycle = 0.3 UVP (mais parfois entre 0.2 et 0.5). La capacité n'est pas uniquement liée à l'infrastructure puisqu'une météo mauvaise (pluie, brouillard, neige, parfois chaleur) peut impliquer une réduction de la vitesse des véhicules, réduisant de ce fait la capacité du tronçon routier. En termes de facteurs externes, la capacité dépend de l'exploitation, donc des conducteurs qui déterminent la vitesse réelle des véhicules, mais aussi des mesures de limitation et de contrôle de vitesse.

Par type de liaison, on pourra retenir les ordres de grandeur de capacité du Tableau 3.

Tableau 3 Capacités routières types par catégories de liaisons

Type de liaison	Urbanisation	Trafic (UVP/jour)
2 x 1 voie	Rase campagne	5 000 à 7 000
2 x 2 voies sans terre-plein central	Rase campagne ou interurbain	10 000 à 13 000
2 x 2 voies avec carrefours à niveau		13 000 à 18 000
Autoroute 2x2	Interurbain	30 000
Autoroute 2xn, avec n>2	Péri-urbain	60 000

C/ Niveaux de service et régimes d'écoulement

Le Highway Capacity Manual « HCM 2010 » est l'ouvrage de référence de l'ingénierie du trafic (National Research Council et Transportation Research Board 2010). Il propose une relation entre niveaux de service – classés de A pour la meilleure fluidité à F pour la congestion – et pourcentage d'atteinte de la capacité Q_{max} : niveau A si $q < 0.35Q_{max}$, niveau B si $q < 0.54Q_{max}$, niveau C si $q < 0.77Q_{max}$, niveau D si $q < 0.93Q_{max}$, niveau E si $q < Q_{max}$ et niveau F pour q au-delà de 100% de la capacité.

En-dehors de ces niveaux de service, on peut également différencier des régimes d'écoulement des flux⁴⁰. Pour un débit en-deçà de la capacité, nous sommes en zone de trafic fluide, trafic libre (chaque usager choisit sa vitesse librement) ou écoulement libre. Tandis qu'au-delà du point critique du diagramme débit-concentration (où le débit vaut la capacité), nous sommes en zone de trafic congestionné.

2.1.2 Fonctions pour le territoire

Les routes supportent des fonctions à la fois pour le territoire et pour les usagers. Du point de vue du territoire, la route est vecteur d'importation d'agents socioéconomiques, tandis que du point de vue des usagers, elle permet l'accès aux services, aménités, emplois, équipements publics, etc. Le réseau routier peut être classifié selon plusieurs caractéristiques.

2.1.2.1 Classification par type de gestionnaire

A/ Les grands types de réseaux

⁴⁰ <http://www.entpe.fr/content/download/9375/51474/file/ComprendreLeTraficRoutier.pdf>

Le Tableau 4 présente les réseaux routiers terrestres en métropole française par gestionnaire. De haut en bas, on peut considérer que cette classification va des routes les plus capacitaires aux routes les moins capacitaires. Les premières ont des fonctions de traversée du territoire (déplacements longues distance) tandis que les dernières ont des fonctions de desserte locale fine.

Tableau 4 Les réseaux terrestres de métropole: dénomination, types de routes, longueur et gestionnaire (Sources : MEDDE, CGDD, SOEs 2014, CGEDD 2015 et USIRF 2016b)

Dénomination	Type de routes	Longueur		Trafic	Gestionnaire patrimonial
		km	%	% v.km	
Réseau Routier National	Autoroutes concédées	8582	0.8	15	Sociétés Concessionnaires d'Autoroutes
	Nationales non concédées	12667	1.2	19	Directions Interdépartementales des Routes (DIR)
Réseau départemental	Départementales	377 000	98	66	Conseils Départementaux
Réseau routier tertiaire	Communes et rues	630 000			Communes
	Chemins ruraux	600 000			

B/ Circulation routière par type de réseau

Caractériser le système de transport routier français passe par l'étude de l'usage quantifié du réseau par type de routes. Le dernier sondage de circulation routière en France a eu lieu en 2004-2005, soit juste avant la loi de décentralisation ayant résulté au transfert de la moitié des routes nationales non concédées de l'État vers les départements, soit environ 10 000 km. À l'époque, les routes locales couvraient 40% des véhicules-kilomètres (v.km) parcourus, suivies par le réseau urbain avec un quart des v.km, contre seulement 15% pour les autoroutes concédées, 8% pour les non concédées, et 11% pour le réseau national. Un rapport du CGEDD de 2015 donne, sans citer ses sources, sensiblement la même répartition : 15% de trafic sur Réseau National concédé (RNc), 19% sur Réseau Routier National non concédé (RNnc), et 66% sur Réseaux Départementaux (RD) et Communaux (RC).

Néanmoins, proposons un indicateur plus parlant : si l'on met en regard la longueur des différents types de réseaux et le trafic qu'ils portent (chiffres du CGEDD 2015), par exemple en divisant le trafic en v.km par le linéaire du réseau concerné, on obtient un indicateur d'usage du réseau correspondant au nombre de véhicules équivalents qui « fictivement » parcourrait tout le réseau en un an : 9.9 millions de véhicules par an pour le RNc, 8.5 pour le RNnc, et 0.36 pour le RD et RC. Rapporté au kilomètre, cela signifie que le Réseau Routier National (RRN) est 30 fois plus fréquenté que le RD&C. Toutefois, du point de vue de la priorisation de l'entretien, cet indicateur serait plus pertinent encore rapporté au mètre carré plutôt qu'au linéaire kilométrique puisque le RNc est constitué à 75% de voies à 2x2 voies et à 25% de 2x 3 ou 4 voies, tandis que le RD&C est essentiellement constitué de routes à 2x1 voies. Ainsi, le RNnc est le plus fréquenté au mètre carré de chaussée, suivi du RNc qui doit être 15 fois plus fréquenté que le RD&C.

2.1.2.2 Focus sur le réseau routier national

Nous venons de montrer que le RRN a une fonction primordiale pour les usagers, puisqu'il comptabilise un maximum d'intensité de trafic sur un minimum de linéaire. On l'appelle d'ailleurs « réseau structurant », associé avec quelques routes départementales importantes. Nous proposons donc de détailler un peu les caractéristiques de ce réseau.

A/ Composition

Aujourd'hui, parmi le réseau routier dit « structurant » (RRN), on distingue le réseau concédé constitué d'autoroutes géré par des Sociétés Concessionnaires d'Autoroutes (SCA) du réseau non concédé qui compte des autoroutes interurbaines, des autoroutes et voies rapides urbaines, des routes nationales à caractéristiques autoroutières et d'autres routes nationales, et qui est géré par les DIR. Pour autant,

une partie des routes départementales supporte un trafic assez important, et pourrait donc être classée dans la partie structurante du réseau. D'ailleurs, ces routes sont souvent passées de la catégorie RN à la catégorie RD avec les actes de décentralisation du milieu des années 2000.

B/ Trafic total et répartition du trafic Poids Lourd

Les TMJA peuvent être assez élevés sur autoroutes : le trafic journalier est inférieur à 20 000 UVP sur 14 autoroutes⁴¹, compris entre 20 et 40 000 UVP sur 19 autoroutes⁴², supérieur à 40 000 UVP sur 11 autoroutes⁴³ et atteint les 100 à 150 000 UVP sur certains axes aux approches de Paris, Lille, Lyon et Nice (Sétra 2009d).

Sur le RRN, les autoroutes absorbent 60% du trafic PL, dont 40% pour les autoroutes à péage en v.km (Sétra 2009d). La circulation PL représente environ 16% du trafic total sur les autoroutes concédées et 12% sur les autoroutes non concédées (voir chiffres précis en Annexe 1, Sétra 2009).

C/ Nouvelle classification pour les services d'entretien

Une classification spéciale pour l'entretien existe au sein de cette catégorie de routes : la nouvelle classification des chaussées nationales par classe « HiTi » a été instaurée en 2013 en remplacement de la classification en vigueur depuis 1992 (DGITM 2014b). Hi correspondant à la rigueur hivernale et Ti au trafic. Les segmentations de trafic selon cette nouvelle classification sont les suivantes: « <T0 » si le trafic est inférieur à 750 PL/jour.sens, « =T0 » si le trafic PL est compris entre 750 et 2000 PL/jour.sens, et « T0< » s'il excède 2000 PL/jour.sens. En termes de rigueur hivernale, la segmentation est la suivante : « =H1 » pour les zones à hivers cléments, « =H2 » pour celles à hiver peu rigoureux, et « H2< » pour les zones aux hivers assez à extrêmement rigoureux. Les linéaires du RRN en 2013 selon cette nouvelle classification opérationnelle sont présentés sur la Figure 6.

	= H1	= H2	H2 <
< T0	2 138 km	1 942 km	2 595 km
= T0	2 419 km	1 969 km	2 288 km
T0 <	1 354 km	1 473 km	2 279 km

Figure 6 Linéaires de chaussées par famille de sollicitation mécaniques et thermiques (extraction base ISIDOR 2013) (DGITM 2014b)

2.2 Éléments structuraux

2.2.1 Éléments d'une route et terminologie

Une route est composée de plusieurs éléments (Figure 7) dont la partie sur laquelle les véhicules circulent appelée chaussée, entourée par un accotement constituée d'une bande dérasée puis d'une berme, associés si besoin (profil convexe) à un système de retenue des eaux de pluie. Pour le cas des routes à chaussées séparées, on insère un terre-plein central (TPC) et également des bandes dérasées (de gauche dans ce cas). Les bandes dérasées de droite deviennent alors Bande d'Arrêt d'Urgence (BAU).

⁴¹ A3 5 16 19 20 26 29 31 38 51 72 77 85 80

⁴² A2 4 10 11 13 20 28 31 36 61 62 63 64 71 72 81 83 84

⁴³ A1 6 7 8 9 10 13 31 35 50 62

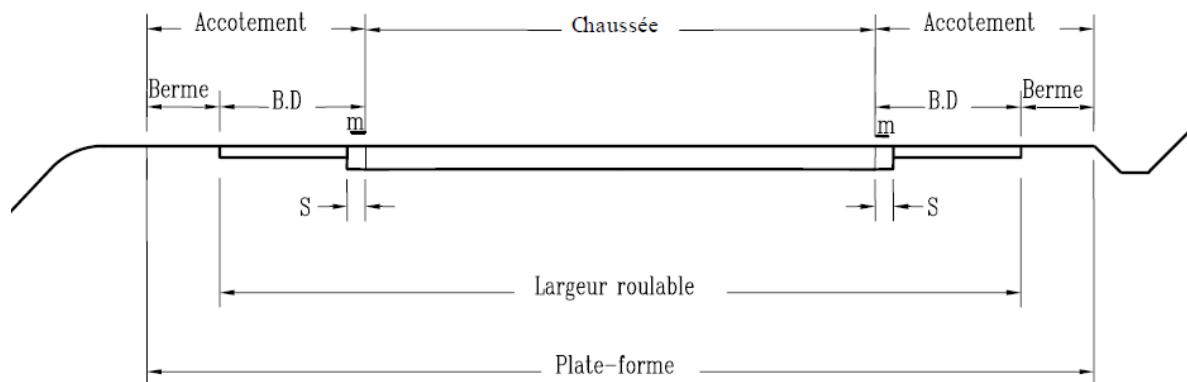


Figure 7 Éléments constitutifs du profil en travers (Source : Sétra 2006)

Les ouvrages d'art, glissières de sécurité et autres équipements font également partie intégrante de la route. Cependant, lorsque nous évoquerons l'entretien routier, nous ferons référence à l'entretien des chaussées sauf mention contraire.

2.2.2 Structure multicouche

Une chaussée est constituée de couches successives de matériaux, couches ayant chacune des fonctions précises. Lorsqu'une chaussée nécessite une intervention de maintenance, on retraite les couches existantes et/ou on ajoute une nouvelle couche (après déconstruction éventuelle d'une partie supérieure de l'infrastructure). Le vocabulaire relatif aux couches de chaussée est illustré sur la Figure 8.

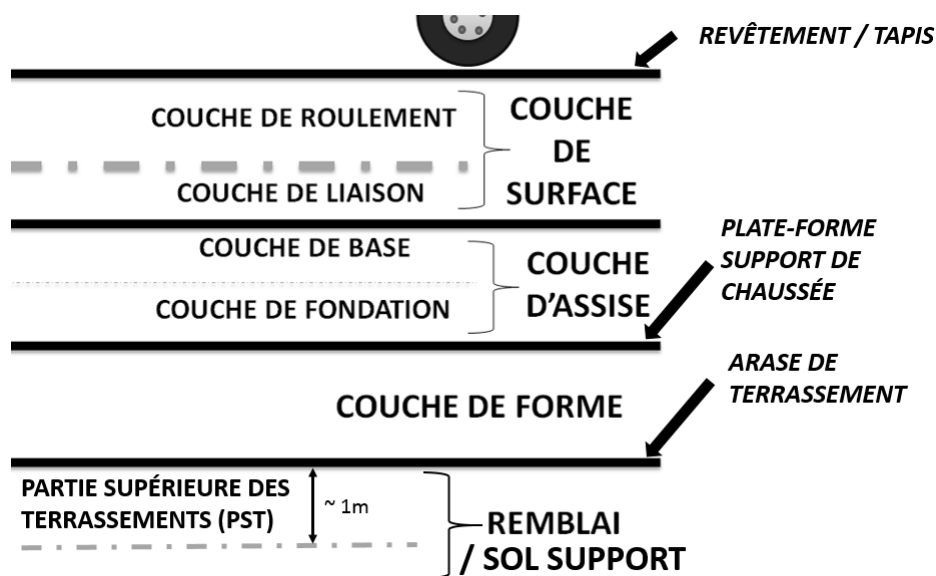


Figure 8 Coupe d'une route : couches de chaussée et des terrassements

2.2.3 Corps de chaussée

La chaussée à proprement parler est l'ensemble des couches supérieures au terrassement, surmontant la couche de forme : couche de fondation éventuelle et couche de base formant l'assise de chaussée, recouverte d'une couche de liaison éventuelle puis d'une couche de roulement (Figure 8).

La couche d'assise, souvent formée d'une couche de fondation puis d'une couche de base (parfois il n'y a pas de fondation comme sur certains tronçons anciens du réseau parisien), permet de répartir les contraintes verticales sur la plateforme (PF) et de réduire les déformations induites par les véhicules.

La couche de surface, constituée d'une couche de roulement, et parfois d'une couche de liaison, a plusieurs rôles, les principaux étant d'assurer l'étanchéité de la structure pour éviter les dégradations

induites par l'infiltration d'eau dans le corps de chaussée, la sécurité des usagers (adhérence des véhicules, limitation des projections d'eau et d'autres matériaux, résistance géométrique), ainsi que leur confort. La couche de liaison quant à elle a pour but d'assurer la bonne adhérence entre assise et couche de roulement, et permet également de reprofiler une chaussée (uni).

2.3 Techniques routières

2.3.1 Matériaux de chaussées

Les matériaux utilisés pour construire une chaussée sont de divers types, et de qualité normalisée. Des granulats, appelés « cailloux » par les constructeurs et correspondant à des roches concassées plus ou moins finement et caractérisées par la distribution par segmentation de diamètres, servent de matrice aux couches de chaussée. De l'adhésion est donnée entre ces granulats grâce à un liant, hydraulique ou hydrocarboné. Ces derniers, également appelés liants bitumineux, sont principalement constitués de bitume, résidu lourd de la distillation du pétrole. Les goudrons, déployés entre le 19^{ème} et le 20^{ème} siècle, ne sont plus utilisés car ils ont été jugés cancérigènes, ce qui pose problème pour le recyclage des fraisats bitumineux mis en œuvre à cette époque.

À ces matériaux de base peuvent être ajoutés d'autres produits aux propriétés particulières. Le bitume modifié, codifié dans la norme NF EN 14023, voit par exemple ses propriétés physico-chimiques varier grâce à l'ajout d'élastomères ou plastomères thermoplastiques. Ce sont des adjuvants polymériques qui améliorent le caractère élastique des matériaux au détriment du caractère visqueux non recherché (meilleure résistance aux sollicitations par modification du comportement rhéologique du mélange). Les élastomères améliorent les comportements aux hautes et basses températures. Les plastifiants quant à eux sont souvent ajoutés à faible teneur, inférieure à 5% afin de retenir les asphaltènes (molécules aromatiques) qui s'évaporent avec le temps, rendant la matière rigide et cassante.

2.3.2 Familles de chaussées

On peut classer les structures de chaussée par type de matériaux. Selon la classification proposée dans le catalogue des structures types de chaussées neuves de 1977, actualisée en 1988 puis reconduite dans le catalogue de 1998 (Corté, Guidoux, et al. 1998), on range les chaussées selon leur structure en six familles (voir Annexe 2 où des épaisseurs de couche sont inscrites à titre indicatif) : les structures souples, les chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques, les chaussées bitumineuses épaisses, les structures mixtes, les structures inverses, et les chaussées en béton de ciment. À ces 6 familles, l'on en ajoute parfois une septième proposée par la direction des routes en 2000 (Direction des Routes 2000) et appelée famille des structures expérimentales.

2.3.3 Exemple du réseau national

38% du RRN est constitué de chaussées bitumineuses épaisses et 41% de chaussées semi-rigides (voir structures types en Annexe 3) (Source : Système d'Information sur la Connaissance du REseau routier national (SICRE) dans (Durand et Cousin 2009)). 50% du linéaire autoroutier serait revêtu de Béton Bitumineux Très Mince (BBTM) (Robert et Lafon 2011). En 1997, 40% du linéaire d'autoroutes concédées était revêtu de BBTM, et 10% de Béton Bitumineux Ultra Mince (BBUM) (Sétra - Observatoire des Techniques de Chaussées 1997).

2.4 Conception des chaussée

Nous décrivons ici rapidement les procédés constructifs des routes, qui ont évidemment un impact important sur le bilan économique, environnemental comme social de l'ouvrage. Les rendements et consommations des engins de chantier, les matériaux (granulats, liants bitumineux ou hydrauliques, eau, chaux, etc.) utilisés pour construire les routes, sont autant de facteurs jouant sur les pressions générées sur l'environnement global et local.

2.4.1 Modèle de dimensionnement

Le dimensionnement d'une chaussée dépend des matériaux utilisés, du trafic à venir prévu, de la durée de vie attendue et des conditions climatiques. Tous les pays n'utilisent pas les mêmes méthodes de dimensionnement. En France, on utilise le modèle de Burmister qui se base sur une modélisation multicouche d'un massif semi-infini élastique, à la fois mécanique, probabiliste et empirique. Les routes françaises sont dimensionnées selon les prévisions de trafic lourd pour durer 20 ans pour les chaussées courantes, et 30 ans pour les routes structurantes, avec un risque de calcul à 5%. Ce modèle est implémenté dans Alizé, le logiciel de dimensionnement français développé à l'époque par le LCPC, associé à un module de vérification de la résistance au gel et au dégel de la chaussée, et qui forme le logiciel de dimensionnement de référence en France. En pratique, on peut donc dimensionner une chaussée pour la durée de vie que l'on souhaite.

2.4.2 Guides techniques

L'ouvrage de référence pour construire une chaussée est le guide technique publié par le LCPC-Sétra en 1994 sous le titre « Conception et dimensionnement des structures de chaussée » (Corté, Goux, et al. 1994).

Dans le modèle de dimensionnement de chaussée français, on tient compte des caractéristiques mécaniques de toutes les couches de chaussée décrites précédemment, et également de celles de la PF bien qu'elle ne fasse pas partie de la « chaussée » à proprement parler (Corté, Goux, et al. 1994). On peut également trouver un guide de fiches et abaques pour choisir une structure de chaussées dans le « catalogue de structures types de chaussées neuves » du LCPC-Sétra publié en 1998 (Corté, Guidoux, et al. 1998). Petit guide d'une vingtaine de pages, 300 pages d'annexe et de guide d'utilisation s'y ajoutent pour donner des indications complémentaires : détermination de la classe d'une plateforme, indices de gel des hivers français, définition des coupes transversales, coût global structurel, dimensionnement de chaussées.

2.4.3 Protocole de dimensionnement

Il se présente sous trois étapes éventuellement bouclées : (1) dimensionnement mécanique, (2) choix du revêtement, (3) vérification gel-dégel. On calcule d'abord la portance nécessaire pour le trafic cumulé sur la durée de vie de chaussée désirée, et on dimensionne la chaussée afin de répondre à ces caractéristiques mécaniques. On détermine ensuite les caractéristiques de la couche de surface (à laquelle on associe un niveau de service). On vérifie ensuite la tenue au gel-dégel (le front de gel ne doit pas atteindre la plateforme). Dans le cas où cette vérification serait négative, on recommence à l'étape 1 en modifiant les matériaux jusqu'à ce que l'étape 3 soit vérifiée.

Il existe deux types de dimensionnement : classique (aussi appelé massif), et progressif. Le premier dimensionnement conçoit la chaussée neuve avec une résistance mécanique suffisante pour supporter le trafic sur toute la durée de vie de chaussée, qui sera assortie de travaux d'entretien légers, principalement pour rétablir le bon état de de surface (adhérence, profil) et assurer l'étanchéité (dégradations). Sous dimensionnement progressif, la chaussée neuve est dimensionnée pour un trafic plus faible que celui prévu sur sa durée de vie, et les phases d'entretien viennent au besoin renforcer mécaniquement la structure selon l'augmentation du trafic. Selon certains gestionnaires autoroutiers ayant adopté cette approche, le dimensionnement progressif n'est pas nécessairement intéressant du point de vue de l'investissement global, mais il permet une bonne gestion des risques : on investit selon le trafic, donc le surcoût d'un renforcement mécanique peut être financé au moment où l'on perçoit les péages dans le cas de concessions (moins d'avance de frais). De plus, dans le cas où les prévisions de trafic ne se réalisent pas – ce fut le cas par exemple sur les autoroutes construites avant la crise financière en Grèce – on a économisé d'autant en phase d'investissement initial.

2.5 Géométrie de surface

2.5.1 Paramètres

Le profil routier se qualifie selon ses irrégularités, d'amplitude a et de longueur d'onde λ (voir Figure 9), qui correspondent à un écart par rapport à la géométrie théorique (ligne de route). Les facteurs qui influent sur le profil routier sont la formulation de l'enrobé et sa granulométrie, la qualité des granulats, la mise en œuvre des couches de chaussées (type de compactage par exemple) et leur structure, leur âge, le trafic, et la géométrie de la route entre autres.

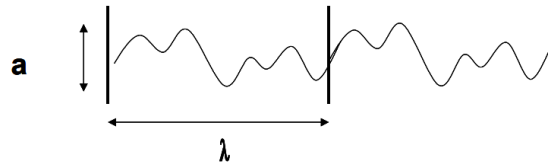


Figure 9 Caractérisation des textures de revêtement routier : longueur d'onde et amplitude (Cerezo 2011)

2.5.2 Segmentations de longueur d'onde : uni, mégatexture, macrotexture, microtexture

On catégorise ces irrégularités par segmentations de longueur d'onde, qui permettent de classifier des effets pour l'utilisateur, présentées sur la Figure 10. Des plus grandes (supérieures à 50m) aux plus petites longueurs d'onde (inférieures à 0.5mm), les irrégularités de surface caractérisent le *profil en long*, l'*uni*, la *mégatexture*, la *macrotexture* et enfin la *microtexture*. Selon l'échelle considérée, les caractéristiques de surface impactent des performances différentes : bruit, adhérence, usure pneumatique ou véhiculaire, confort... Les irrégularités de longueur d'onde supérieure à 50m définissent le profil en long, qui dépend des caractéristiques générales de conception géométrique de la chaussée. Entre 50cm et 100m, l'uni conditionne le confort à l'intérieur des véhicules (bruit (vibrations), stabilité du véhicule : mouvement transversaux (roulis), longitudinaux (tangage)) et la consommation des véhicules en énergie et pièces d'usures. Entre 5cm et 50cm, la mégatexture conditionne le bruit plutôt en basse fréquence (dans la gamme de l'audible), le confort des deux roues, et les consommations véhiculaires également. Entre 0.5mm et 5cm, la macrotexture génère le bruit plutôt des moyennes fréquences, l'adhérence sur sol mouillé à grande vitesse, la drainabilité et l'évacuation de l'eau, le bruit de roulement, et la consommation énergétique après 10 mm. À $\lambda < 0.5\text{mm}$ enfin, la microtexture détermine l'adhérence sur sol sec et l'usure pneumatique par abrasion.

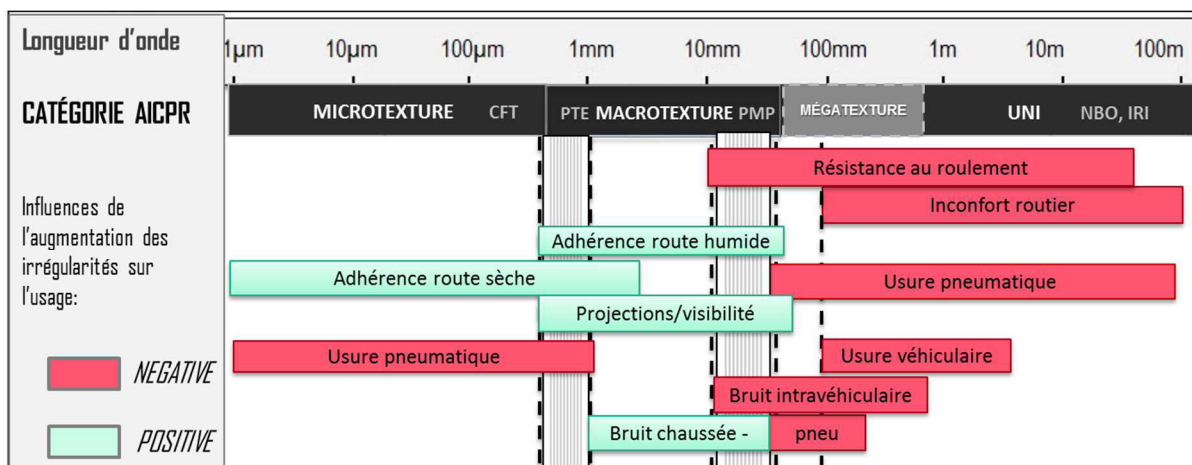


Figure 10 Lien entre la texture et les caractéristiques de surface des chaussées (Bitelli et al. 2012)

Comme le montre la Figure 11, l'uni se positionne entre l'ordre de grandeur du pneumatique et celui du profil de la ligne de route, la mégatexture à l'échelle de la dégradation de surface, la macrotexture à l'échelle des granulats, et la microtexture à l'échelle de la porosité du granulat. Aussi, la mégatexture est déterminée par la taille granulats, la part de gravillons, et la mise en œuvre du revêtement, tandis

que la microtexture dépend de la part d'éléments fins (sable) et la qualité du granulat (angularité, nature).

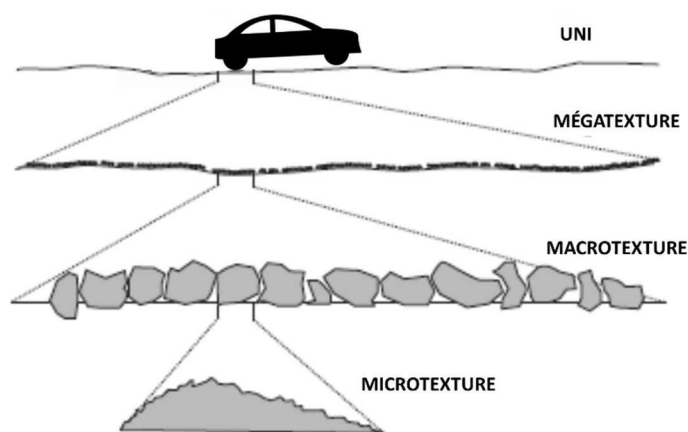


Figure 11 Échelles des textures routières

2.5.3 Indicateurs d'état de surface

2.5.3.1 Indice de Rugosité Internationale (IRI)

L'état de surface d'une chaussée peut être quantifié en utilisant l'IRI qui est l'Index de Rugosité Internationale permettant de caractériser à la fois l'uni et la mégatexture. Il a été développé au début des années 1980 pour la Banque Mondiale afin d'avoir un étalon international de l'état de surface des routes. Il correspond à une mesure normalisée⁴⁴ des déplacements verticaux de la suspension d'un quart de véhicule standard (i.e. « golden car ») à 80 km/h, en m/km ou m/km, et est utilisé sur la majeure partie du globe. La vitesse aurait une influence sur la réponse dynamique du Golden car puisque la fréquence d'excitation vaut v/λ .

Deux sections de route avec un IRI identique peuvent avoir des défauts d'uni très différents. Le pas d'échantillonnage peut influencer la précision du calcul d'IRI (meilleure précision avec un pas court). Selon Delanne (2008), l'IRI dépendrait principalement des défauts avec une longueur d'onde comprise entre 1m et 30m, et serait d'autant plus sensible à la bande fréquentielle centrée autour d'une longueur d'onde de 2m.

2.5.3.2 Notes par Bande d'Ondes

En France, on ne mesure pas l'IRI mais on relève des Notes en Bande d'Onde⁴⁵ (NBO) sur trois segments de longueurs d'onde : grandes (GO), moyennes (MO) et petites ondes (PO). Ces mesures sont relevées avec un Analyseur de Profil Longitudinal (APL). On filtre le signal obtenu en analysant la chaussée selon trois bandes passantes couvrant respectivement les longueurs d'onde entre 0.71 et 2.8 m (petites ondes = PO), entre 2.8 et 11.3 m (moyennes ondes = MO), et entre 11.3 et 45.2 m (grande ondes = GO). À partir de ces trois pseudo-profil élémentaires obtenus par filtrage du pseudo-profil initial, on calcule l'énergie pour chaque pseudo-profil élémentaire par intégration discrète : la somme des carrés des échantillons (données du pseudo-profil) est multipliée par la longueur du tronçon de calcul. L'énergie calculée est transformée en note de bande d'onde sur une échelle de qualité progressive de 1 à 10.

Pour simplifier, on peut considérer que la valeur de la NBO dépend de la mise en œuvre de couches plus ou moins profondes selon la longueur d'onde de caractérisation surfacique considérée (Cerema-DTectIM et IDRRIM 2014): les PO et MO dépendent des couches de rangs N et N-1, les MO et GO dépendent des couches de rangs N-2 et N-3, mais les GO dépendent aussi des couches de rangs N-3 et N-4 (Figure 12).

⁴⁴Le paramètre IRI est codifié par la Banque Mondiale (ASTM E950 Class1)

⁴⁵ Le concept de Notes par Bandes d'Onde a été développé en France dans les années 1990

N	Couche de roulement			
N - 1	Liaison	Base	Liaison	Fondation
N - 2	Base	Fondation	Fondation	Forme
N - 3	Fondation	Forme	Forme	
N - 4	Forme			

Figure 12 Numérotation des couches de chaussées (Cerema-DTectIM et IDRRIM 2014)

2.6 Conclusion

Les infrastructures routières sont dimensionnées et gérées selon la fonction qu'elles possèdent pour les territoires et les usagers. Selon leur aspect stratégique, elles ne sont pas gérées par les mêmes entités et selon les mêmes protocoles. Elles sont dégradées sous les effets du trafic et du climat, d'où le besoin d'entretenir la chaussée, aspect que nous allons développer maintenant.

3 Maintenance des infrastructures routières

Ce chapitre intègre à la fois des éléments terminologiques sur les catégories de maintenance routière, un point particulier sur les types de dégradations de chaussées, des éléments sur les techniques d'entretien des revêtements routiers et les gestions opérationnelles pratiquées en France, ainsi qu'un aperçu des outils de gestion de la maintenance des chaussées. Il est important de noter que les principaux guides relatifs à l'entretien des chaussées sont relativement anciens, et datent d'avant la décentralisation routière de 2004. Citons parmi eux le guide pratique pour l'entretien courant des chaussées édité par le Sétra (Bordes, Guinard, et Laurent 1996), le dictionnaire de l'entretien routier (MELTT 1996), la méthode « Aide à la gestion de l'entretien des réseaux routiers – volet chaussées » (LCPC-Sétra 2000) et le guide du Sétra concernant « L'aide au choix des techniques d'entretien des couches de surface des chaussées » (CFTR 2003). Parmi les guides plus récents, on peut citer celui publié par le CEREMA en mai 2016, réalisé dans le cadre de l'IDRRIM sous le titre « Diagnostic et conception des renforcements de chaussées » (IDRRIM 2016). D'autres guides concernant l'entretien hors resurfacement (viabilité hivernale, entretien des dépendances et équipements, etc.) existent mais ne seront pas évoqués ici.

3.1 Complexité de la maintenance

La maintenance est un ensemble d'opérations complexes et variées : le vocabulaire de la maintenance comme les connaissances de terrain de sa réalisation comportent quelques flous. Nous nous attachons ici à expliciter sa terminologie, et présentons l'enquête que nous avons menée auprès des gestionnaires de l'interurbain français pour mieux cerner ses réalités de terrain.

3.1.1 Terminologie

3.1.1.1 Actions de maintenance des routes

La maintenance est définie comme l'ensemble de toutes les actions techniques, administratives et de management durant le cycle de vie d'un bien destinées à le maintenir ou à le rétablir dans un état spécifié afin que celui-ci soit en mesure d'assurer sa fonction (NF EN 13306). La maintenance des infrastructures routières a donc pour objectif d'assurer un certain niveau de service routier, en termes de sécurité (adhérence, visibilité), de vitesse et de confort (état de surface), malgré l'évolution inhérente des conditions de la route, par exemple du fait de la détérioration progressive des chaussées. Toutefois, la maintenance de la route ne s'arrête pas à l'entretien des chaussées (dont viabilité hivernale), puisqu'elle inclut également le maintien d'autres éléments de la route lorsqu'ils existent : dépendances vertes et clôtures éventuelles, équipements, ouvrages d'art, systèmes de drainage et d'assainissement, signalisation verticale et horizontale ; et plutôt pour les autoroutes concédées :

systèmes d'exploitation et d'équipement, réseaux énergétiques associés, et infrastructures ponctuelles (gares routières...).

3.1.1.2 Catégories d'entretien routier

Il est important de définir les termes utilisés par les différents gestionnaires sur l'entretien : courant/de routine/léger Vs lourd, prédictif/préventif Vs correctif/curatif... Bien que normalisé par la norme NF EN 13306 sur la terminologie de la maintenance (AFNOR 2010a)⁴⁶, le vocabulaire pratique reste différent pour chaque gestionnaire et fluctue avec le temps. L'entretien courant, ou de routine, inclut l'entretien commun léger qui traite les dégradations ponctuelles (pontage de fissures, traitement des nids de poules) et l'entretien des dépendances (désherbage, fauchage). L'entretien préventif ou prédictif vise à intervenir en amont des dégradations qui apparaîtront probablement (sur une base empirique ou de relevés) : on va par exemple resurfer une chaussée avant la limite d'adhérence désirée. Enfin, l'entretien correctif ou curatif est utilisé après apparition de la dégradation. Certains gestionnaires considèrent néanmoins que les notions de préventif et curatif sont obsolètes. Pour eux, l'on différencie principalement l'entretien courant des gros entretiens et renouvellements. Le resurfaçage de chaussées fait partie des gros entretiens, et est utilisé en maintenance curative comme préventive, bien que l'on fasse de plus en plus de curatif.

3.1.2 Enquête sur le resurfaçage routier en France

Face au manque de connaissances sur la réalité des pratiques de resurfaçage des routes interurbaines en France dans toute leur pluralité, nous avons mené une enquête auprès de tous les gestionnaires concernés dans le pays. Nous utilisons les informations obtenues à la fois dans ce chapitre, dans le développement de notre méthode d'évaluation (chapitre 4) et dans l'étude de cas autoroutière (chapitre 6).

3.1.2.1 Contenu et diffusion

Diffusée en ligne entre mai et novembre 2017 via GoogleForm, le questionnaire « Le renouvellement des couches de surface routières en France » visait à compléter la connaissance nationale des pratiques réelles de resurfaçage sur les routes interurbaines (voir questionnaire complet en Annexe 4). L'objectif annoncé était d'aider « le développement d'un modèle d'évaluation holistique de l'impact de la fréquence de renouvellement des couches de surface (i.e. resurfaçage) en France [...] en fonction des données d'entrée actuellement disponibles ou potentiellement disponibles sous 10 ans » et de « constituer une première bibliothèque restreinte de pratiques d'entretien pertinentes par type de réseau (autoroutier, national/départemental principal, départemental secondaire/communal) ».

Le questionnaire est constitué de 23 questions organisées en 5 sections. La première section concerne les informations essentielles sur le gestionnaire : type de gestionnaire (SCA, DIR, CD, Commune, Entreprise, Autre), réseau entretenu (type, linéaire), budget d'entretien et répartition (resurfaçage et autres). La deuxième section renseigne les techniques de resurfaçage utilisées : parts des techniques de resurfaçage utilisées, épaisseurs mises en œuvre, composition des matériaux et granulométrie des granulats, choix de la technique. La troisième section traite du coût des techniques : paramètres, fourchettes et moyenne de prix par technique et répartition des coûts (matières premières, main d'œuvre). La quatrième section aborde la connaissance qu'a le gestionnaire de son patrimoine routier : fréquence d'entretien, facteurs de déclenchement des opérations de resurfaçage, pratiques d'ajournement des travaux, équivalences mécaniques des techniques, relevés d'uni et d'adhérence, ainsi qu'existence et accessibilité de données patrimoniales.

⁴⁶ Norme annulée et remplacée après la rédaction de ce mémoire par une nouvelle version en janvier 2018 : s'y référer pour actualisation du vocabulaire (AFNOR 2018)

3.1.2.2 Réponses

Le questionnaire nécessitait une quinzaine de minutes pour être rempli, à condition que le répondant soit techniquement et quantitativement au fait des pratiques de son service. Souvent, faute d'un interlocuteur unique ayant toutes ces données, les réponses ont nécessité des recherches complémentaires de la part des gestionnaires afin de répondre exhaustivement.

Sur 100 départements, 11 DIR et 6 SCA⁴⁷, les 37 réponses obtenues en 7 mois comptabilisent 27 départements, 6 DIR et 4 SCA, pour une représentation du linéaire interurbain français de 24% du RD, 67% des RNnc, et 73% des RNC, soit 92 000 km de RD, 7 800 km de RNnc, et 6 300 km de RNC (Tableau 5).

Tableau 5 Réponses au questionnaire et représentativité

Réseau	Répondants	Représentativité (%)	Linéaire couvert (km)
RNc	4	73%	6300
RNnc	6	67%	7800
RD	27	24%	92 000

3.2 Détérioration des chaussées

Après avoir donné quelques éléments de langage sur la maintenance routière, et présenté l'outil de connaissance de terrain de la gestion de la maintenance en France que nous avons mis en place, nous abordons la question des typologies de dégradations de chaussées, dégradations que viennent traiter ou prévenir l'entretien comme on vient de l'expliquer.

Les dégradations affectant la chaussée peuvent se séparer en deux catégories : celles qui touchent la partie superficielle (couche de roulement) de la chaussée et qui déterminent l'usure surfacique, et celles qui se développent dans les couches plus profondes (couche de forme, assise), qui relèvent de l'usure structurelle, mais qui « remontent » et finissent par toucher le revêtement de surface en quelques années.

3.2.1 Types de dégradations

3.2.1.1 Dégradations surfaciques (Tourenq et Fourmaintraux 1971; LCPC 1998; Tang 2007)

Les dégradations superficielles sont nombreuses, et correspondent au ressuage, à l'usure surfacique par polissage ou arrachement des granulats du revêtement par les roues des véhicules, à l'orniérage par fluage aussi appelé orniérage à petit rayon, et à la fissuration de la couche de roulement.

Le ressuage correspond aux remontées de liant en excès à la surface de la couche de la chaussée, et est provoqué par un mauvais dosage du bitume à la mise en œuvre et des températures élevées durant l'exploitation. Il entraîne l'apparition de plaques de bitume lisses à la surface de la chaussée, et pose des problèmes de sécurité du fait d'une très faible adhérence⁴⁸ des pneus sur ces plaques.

L'usure des granulats par les véhicules induite par les frottements des pneumatiques en présence d'eau et de poussière entraîne une diminution de l'adhérence de la chaussée (perte de microtexture), et parfois un aspect lisse et brillant de la chaussée appelé glaçage. Le polissage est le phénomène qui a lieu à l'échelle microscopique en présence de poussières très fines jouant le rôle d'abrasif. Enfin, sous l'effet des efforts tangentiels et normaux exercés par les charges roulantes, les granulats sont arrachés (plumage), ou fragmentés (fragmentation) ce qui finit également par provoquer leur départ. Les granulats peuvent s'arracher par plaque (i.e. pelade), ou encore selon des sillons parallèles à l'axe de la chaussée (i.e. peignage), etc.

⁴⁷ ESCOTA, ASF, Cofiroute, Arcour, SANEF, APRR

⁴⁸ L'adhérence d'une chaussée correspond à sa capacité à mobiliser des forces de frottement entre le pneumatique d'un véhicule et la surface de la chaussée sous l'effet des sollicitations engendrées par la conduite (freinage, accélération, virage, manœuvre) (LCPC 2008 B)

Mais les dégradations surfaciques peuvent également concerner la signalisation horizontale (détérioration des peintures) et les performances acoustiques et drainantes des enrobés.

Ces dégradations posent des problèmes de sécurité – diminution de l'adhérence et de la lisibilité des marquages au sol – et de confort – dégradation de l'uni, nécessité potentielle de réduire sa vitesse, bruit plus élevé –, et finalement une dégradation globale de la qualité de service.

Les couches de roulement sont refaites régulièrement, tous les 7 à 12 ans selon Robert et Lafon (2011), moins souvent dans la pratique. Sur réseau autoroutier, certaines sociétés concessionnaires avancent une fréquence moyenne de resurfaçage de 13 ans. Les indicateurs d'état des chaussées et les conditions d'exploitation étant souvent moins intenses sur les autres types de réseau, il est à penser que les chiffres de Robert et Lafon (2011) surestiment les fréquences de resurfaçage, notamment dans la période actuelle de réduction budgétaire relative à l'entretien des routes. Pour autant, sur le RRN, en 2007, 29% des couches de roulement avaient moins de 5 ans, 31% avaient entre 5 ans et 10 ans, 24% avaient entre 10 et 15 ans, et enfin 16% avaient plus de 15 ans (Christory 2007). Il serait intéressant d'analyser l'évolution de ces statistiques.

3.2.1.2 *Dégradations structurelles (LCPC 1998)*

Les dégradations structurelles sont de deux types : la fissuration de fatigue et la déformation structurelle. La fissuration de fatigue se produit principalement au sein de l'assise de chaussée et apparaît sur la couche de roulement dans les bandes de roulement, du fait de la répétition des efforts de traction par flexion induits par les charges roulantes. Les déformations structurelles incluent l'orniérage à grand rayon, l'affaissement et la déformation (profil en long) de la chaussée. Elles apparaissent lorsque le sol support de chaussée n'est pas suffisamment portant, le drainage n'est pas suffisant, la chaussée est mal dimensionnée, ou encore quand les matériaux routiers sont de mauvaise qualité.

3.2.2 *Facteurs d'usure*

L'usure de la chaussée correspond à une dégradation physique et performantielle de la chaussée, impliquant des conséquences négatives telles que la diminution de la valeur patrimoniale de l'infrastructure et/ou du confort des usagers.

3.2.2.1 *Facteurs principaux : trafic PL et climat*

Deux types de contraintes sont responsables de la dégradation des infrastructures routières : les contraintes mécaniques engendrées par le trafic, et les contraintes climatiques (principalement les contraintes thermiques) (OCDE 1992). Le trafic PL (charges à l'essieu et agressivité des PL) et le climat sont d'ailleurs les paramètres de dimensionnement de chaussées en France. Néanmoins, les malfaçons et dans certains cas les accidents ou incidents sont également des causes de dégradation possibles (LCPC-Sétra 1994).

Côté climat, il est difficile d'évaluer quantitativement l'importance de ce facteur sur la détérioration de chaussée, d'abord du fait de la diversité des climats en France puis par leur variabilité temporelle. Les dégâts hivernaux sont parfois spectaculaires tant par leur rapidité d'apparition que par leur gravité (notons par exemple l'hiver 2010 en France). Une étude réalisée au Canada par BPR et l'Université Laval en 2005 (Doré et al. 2005) présente une étude bibliographique sur les ratios d'imputation de coûts de maintenance climat/trafic : ces ratios vont d'une répartition 10/90 (étude FHWA 1997) à une répartition 80/20 (étude réalisée par Nix en 2001 pour le compte de la Canada Trucking Alliance) en passant par des ratios équivalents.

Côté trafic, les charges responsables de l'usure structurelle sont principalement engendrées par les véhicules lourds (camions, autobus, convois exceptionnels) comme nous l'avons déjà dit. Les véhicules lourds présentant les charges d'essieux les plus élevées sont à l'origine d'une part disproportionnée de l'usure des routes (voir en A/ Loi de Miner et loi de la puissance). En 1992, l'Organisation de

Coopération et de Développement Économiques (OCDE) estimait qu'environ 30 à 50% de l'ensemble des coûts d'entretien des routes était imputables aux effets structurels dommageables des chargements des véhicules, le reste étant dû aux facteurs environnementaux, et au polissage du revêtement (OCDE 1992). Les caractéristiques d'un PL déterminent l'impact que celui-ci aura sur la chaussée, et peuvent se traduire quantitativement par la notion d'agressivité : selon la définition du Sétra (Durand et Cousin 2009), « l'agressivité d'un véhicule vis-à-vis d'une chaussée représente le rapport entre les dommages que celui-ci fait subir et ceux causés par l'essieu de référence français », à savoir en France l'essieu de 130 kN (environ 13 tonnes) monté en jumelage (32.5kN par roue, pression de contact de 0.662MPa). L'agressivité d'un PL est principalement liée à sa silhouette (nombre et répartition des essieux et pneumatiques) et à sa charge (Durand et Cousin 2009), comme le montre la formule de calcul d'agressivité d'un véhicule donnée en 3.2.3.

Dans le cas des chaussées en matériaux non traités, le passage d'un PL induit une déformation verticale permanente. L'accumulation de ces déformations provoque la déformation du profil de chaussée : c'est l'ornièrage à grand rayon. Pour les couches de matériaux traités, le passage d'un PL provoque un fléchissement, qui est une sollicitation (contrainte et déformation) en traction par flexion. L'accumulation des dommages induits par fatigue dans les couches traitées aboutit à la rupture de chaussée. Pour les chaussées à trafic important, ce sont les dommages par fatigue qui sont dimensionnants. Parmi les facteurs quantifiés, on trouve que le passage d'un PL doté de pneus superlarges⁴⁹ engendre un dommage 50 à 900%⁵⁰ plus élevé que le passage d'un PL à pneus jumelés (OCDE 1992). On a également quantifié une usure 50 à 200% supérieure pour un PL dont la suspension répartit les charges de façon inégale (OCDE 1992). Enfin, on estime une usure de la route au moins 15% plus rapide sous l'effet d'un PL à suspension mécanique plutôt qu'à suspension pneumatique (OCDE 1998) (plus précisément un ressort pneumatique Vs ressort à 4 lames permet : -5% de surface fissurée, -10% de profondeur d'ornièrage, -8% d'indice de viabilité ; un balancier⁵¹ Vs un ressort à 4 lames offre +13% de surface fissurée, +5% de profondeur d'ornièrage, +3% d'indice de viabilité (OCDE 1992), voir Annexe 5).

3.2.2.2 Autres facteurs

De nombreux facteurs secondaires influencent cependant la détérioration des infrastructures routières. La vitesse est un facteur relativement important tant pour l'usure structurelle que surfacique, puisqu'elle influe par exemple sur les charges dynamiques (OCDE 1992) et sur le temps de contact pneu-chaussée (Kane, Do, et Piau 2010). Or, une augmentation de 10% des charges dynamiques produit une augmentation de 7 à 12% des contraintes dans la chaussée⁵² (OCDE 1992). Les charges dynamiques sont également affectées par la texture de la route : sur route raisonnablement lisse, les charges dynamiques augmentent de 10 à 15% pour un bogie tridem de semi-remorque doté de suspensions pneumatiques (elles augmentent de 30% pour des suspensions mécaniques) comparées à celles d'un essieu simple, tandis que cette augmentation atteint 20% sur chaussée rugueuse (et 40 à 50% pour des suspensions mécaniques) (OCDE 1992). La chaussée influe également sur sa propre usure, puisque la détérioration de chaussée n'est pas linéaire dans le temps, et qu'elle dépend également de la durée de dimensionnement initiale de la chaussée et du risque de rupture choisi dans le calcul en conception. Ensuite parce que l'usure est liée à la qualité intrinsèque de la chaussée (Corté, Guidoux, et al. 1998): caractéristiques mécaniques des matériaux – bitume ou granulats (Tourenq et Fourmaintraux (1971) ont mis en évidence la dureté moyenne et le contraste en

⁴⁹Selon le Sétra, il semblerait que les pneus superlarges soient très peu utilisés par les transporteurs aujourd'hui, mais les manufacturiers continuent à les mettre régulièrement en avant.

⁵⁰ Plus précisément les déformations et l'ornièrage engendrés sont doubles, la fissuration due à la fatigue est multipliée par 4

⁵¹ Le fait que les balanciers soient toujours utilisés en France est à vérifier.

⁵² Projet DIVINE mené dans 17 pays de l'OCDE dans le secteur routier public et privé

dureté comme étant les deux variables explicatives de la propension au polissage des granulats), formulation du mélange bitumineux, structure de chaussée, qualité de mise en œuvre, plate-forme support de chaussée...

3.2.2.3 Carte des facteurs principaux d'usure de chaussée

La Figure 13 cartographie de manière synthétique les principaux facteurs d'usure de la chaussée et leurs relations. Cette carte est issue d'une étude bibliographique dont les sources sont indiquées en Annexe 4 et qui a été détaillée ci-dessus.

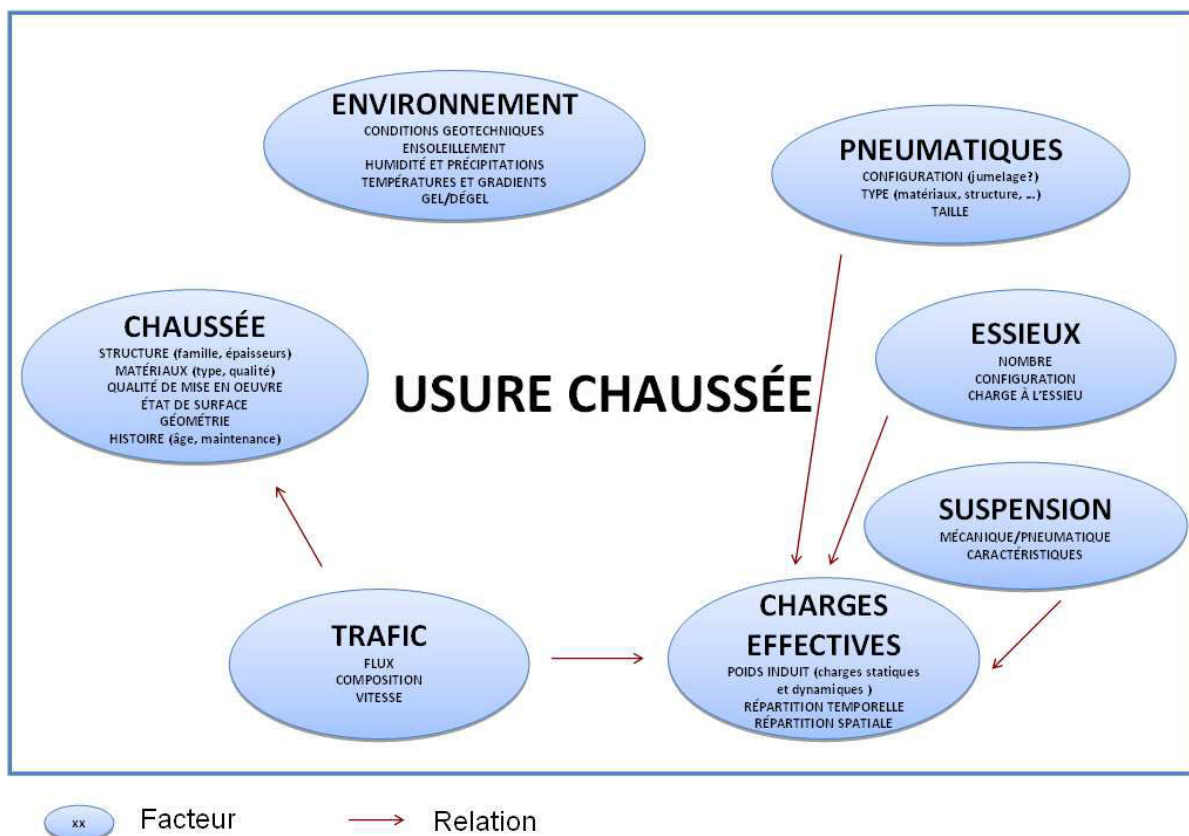


Figure 13 Facteurs principaux d'usure de chaussée (Voir sources en Annexe 4)

3.2.3 Modélisation prédictive des dégradations

Deux approches sont possibles pour déterminer des modèles : l'approche mécaniste ou physique basée sur les principes généraux de la mécanique, et l'approche déterministe qui détermine des modèles « de représentation », statistiques, ou encore qualifiés d'empiriques, qui représentent la réalité par des formules paramétriques qui reproduisent les données expérimentales. La modélisation prédictive d'usure de chaussée compte aujourd'hui essentiellement des lois empiriques, jugées insuffisantes dans l'optique d'une gestion rationnelle de l'entretien routier. C'est un domaine en constante évolution. Les lois d'évolution des chaussées ont particulièrement évolué en France à partir des années 2000 grâce à la coopération LCPC-MTQ. On doit différencier les lois en l'absence de travaux, et les lois d'effet des travaux.

3.2.3.1 Recueil de données

Des données de dégradation peuvent être recueillies par auscultation des routes circulées (protocoles de l'IQRN (voir infra) ou du Ministère des Transports du Québec (MTQ)), ou sur pistes d'essais et manèges de fatigue tels que celui de l'Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux (IFSTTAR) à Bouguenais.

A/ Sur pistes d'essai et manèges de fatigue

Une piste d'essai ou un manège de fatigue permettent de réaliser des expériences de qualité pour recueillir des mesures. Ils permettent des expériences qui présenteraient autrement trop de risques (financiers, de sécurité, etc.) comme le test de résistance à la fatigue de nouveaux matériaux routiers. Si les données obtenues sont intéressantes, de telles expériences présentent toutefois des biais expérimentaux, par exemple dues aux conditions météorologiques puisqu'on simule sur des temps courts – en quelques semaines – le trafic sur 20 ou 30 ans. Ce biais peut être plus ou moins corrigé au moyen d'une structure de référence, ou structure témoin, qui est testée simultanément aux matériaux et/ou structures innovantes évalués sur le manège, pratique courante à l'IFSTTAR par exemple. A chaque expérience, l'anneau du manège peut être subdivisé en plusieurs sections : sur le manège de l'IFSTTAR, jusqu'à 5 structures différentes de longueur comprise entre 25 et 30 m sont testées simultanément sous conditions climatiques et de chargement identiques. L'une de ces structures est une structure témoin (Grave-Bitume 3 (GB3) ou Grave-Ciment 3 (GC3) à l'IFSTTAR) dont le comportement sur réseau routier réel est connu. On transpose les comportements observés sur le manège des structures à évaluer en comportements qui seraient obtenus sur réseau réel dans un contexte normal d'utilisation, sur la base de la comparaison entre les comportements "manège" et "réseau réel" de la structure témoin. Pour simuler les variations d'humidité, l'anneau C du manège de l'IFSTTAR est équipé d'un cuvelage étanche en béton armé (paroi verticale cylindrique et radier inférieur) contenant le sol de fondation des chaussées sur une hauteur de 2.80m, et d'une station de pompage permettant de contrôler et de faire varier le niveau de la nappe dans ce sol sablo-argileux constituant le massif support des chaussées expérimentales (Balay 2008). Un autre biais est que les effets d'accélération-freinage du trafic réel ainsi que la composante dynamique des charges dépendant des suspensions PL ne sont pas prises en compte.

B/ Sur chaussées circulées

Ce type de données est plus fiable (i.e. moins de biais) puisque les mesures sont effectuées sur une temporalité longue, et donc dans des conditions de climat et de trafic réelles. Cela nécessite des tests de suivi relativement coûteux finançant équipements spécifiques pour les différents relevés (adhérence, profil en travers, uni) et main d'œuvre pour la réalisation des tests et le traitement des données. Ces données permettent de connaître l'évolution des chaussées entre les opérations de construction dans des conditions particulières de trafic et de météorologie, et donc d'évaluer la durée de vie des différentes techniques de resurfacement. De tels travaux ont été réalisés aux États-Unis : un tableau de différentes techniques de maintenance et de leur durée de vie indicative est visualisable en Annexe 6. En revanche, aujourd'hui, il n'existerait pas de recueil de données fiable et libre d'accès simple qui renseignerait les durées de vie des différentes techniques de resurfacement en France. Un tel ouvrage est un des objectifs du projet national « Durée de Vie Des Chaussées » (DVDC) dont nous parlons en 3.2.3.3. Ces informations sont nécessaires pour l'évaluation comparative des stratégies d'entretien : on ne peut pas comparer les conséquences de deux programmes d'entretien si l'on ne sait pas planifier le besoin réel de maintenance qu'aura l'infrastructure sur un temps relativement long.

3.2.3.2 Méthodes d'analyse statistique et robustesse (Lepert 2006)

À partir de données routières, des lois empiriques d'évolution des chaussées peuvent être déterminées en utilisant quatre méthodes statistiques différentes, plus ou moins adaptées à la définition de ces lois, et que nous détaillons en Annexe 7. Ces méthodes passent par une hypothèse de base sur la forme de la courbe de dégradation. Souvent, une courbe de Weibull est choisie. Lepert (2006) a comparé entre elles ces quatre méthodes. Les résultats sont synthétisés en Annexe 7, et montrent qu'aucune méthode ne remplit les 4 critères de qualité sélectionnés.

Pour une section donnée, selon Lepert (2006), il est impossible d'identifier toutes les variables explicatives de l'évolution de chaque dégradation, via son indicateur. Pour pallier cela, on applique

donc un facteur de robustesse, qui correspond à une accélération ou à un ralentissement du temps, et qui permet de mieux expliquer les observations faites sur la section. Souvent, la robustesse R est normalisée pour tendre vers 0 si la section de chaussée est extrêmement fragile comparé à la moyenne, et vers 1 si la section est extrêmement résistante comparée à une section moyenne, et par rapport à un indicateur de dégradation donné. R se calcule par rapport aux observations passées pour chaque indicateur (i.e. chaque type de dégradation). Le coefficient de robustesse améliore la fiabilité des lois, notamment en modélisation (i.e. capacité pour une loi de reproduire les observations à partir desquelles elle a été établie à +/-15%), de façon moins spectaculaire voire nulle en prédiction d'évolution des dégradations (Tableau 6). En règle générale, sur l'étude réalisée, les lois de prédiction semblent de qualité médiocre (Tableau 6).

Tableau 6 Performance des méthodes de modélisation avec et sans robustesse sur une étude menée en partenariat avec le Ministère des Transports du Québec (Lepert 2006)

Critère	Régression indirecte (%)	Régression directe	Méthodes des lois de survie
Modélisation sans robustesse	69	78	
Prédiction sans robustesse	25	42	
Modélisation avec robustesse	88	97	97
Prédiction avec robustesse	33	42	33

Selon ces résultats, aucune méthode de prédiction n'est vraiment à préconiser par différence aux autres, tandis qu'en modélisation les résultats sont meilleurs avec robustesse en régression directe ou méthode des lois de survie.

3.2.3.3 Usure structurelle

Si les modèles semblent peu nombreux sur l'évolution surfacique des routes, la recherche sur la détérioration structurelle a été prolifique. Sans viser l'exhaustivité, notre étude souhaite montrer l'évolution et la diversité des modèles ayant été développés. Les premiers travaux français concernant les lois prédictives d'évolution des chaussées – le projet SISERD (Saisie In Situ et Exploitation des Relevés de Dégradations), le projet européen PARIS et des travaux de thèses (par exemple les travaux de Rèche (2004)) – ont permis la création et l'exploitation de bases de données issues de mesures effectuées sur des sections tests (MTQ1, développée pour le compte du Ministère des Transport du Québec (MTQ)) et sur le RRN (campagnes Image Qualité des Routes Nationales (IQRN)).

A/ Loi de Miner et loi de la puissance

La durée de vie d'une chaussée peut être prédite en fonction des dommages qu'elle subit. La loi de Miner est une loi linéaire⁵³ basée sur le principe d'additivité des dommages, et qui permet de calculer quand intervient la rupture de la chaussée selon le trafic PL : quand la fatigue (i.e. somme cumulée des dommages) atteint la valeur 1. Elle est utilisée dans le dimensionnement des chaussées. La loi de la puissance proposée par l'OCDE s'appuie sur la notion d'agressivité et définit les dommages de chaussée provoqués par les véhicules en fonction de leurs caractéristiques (notation selon l'OCDE) : D_i = dommage causé par un essieu (selon la définition OCDE), P_i = poids total d'un essieu i , P_{ref} = poids de l'essieu standard (masse de 13t en France, multipliée par la gravité mais qui s'annule dans la formule de l'Équation 1), k_1 = coefficient pour le type d'essieux, k_2 = coefficient pour le type de pneu, k_3 = coefficient pour le type de suspension, α = coefficient de charge – également appelé « puissance » – et compris entre 4 pour les chaussées souples, en passant par 5 en France pour les matériaux

⁵³ En réalité, les lois linéaires sont aujourd'hui très critiquées car la performance des matériaux de chaussée n'est pas constante : elle évolue selon l'âge, les dommages, et l'entretien de la chaussée. La prise en compte de ces paramètres est relativement récente, voir TWS 2005

bitumineux, 12 pour les matériaux liés aux liants hydrauliques et jusqu'à 33 pour les chaussées rigides ou composites (dépendant des études réalisées).

Équation 1 Loi de la puissance pour le calcul de dommage proposée par l'OCDE (1992)

$$D_i = (k_1 k_2 k_3 \frac{P_i}{P_{ref}})^\alpha$$

B/ Méthode des lois de survie

Une thèse menée au LCPC a débouché sur la mise au point d'une méthode de loi de survie des chaussées. Cette méthode présente l'intérêt de pouvoir comparer l'évolution d'une chaussée avant et après entretien, selon des paramètres définissant des niveaux de détérioration que l'on peut soi-même définir. Ce travail a été effectué sur le critère de fissuration (en m/km² de chaussée) sur des sections de chaussées resurfacées d'une part et non entretenues d'autre part (BDD fournie par le MTQ). Sur la population étudiée et à long terme (11 ou 12 ans), les chaussées se dégradent moins rapidement après resurfaçage qu'avant (Rèche 2004).

C/ Autres modèles

Il existe de nombreux autres modèles, plus ou moins évolués par rapport à ceux déjà présentés. Pour la culture générale sur l'objet routier, notons par exemple les modèles de performance des chaussées reliant les dégradations des chaussées aux états de sollicitations issus de divers modèles de calcul de sollicitations (modèle élastique semi-infini de Boussinescq de 1885, modèle élastique bicouche de Westergaard de 1926, modèle élastique bicouche de Hugg de 1938, modèle élastique multicouche de Burmister de 1943, modèle élastique tricouche de Jeuffroy de 1955, modèle viscoélastique tricouche VESYS de Kenis de 1978), ou encore les modèles statistiques non linéaires étrangers (Archilla et Madanat 2000; J. Prozzi 2001; J. A. Prozzi et Madanat 2003; Hong et Prozzi 2006). Nous détaillons quelques modèles en Annexe 8.

D/ Perspectives françaises et notion de durée de vie résiduelle

Signe que le domaine est un sujet d'avenir où beaucoup reste à faire, le projet IREX (Institut pour la Recherche appliqué et l'EXpérimentation en génie civil) DVDC (pour Durée de Vie Des Chaussées) est un projet d'étude visant l'optimisation de la planification et du dimensionnement des travaux d'entretien des chaussées, et le développement d'un indicateur d'état des chaussées basé sur la notion de durée de vie résiduelle. Son objectif est de créer de la connaissance autour des lois de dégradation des chaussées dans le contexte français. Aujourd'hui, des indicateurs de durée de vie résiduelle sont calculés et utilisés dans la stratégie de gestion de l'entretien par exemple au Royaume-Uni, avec le Pavement Condition Index, ou indice d'état de chaussée. Il se calcule sur la base de la déflexion de la chaussée selon la famille de structure étudiée.

3.3 Techniques de maintenance

3.3.1 Entretien des revêtements

3.3.1.1 Généralités

Les techniques de maintenance sont nombreuses et le procédé choisi dépend de plusieurs facteurs dont le type de dégradations à traiter, l'extension de durée de vie associée à la technique et le budget alloué à l'opération principalement (voir exemples de tableaux comparatifs en Annexe 6).

La mise en œuvre doit être réalisée sur une plage de conditions météorologiques. Particulièrement, le répandage des enrobés ne doit pas se faire si la température baisse en deçà de 5°C, ou si le vent excède 30 km/h, car la vitesse de refroidissement des enrobés serait alors trop rapide pour une bonne mise en œuvre dans le cadre d'enrobés à chaud classiques.

3.3.1.2 Resurfacement

En France, les couches de surface sont refaites tous les quinze ans environ. Les Enduit Superficiel d'Usure (ESU), moins coûteux, peuvent être refaits tous les 5 à 8 ans, et restent très utilisés sur les routes moyennement à peu circulées. Ils gardent tout leur intérêt dans un contexte de restriction des budgets.

Les grands types de techniques dépendent principalement des matériaux utilisés (diamètre des granulats et qualité du bitume), de la température et de l'épaisseur de mise en œuvre. On appelle enrobé ou Béton Bitumineux (BB) un granulat enrobé de liant hydrocarboné. Il en existe plusieurs sortes : Semi-Grenu (BBSG), Mince (BBM), Très Mince (BBTM), Ultra-Mince⁵⁴ (BBUM), Drainant⁵⁵ (BBDr), à Module Élevé (BBME, résistance mécanique renforcée), pour Chaussée Souple (BBCS), à Émulsion (BBE). Selon le matériau, on adaptera l'épaisseur de la couche à mettre en œuvre. On va généralement de 1.5cm (BBUM) à 6-7cm (BBSG 0/10) voire 7-9cm (BBSG 0/14) de matériau, en passant par 2.5 cm pour les BBTM et 3 à 4cm pour les BBM. Plus récemment, on a également développé les Enrobés Coulés à Froid (ECF) pour leur faible coût et impact environnemental. Les propriétés des techniques de resurfacement varient et sont indiquées qualitativement en Annexe 9. De ces qualités dépendent le choix du type de resurfacement, par type de réseau. Pour les routes interurbaines, ces choix sont indiqués sur la Figure 14. Pour resurfer une chaussée, on vient le plus souvent raboter quelques centimètres en superficie de la chaussée, avant de déposer une couche d'accrochage qui va assurer le lien mécanique entre les anciens matériaux et la nouvelle couche d'enrobé que l'on vient déposer sur la route. Les ESU consistent, après préparation de la chaussée, à venir appliquer une ou plusieurs couches d'émulsion de bitume et de gravillons en alternance. Ils sont indiqués pour les routes communales et départementales à trafic faible, car ils traitent à la fois l'imperméabilité et l'adhérence de la voirie, pour un coût faible.

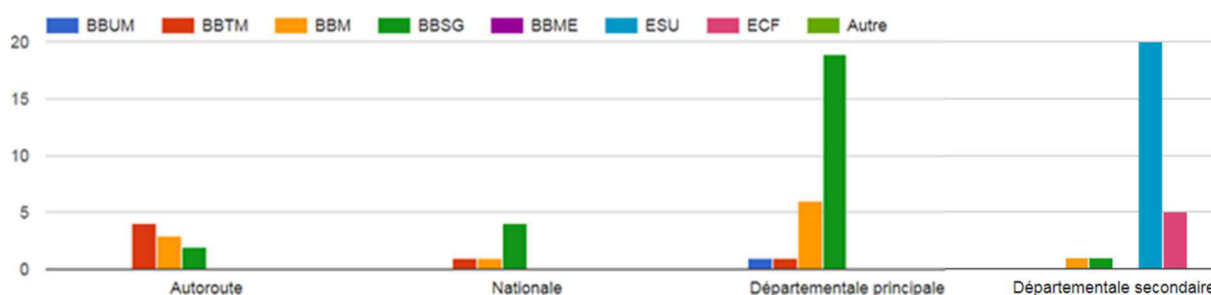


Figure 14 Techniques de resurfacement majoritaires par type de réseau entretenu selon notre enquête « resurfacement » (en nombre de gestionnaire répondants)

3.3.1.3 Traitement ponctuel des dégradations

Si le revêtement n'est pas trop endommagé, on peut traiter les dégradations de manière locale et ponctuelle. On peut ponter les fissures avec du mastic bitumineux après avoir réalisé une purge permettant d'enlever les matériaux fragilisés dans la fissure. Cela permet de rétablir l'imperméabilisation de la chaussée. On peut également utiliser un point à temps automatique (PATA) : il permet de traiter un grand nombre de dégradations dont fissures, faïençage, arrachements, nids de poule. Il permet également de rectifier l'adhérence. L'adhérence peut aussi être améliorée par grenailage, opération qui consiste à projeter des billes sur la surface routière. Elle corrige le polissage des granulats (microtexture) comme la fermeture du revêtement (macrotexture) (CEREMA 2015). L'hydro-génération, opération de projection d'eau à très haute pression sur la surface routière, permet à la fois de corriger un problème de macrotexture trop faible liée à un ressuage sur ESU, mais également les phénomènes de fermeture (CEREMA 2015).

⁵⁴ A priori plus utilisé aujourd'hui pour cause de mauvaise tenue hivernale

⁵⁵ Permet l'absorption acoustique et évite l'aquaplanage en permettant l'évacuation de l'eau

3.3.2 Système de production des matériaux

3.3.2.1 Sites de production

En amont de l'entretien routier se produisent les activités de production et de recyclage de matériaux de construction. Les principaux types de sites de production de matériaux intermédiaires ou finaux sont les raffineries (production de bitume), les carrières et gravières, les usines à liants (émulsion et bitumes modifiés ou fluxés), et les centrales d'enrobage.

Les mélanges bitume/granat sont faits en usine appelées « centrale d'enrobage ». Il en existe plusieurs types : continues ou discontinues, à chaud ou à froid. Les centrales discontinues à chaud constituent le modèle le plus courant. Leur fonctionnement général est le suivant : les agrégats de différentes catégories de granulométrie sont pré-dosés (sable, fines, graviers) et chargés dans des trémies qui les amènent jusqu'au tambour de séchage par un système de tapis roulant (i.e. « tapis extracteur »). Un brûleur chauffe un tambour rotatif qui permet d'éliminer l'humidité des agrégats et de leur faire atteindre la température de mélange, température qui varie selon le type de matériau (Tableau 7). Les granulats peuvent être re-concassés à la granulométrie désirée et repartir au criblage. Les émissions dégagées par les tambours passent dans un dépoussiéreur qui piège les particules fines (« filler » ou « fines » récupérées). Le bitume est maintenu chaud dans une cuve, Un élévateur à godet transporte ensuite les agrégats secs et chauds jusqu'au sommet de la tour d'enrobage, où des trémies séparent les agrégats par granulométrie. Les granulats sont pesés de nouveau afin de rétablir le dosage à sec, puis l'ensemble des granulats pesés, le filler (récupéré et/ou d'apport) et le bitume sont envoyés dans le malaxeur qui réalise la gâchée d'enrobé. Cette gâchée est envoyée aux trémies de stockage, avant d'être chargées en camion pour la pesée qui précède l'alimentation du finisseur.

Parmi les autres types de centrales, on retrouve les centrales mobiles qui peuvent être installées sur les chantiers importants à l'écart des agglomérations, ou les centrales « en continu », sans tour d'enrobage, qui utilisent un tambour sécheur malaxeur (TSE).

3.3.2.2 Préparation des mélanges

En plus de différents types de matériaux, les techniques de préparation des mélanges vont également changer le nom des techniques de resurfaçage et leurs indications d'utilisation.

Il existe plusieurs types de bitumes (Tableau 7). Ils sont issus de la distillation du pétrole et sont classifiés selon leur « pénétrabilité⁵⁶ », qui représente leur caractéristique mécanique (viscosité). Les 5 familles de bitume sont indiquées dans le Tableau 7.

Tableau 7 Classe de bitumes, et températures des procédés du cycle de vie (LCP 2003)

Classe du bitume	T fabrication enrobé	T répandage		Tmin compactage
		Optimale	minimale	
180-220	130-150	125-145	115	95
70/100	140-160	130-150	120	100
50/70	145-165	135-155	125	105
35/50	150-170	140-160	120	110
20/30		145-165	140	115

Depuis quelques années en effet, on essaie de réduire la température de mélange des enrobés, afin de réduire les impacts environnementaux des routes. On a ainsi vu apparaître des enrobés semi-tièdes, tièdes ainsi que des enrobés coulés à froids (ECF) (Tableau 7). Toutefois, la longévité des matériaux n'est pas nécessairement la même, de même que les conditions (vent, température) et la facilité de mise en œuvre : selon les prescripteurs, les ECF ne sont pas nécessairement indiqués pour les

⁵⁶ Le test mécanique de pénétrabilité est réalisé avec un poinçon de 100 grammes, à une température constante de 25 °, sur une durée de 5 secondes : on relève la profondeur à laquelle s'est enfoncé le poinçon

chaussées à trafics importants. De plus, afin de permettre le malaxage des matériaux sans chauffe qui vient réduire la viscosité des liants hydrocarbonés, il faut ajouter des adjuvants qui ne sont pas inoffensifs pour l'environnement.

3.3.3 Coûts des techniques

On trouve quelques ratios de coûts par techniques dans la littérature grise, néanmoins, il existe de forts effets de distorsions entre le marché de l'entretien et le coût réel. De plus, il y a une forte variabilité des coûts réels et facturés selon les opérations : chantiers de nuit, spécificités importantes, présence d'amiante, etc. Enfin, il faudrait considérer des coûts par année de vie résiduelle en bon état pour comparer les techniques. À titre informatif, nous proposons en Annexe 10 un tableau de préconisation de types d'entretien pour chaussées peu circulées selon l'état de la chaussée, avec la fréquence d'entretien nécessaire selon la technique, et une fourchette de coûts de maintien à neuf. Le MEDDE, ministère en charge des infrastructures de transport et de leur évaluation socio-économique, propose des ratios de coûts d'entretien et d'exploitation, à corriger des taux d'inflation par marché (e.g. pétrole) et à actualiser pour obtenir le coût en euros constants. La Direction Territoriale Ouest du Cerema produit également chaque année depuis 2008 un rapport d'analyse des prix des marchés publics « chaussées » et « terrassement », dont un des 3 types de travaux est l'entretien routier⁵⁷. Cet observatoire régional porte sur 120 marchés publics pour les routes départementales et nationales non concédées. Ces rapports montrent des tendances à la baisse comme à la hausse selon les types de matériaux, sans lien apparent avec le marché pétrolier.

3.3.3.1 Synthèse des résultats d'enquête

Le Tableau 8 synthétise les données recueillies pour les techniques majoritaires évoquées par les gestionnaires ayant répondu à la question de notre enquête. Certains répondants évoquent une confidentialité pure et simple des données (1 occurrence) ou indiquent « sans objet » (1 occurrence).

Tableau 8 Synthèse des données de coûts des techniques de resurfacement de l'enquête

COUT	BBSG	BBM	BBTM	ECF	ESU
MOYENNE (€TTC/M2)	17.47	14.19	9.56	4.66	3.10
OCCURRENCES	12	6	8	7	13
ECART-TYPE	7.71	3.92	4.95	0.87	1.07
MOYENNE (€HT /T)	62.0	63.50	62.0	5.18	4.85
OCCURRENCES	7	7	3	2	2
ECART-TYPE	4.05	3.15	2.00	3.29	3.75

Des données supplémentaires, à faibles occurrences (1 à 3), et correspondant à une technique au sein d'une famille sont disponibles dans notre base (e.g. ECF monocouche, ECF bicouche, ESU monocouche, ESU bicouche, MBCF, BBUM, BBDr).

3.3.3.2 Qualité des données recueillies

En termes de qualité des données recueillies : il y a davantage d'occurrences en coûts des techniques par m² qu'à la tonne, les écarts-types montrent toutefois une variabilité très forte et notamment en prix au m² (pour les BBSG, BBTM et ESU: $\sigma \approx 0.5$.moy). Les prix des enrobés à la tonne en revanche présentent des écarts-types beaucoup plus faibles et similaires entre les techniques, ce qui est tout à fait rassurant : on obtient 62 à 63.5 €HT/t sur les BBSG, BBM et BBTM, avec des occurrences de 3 (BBTM) ou 7 (BBSG, BBM) données. Sur l'ensemble de ces données, on a donc pour 17 occurrences de prix d'enrobés à la tonne une moyenne à 62.7€HT/t et un écart-type global de 3.17. Notons néanmoins que le nombre d'occurrence est peut-être moins important que le nombre de sources des données, qui est restreint à 8 répondants.

⁵⁷ <https://www.cerema.fr/fr/actualites/cout-techniques-construction-entretien-chaussees-bretagne>

Les prix annoncés par les répondants à notre enquête semblent assez concordants, nous avons voulu analyser, sur les techniques en béton bitumineux, la part du coût en matériau par rapport au coût total de la technique au m². Pour cela, nous avons multiplié la masse surfacique en enrobé de chaque technique (considération dans notre modèle environnemental : de 60 kg/m² pour le BBTM à 141 kg/m² pour le BBSG, hors mise en œuvre) par le coût moyen hors taxe de l'enrobé, produit que nous avons divisé par le prix surfacique moyen par technique calculé avec les données de notre enquête. Nous avons ensuite tracé la régression des 3 points trouvés (BBSG, BBM et BBTM). Le coefficient de détermination de cette loi analytique est excellent (voir Annexe 11). Cela montre l'inadéquation de l'index TP09, et pourrait mettre en évidence les coûts fixes par technique liés à la main d'œuvre et les machines évoqué par un répondant à notre enquête, qui dépendent peu de l'épaisseur de matériaux mis en œuvre.

3.3.3.3 Coût du granulat : impact du transport

Le transport est un paramètre du coût de l'opération de resurfacement souvent cité comme important dans les réponses de notre questionnaire. L'impact du transport du granulat sur son coût est par ailleurs un fait qui revient souvent dans la presse spécialisée : « prix doublé tous les 50 km »⁵⁸ selon un article publié dans L'USINENOUVELLE en 2010 considérant un coût d'extraction allant de 7 à 20€/t, représentant « entre 50 et 200 % du prix du granulat, selon le moyen de transport et la distance » selon Batiactu en 2012⁵⁹, « le prix du granulat double tous les 30 km » selon l'UNPG⁶⁰. Nous avons voulu quantifier un peu plus précisément l'impact du transport sur le coût du granulat d'une part mais aussi des opérations de resurfacement d'autre part, afin de savoir si nous devons considérer ce coût à part dans notre calcul d'indicateur de prix.

A/ Cas d'étude de granulats alluvionnaires

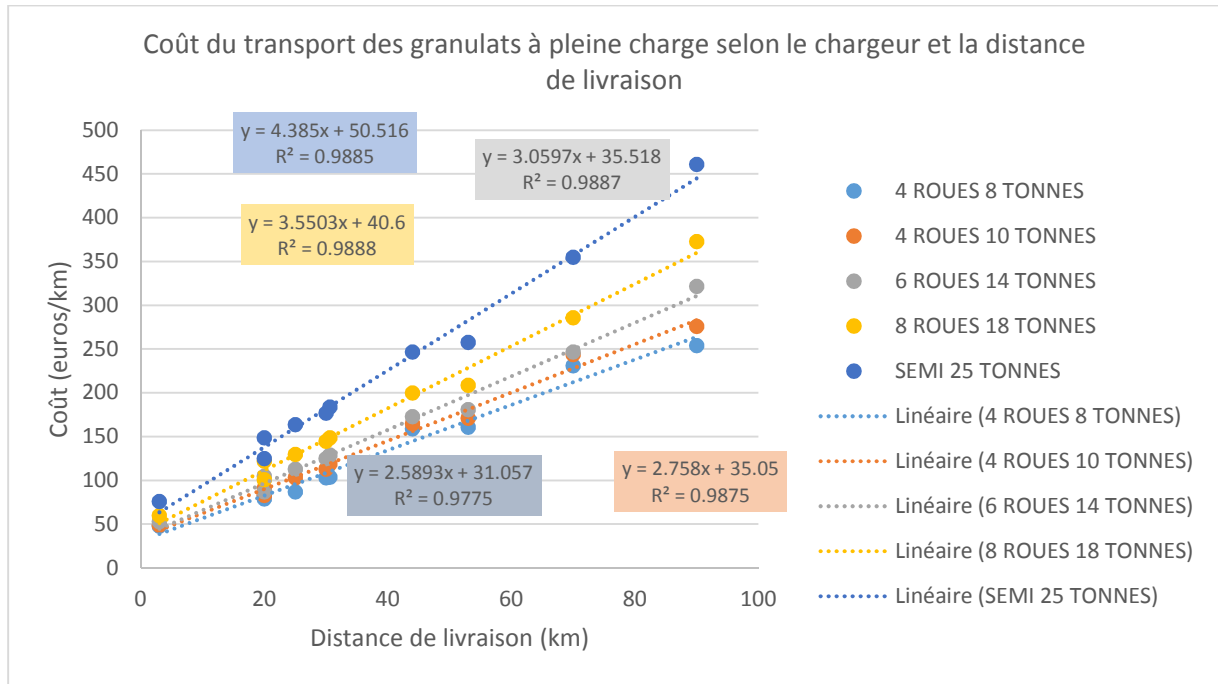
Nous avons cherché une base de données récente de prix de vente professionnels de granulats et de services de transport associés. Nous avons trouvé des données actualisées en septembre 2017 pour les granulats alluvionnaires de la carrière de la Siagne, sur le Var, à 10 km au nord de Cannes. Le prix du gravillon fin concassé (6/14) est de 30.8 €HT/t au tarif professionnel (>2t) au 1^{er} septembre 2017⁶¹. La carrière de la Siagne fournit des tarifs de transport des granulats, qui dépendent à la fois de la distance et du véhicule de livraison. À l'aide des tarifs proposés par type de véhicule et du nom de destination du chargement, nous avons associé les distances de transport (kilométrage via départementales calculé avec Google Maps) aux coûts proposés pour une dizaine de destinations prises au hasard afin de couvrir l'intervalle entier des coûts annoncés. Selon cette analyse, la corrélation entre distance de transport et coût du transport du granulat est évidente ($R^2 > 0.97$), avec un coût fixe lié au chargement et à l'amortissement du camion que l'on retrouve à l'ordonnée à l'origine des lois de corrélations tracées.

⁵⁸ <https://www.usinenouvelle.com/article/demain-les-granulats-vaudront-de-l-or.N139431>

⁵⁹ <http://www.batiactu.com/edito/maitriser-et-reduire-les-impacts-du-transport-33067.php>

⁶⁰ <http://www.unpg.fr/wp-content/uploads/unpg-fiche-transport-bat.pdf>

⁶¹ <http://www.mul-carriere.fr/tarifs.php>



En appliquant un coût à la tonne de 31€, et en utilisant nos formules de calcul de coût de transport, nous ne trouvons qu'un surcoût de 13% (semi-remorque de 25t) à 44% (18 tonnes) quand la distance de transport passe de 30 à 60 km. Un coût de 24 €HT/t pour le granulat (Holcim granulat : 0/4, 0/20, 4/20 ou 6/20 : 24 €HT/t en 2015-2016) donne quant à lui des surcoûts au doublement de la distance de transport allant de 16% (semi-remorque) à 26% (camion 8t à 2 essieux). Nous sommes donc loin des surcoûts de 100% annoncés classiquement.

B/ Critique de l'étude de cas

En 1996, selon un rapport de BRGM, le coût de production de granulats issus de roches massives était plus élevé que celui des granulats alluvionnaires. Néanmoins, la tendance semble s'être inversée, probablement face à la difficulté d'obtention des autorisations d'exploitations de gisements alluvionnaires (BRGM 1996). Ainsi, notre étude pourrait surestimer le coût moyen du granulat sans transport. En 2010, selon l'Autorité de la Concurrence, le coût du granulat était de 6 à 10 €/t⁶² quand L'USINENOUVELLE annonçait la même année une fourchette allant de 7 à 20 €/t. Le coût du granulat a donc l'air variable. Selon le site de cotation de matières premières Commoprices⁶³, le cours des cailloux et graviers en France est resté assez stable entre janvier 2012 et juillet 2017, oscillant de +/- 0.5 €/t autour de 9 €/t. Entre juillet 2017 et janvier 2018, il a connu un fort pic atteignant 15.36 €/t en août. En février 2018, il était redescendu à 10.68 €/t. En considérant que les coûts de transport annoncés par la carrière de la Siagne sont représentatifs de la situation économique nationale actuelle et en réalisant une analyse de sensibilité locale sur le coût d'extraction à la tonne de granulat, nous arrivons à des surcoûts maximaux de 34 à 48% selon le camion de livraison utilisé en passant de 30 à 60 km de transport pour un coût d'extraction de granulat de 7 €/t. Or, ce coût d'extraction est extrêmement bas. À 10 €/t, le surcoût maximal passe à +41% : le coût du transport sur le prix total va de 42-58% pour 30 km par la route à 55-70% du coût global si le granulat parcourt 60 km. Pour 90 km de transport routier, on atteint les +58 à 83% sur le coût du granulat livré (par rapport à un granulat transporté sur 30 km), pour des parts du coût du transport atteignant 77%. À 15 €/t, on descend à un

⁶² http://www.autoritedelaconcurrence.fr/pdf/avis/10DCC98decision_version_siteAC.pdf

⁶³ https://commoprices.com/fr/c/Mat%C3%A9riaux/Cailloux,graviers,pierres/Cailloux-et-graviers/nc8_25171010

surcoût allant de 22 à 34% selon le camion en doublant la distance de transport et une part du transport pouvant atteindre 61%.

Ainsi, les messages relégués dans la presse sont variés mais différent du chiffrage initial et de l'étude de sensibilité large que nous venons de réaliser. Pour un enrobé à 95% de granulat et 5% de liant bitumineux, si l'on considère un coût de 10 €/t de granulat à l'extraction et un transport en camion 10-14t pour un coût total du granulat de 20 €/t, ainsi qu'un coût de la tonne de bitume de 261€ (marché français, septembre 2017⁶⁴), le coût en matière première se répartit à 41% pour le liant et 59% pour le granulat. Si l'on considère que le coût matière s'élève, avec un transport sur 30 km du granulat, à 50% du coût de l'opération d'entretien selon l'index TP09, et que respectivement doubler ou tripler la distance du transport du granulat augmente son prix de 41 ou 82%, on atteint donc un surcoût potentiel sur la technique de +12% quand on double la distance de transport du granulat et de 24% quand on la triple. Cette variation reste faible dans le cas du doublement de la distance de transport dans les conditions de marché actuelles des matières premières et compte tenu des variations locales repérées dans notre enquête. Notons qu'avec ce doublement ou triplement de la distance de transport, la structure des coûts en matières premières passe alors respectivement à 1/3 en liant et 2/3 en granulat ou ¼ liant et ¾ granulat. Mais notons encore une fois la volatilité du cours du pétrole, et donc du bitume, qui était en mai 2012 deux fois supérieur à ce qu'il était en septembre 2017.

3.3.3.4 Synthèse

Nous avons souhaité confronter les coûts des techniques obtenus après traitement statistique des réponses des gestionnaires des routes interurbaines françaises à notre questionnaire à d'autres données. Une première confrontation à un groupe de gestionnaires autoroutiers français a confirmé nos ordres de grandeur. Une base de données partielle ibérique est disponible sur internet. Les données pour les ESU coïncident également.

3.3.4 Mode opératoire

Nous traiterons ici des travaux de resurfacement complets, et pas de l'entretien léger.

3.3.4.1 Déclenchement des travaux

Le déclenchement des travaux dépend théoriquement d'indicateurs de niveaux de service principalement (Corté, Goux, et al. 1994). Basés sur un niveau initial (après resurfacement), les niveaux se dégradent petit à petit et peuvent progressivement atteindre 4 seuils. Le premier seuil, seuil d'alerte, apparaît quand les dégradations sont perçues par le technicien (fissures, faïençage). S'ensuit le seuil d'intervention optimal. Ensuite vient le seuil de sensibilité des usagers, quand ceux-ci perçoivent à leur tour la dégradation (nids de poule, déformations profondes de type orniérage, flashes ou affaissement en rive par exemple). Enfin, le dernier seuil atteint est celui d'intervention limite : sans action, le risque est de ruiner la chaussée.

On peut considérer que la couche de surface d'une chaussée ne remplit plus ses fonctions si les dégradations superficielles sont trop importantes ou si l'adhérence est insuffisante. Dans le premier cas, les dégradations (≈80% des causes de resurfacement sur autoroutes⁶⁵) ne permettent plus l'étanchéité du revêtement (risque de dégradation structurelle rapide sous l'effet de l'eau) et entraînent un inconfort de l'utilisateur (solllicitations verticales des véhicules). Dans le second cas, la diminution de l'adhérence génère un sur-risque d'accident (≈20% des causes de resurfacement sur autoroute).

⁶⁴ https://commoprices.com/fr/c/Energie/Cokes/Bitume-de-p%C3%A9trole/nc8_27132000

⁶⁵ À dire d'expert, échange informel avec la direction du patrimoine d'une SCA

3.3.4.2 Étapes de mise en œuvre

Les techniques d'entretien sont plus ou moins rapides. Globalement, le mode opératoire pour refaire la surface d'une chaussée suit ce qui est décrit dans cette section.

1. Rabotage ou fraisage

Cette étape n'est pas obligatoire en « overlay », i.e. quand on se contente d'ajouter une couche de surface. Si besoin, on commence par utiliser une *raboteuse* qui va retirer la couche superficielle usée du tapis routier. Ces machines sont plus ou moins imposantes (jusqu'à plus de 4m d'emprise), montées sur pneus ou sur chenilles. Les matériaux retirés, appelés agrégats ou fraisats d'enrobés, sont de plus en plus réutilisés dans les nouveaux matériaux. Selon la profession, la réutilisation des agrégats d'enrobés à taux faible (<25%) est courante, à taux fort (25-50%) est techniquement maîtrisée, à très fort taux (50-70%) peut être réalisée dans des conditions particulières, et au-delà de 70% pose des problèmes soit de disponibilité des agrégats, soit de qualité⁶⁶. Récemment, certaines entreprises de construction ont tout de même développé des matériaux appelés « 100% recyclés » qui sont en phase d'expérimentation⁶⁷. La norme NF EN 13108-8 fournit les spécifications techniques d'utilisation d'agrégats d'enrobés en France (AFNOR 2016).

2. Engravures en rive

Sur certaines sections, on peut réaliser des « engravures en rive », c'est-à-dire que l'on vient griffer le revêtement mis à nu par fraisage sur environ 1m de largeur et entre 2 et 6cm d'épaisseur sur les côtés de la chaussée. Cela permet d'assurer une meilleure adhérence entre ancien et nouveau matériaux. Avant de reprofiler ou de refaire l'enrobé, il faut venir nettoyer le support afin d'assurer un accrochage maximal entre matériaux : on fait passer une balayeuse aspiratrice.

3. Reprofilage

Selon le cahier des charges, un reprofilage peut être nécessaire afin de rétablir l'uni de la route. Cette étape se réalise au finisseur ou à la niveleuse.

4. Répandage

Réalisé conformément à la norme NF P 98-150-1 article 9 (AFNOR 2010c), il consiste à épandre le nouvel enrobé sur la chaussée, si possible en pleine largeur car les joints ne présentent généralement pas une bonne longévité. On utilise un finisseur grande largeur ou deux ou plusieurs finisseurs agissant en parallèle afin de permettre aux matériaux de se fixer entre eux à chaud aux jointures. Un finisseur va remplir les fonctions à la fois de répandage, nivellement, lissage et pré-compaction.

5. Compactage

Le compactage consiste à tasser les matériaux pour obtenir un certain niveau de vide des matériaux mis en œuvre, et donc des caractéristiques techniques particulières. La composition de l'atelier de compactage va dépendre de la nature des enrobés, de l'épaisseur de mise en œuvre et de leur utilisation. À noter que le bon compactage d'un matériau va dépendre de sa maniabilité, donc de sa température dans le cas des enrobés à chaud classiques. Un guide très détaillé a été réalisé par le LCPC

⁶⁶ http://www.hauts-de-seine.fr/fileadmin/PDF/Cadredevie/Gestion_de_l_environnement/IDEES/ClubIDEES_-_USIRF-Christine_LEROY.pdf

⁶⁷ <https://www.usinenouvelle.com/article/eurovia-experimente-le-premier-enrobe-100-recycle-sur-une-autoroute.N753054>

en 2003 afin de donner des spécifications techniques pour les enrobés hydrocarbonés à chaud (LCPC 2003). Il faut veiller à ne pas trop compacter afin de ne pas réduire l'adhérence.

6. Joints et raccordements

Toute opération de resurfaçages va faire apparaître des joints dont la réalisation est régie par la norme NF P 98-150-1 article 9 (AFNOR 2010c):

- des joints longitudinaux si l'on n'utilise pas un finisseur qui permet de couvrir toute la largeur de chaussée,
- des joints transversaux de reprise si l'engin de répandage a été arrêté,
- ou des raccordements à la voirie existante entre nouveaux et anciens matériaux. Dans ce dernier cas, on crée des engravures biaisées par rapport à l'axe longitudinal de la chaussée.

Cas particulier des ESU

Les ESU ne vont pas être réalisés comme les autres techniques de resurfaçage : si une opération de balayage est nécessaire au préalable de toute opération, on va ensuite utiliser des *épanduses de liant* qui vont enduire la surface routière de liants une première fois sur les anciens matériaux, puis après passage des *gravillonneurs* qui viennent épandre les gravillons. Après avoir passé une ou plusieurs couches de liants et gravillons et procédé à chaque fois à un compactage qui vient enchasser les granulats dans la couche de liant, on vient passer de nouveau la balayeuse-aspirateur afin d'éliminer les rejets de gravillons.

3.4 Pratiques opérationnelles de la maintenance

Il est difficile de saisir dans leur entièreté et leur hétérogénéité les pratiques opérationnelles d'entretien des routes en France. D'abord, ces travaux peuvent être publics ou privés. En effet, le Chiffre d'Affaire (CA) de l'industrie routière est constitué à plus de 50% par les marchés publics : 3% pour l'État, 2% pour les régions (pas de réseau routier à charge), 12% pour les départements et 43% pour les Communes. Néanmoins, le secteur privé représente 30% du CA, tandis que les grandes entreprises publiques contribuent à presque 12%, dont 4% pour les SEM. Ensuite, les gestionnaires des routes publiques sont variés : la maintenance du RRN non concédé est gérée par les DIR, tandis que le réseau national concédé est géré par les SCA. La gestion des RD est assurée par les conseils départementaux, tandis que les communes sont en charge de l'entretien des routes communales. Nous proposons ici un tour d'horizon français des pratiques opérationnelles de l'entretien routier interurbain, basé sur une étude de littérature, des rencontres avec la profession routière, et une enquête diffusée auprès des gestionnaires. L'USIRF a publié un rapport étudiant les dépenses de gestion, d'entretien et d'investissement routiers en France sur la période 2011-2015 de 9 départements (3 catégories (très, moyennement, peu peuplés) avec une population d'individus égale et variée du point de vue de l'état financier), mais il n'existe pas de données de budget d'entretien par classe de route (USIRF 2015).

3.4.1 RRN non concédé

La réduction des enveloppes budgétaires allouées à l'entretien routier ainsi que les fortes contraintes temporelles de réalisation des opérations du fait des trafics élevés du réseau national sous gestion publique pousse à adopter une politique de maintenance routière réduite comparée aux décennies passées, bien que l'entretien préventif semble toujours globalement prôné.

3.4.1.1 Généralités : exploitation du questionnaire

Le Réseau Routier National non concédé (RRNnc) est géré par les DIR. Notre enquête met en évidence des budgets d'entretien globaux moyen de 25 millions d'euros par an, avec une forte disparité (écart-

type de 11 millions), en partie expliquée par la différence de linéaire, puisque l'on obtient un budget moyen de 22 k€/km.an avec un écart-type tombant à moins de 5 k€/km.an, différence pouvant peut-être s'expliquer par une variabilité en terme de superficie (routes 2x1 voie ou 2x2 voies, avec ou sans séparateurs, BAU et bandes dérasées). Le budget d'entretien des surfaces est en moyenne de 17 M€/an (écart-type : 7 M€/an), soit 55% du budget global (3% d'écart-type), contre 45% de budget pour l'entretien structurel. Sur autoroute, ces gestionnaires sont 1/3 à utiliser majoritairement⁶⁸ le BBSG, 1/3 à utiliser le BBM et 1/3 à utiliser le BBTM. Sur routes nationales, le BBSG est la technique de resurfacement principalement choisie par 2/3 d'entre eux, contre 1/6 utilisant à parité le BBM et le BBSG et 1/6 utilisant à 60% le BBTM et à 40% le BBSG. Un des deux gestionnaires utilisant beaucoup le BBM sur autoroute a en fait une utilisation des techniques assez variées : il utilise également le BBTM sur autoroutes, le BBSG puis l'ESU ou l'ECF sur bidirectionnelles non autoroutières. Ces données d'utilisation des techniques sont issues à 65% de BDD et à 35% de l'expertise du gestionnaire répondant. Les matériaux utilisés sont variés selon le chantier à réaliser. Parmi les spécificités, on retrouve le choix du granulats : 0/10 pour le BBM, 0/10 ou 0/6 (moins bruyant) pour le BBTM, 0/10 voire 0/14 pour le BBSG. Pour le liant, on utilise un bitume pur pour le BBSG, modifié pour le BBM et le BBTM soumis à des trafics plus élevés, voire fortement modifié dans les zones de fortes contraintes (accélération – décélération – changement de file).

3.4.1.2 IQRN : auscultation, base de données et notation routière

A/ Notation IQRN (DGITM 2015)

Le patrimoine constitué par le RRN non concédé est évalué par l'outil IQRN depuis 1992⁶⁹. Ce système d'évaluation et de suivi des chaussées du réseau routier permet d'attribuer trois notes à chaque tronçon routier de 200m tous les trois ans : une note de surface N_s dépendant des défauts de surface et du niveau d'adhérence, une note de patrimoine N_p concernant le potentiel structurel de la chaussée, et enfin une note globale N_g correspondant à la note la plus basse entre N_p et N_s .

Pour attribuer les notes, le pourcentage de dégradations est estimé sur chaque section élémentaire de 200m par des appareils de mesure sur voie et par l'étude de photos de la chaussée par des analystes du CEREMA. Ensuite, à chaque section est affectée une solution conventionnelle de travaux nécessaires pour ramener la chaussée à l'état de référence, et une estimation du coût des travaux conventionnels de remise à l'état de référence en est déduite, fournissant une note entre 0 et 20 à chaque section, à partir de l'éventail des coûts. Les dégradations qui caractérisent l'état structurel sont les déformations transversales (i.e. orniéage), les fissures longitudinales et le faïencage, les réparations, les fissures transversales et en dalles pour les structures à assise traitée aux liants hydrauliques, les joints longitudinaux, les fissures diverses, et les arrachements graves. La note de surface est déterminée en fonction des déformations transversales (ED), des dégradations de revêtement (glaçage, ressuage et arrachements) (EDR), et de l'adhérence (Coefficient de Frottement Transversal (CFT) et Profondeur Moyenne de Profil (PMP)). Elle est égale à la note minimale de ces quatre caractéristiques : CFT⁷⁰, PMP⁷¹, ED et EDR.

⁶⁸ Sur plus de 80% des chaussées

⁶⁹ En Suisse, le système de notation de l'entretien des chaussées s'appelle l'indice GEC (gestion d'entretien des chaussées) : entre 0 et 0.6, l'état est bon, entre 0.6 et 2.2 il est moyen, entre 2.2 et 3 il est considéré suffisant, entre 3 et 3.8 il devient critique et entre 3.8 et 5 il est déclaré mauvais (Département des infrastructures du canton de Vaud, 2010).

⁷⁰ Se mesure au SCRIM (Sideway force Routine Investigation Machine): au pas de 10 m, roue « envirée » de 20°, vitesse de 60 km/h, film d'eau de 0.5mm, charge statique à la roue de 200 kg, pneu lisse AVON 76x508 gonflé à 3.5 bars, spécification CEN TS 15901-6, centre vérificateur basé à Lyon, mesure selon la norme ISO 13473-1 (AFNOR 2004a)

⁷¹ Se mesure au rugolaser : mesure profilométrique selon la NF EN ISO 13473-1 (AFNOR 2004a), au pas de 10m, indépendante de la vitesse, sur chaussée sèche (émetteur laser et potentiomètre optique qui déduit la profondeur du profil en fonction de l'angle de réception du faisceau laser), centre vérificateur basé à Angers

B/ Base de données

Le système d'information des infrastructures linéaires de l'État est assez foisonnant (Annexe 11). Il contient des données de connaissances du patrimoine routier, comme des données d'exploitation, d'investissement, d'ingénierie et de pilotage. Le Système d'Information pour la Gestion du réseau routier national (SIGR) inclut ISIDOR et ISIMAGE. Il a été développé afin d'aider les DIR dans leur gestion du patrimoine routier, de capitaliser, partager, valoriser et diffuser les données, de fournir des indicateurs sur le réseau routier national permettant d'élaborer des politiques routières ou de mesurer leur mise en œuvre, de répondre aux questions de la Cour des Comptes sur la valorisation du patrimoine routier, et enfin de répondre aux obligations européennes de la directive INSPIRE de diffusion des données. Il contient à la fois les données du Réseau Routier National concédé (RRNc) et RRNnc. Ces données ne sont accessibles qu'aux acteurs ayant accès au réseau du MEDDE.

Les données IQRN sont gérées par le CEREMA et accessibles via « ISIDOR », plateforme d'interrogation du système. Un manuel d'utilisation du système est mis à disposition en ligne avec un contact d'assistance électronique. L'historique de données date de 1998, mais celles-ci ne sont pas complètes. Elles consistent en : un référentiel routier (bornage, gestionnaires, itinéraires, ...) et d'ouvrages d'arts (ponts, murs,...), les caractéristiques géométriques du réseau routier, des données d'entretien, d'exploitation et de qualité des chaussées, de trafic, de viabilité hivernale, d'accidents, et de passages à niveaux. Les données ponctuelles renseignent des informations sur les panneaux et portiques, les données linéaires sur les sections de trafic et les glissières, et les données surfaciques incluent les zones naturelles, occupation du sol et autres. Le système de localisation (PR + abscisse et PLO + abscisse) est donné selon les coordonnées géographiques en Lambert 93, avec un couplage d'une base de données géographique (BDTopo de l'IGN). ISIMAGE contient les séries d'images qui sont acquises par les DIR dans le cadre des campagnes IQRN avec le dispositif Imagerie Routière par Caméra Numérique (IRCAN, caméra numérique haute résolution fixée sur le toit d'un véhicule)

3.4.1.3 Patrouillage

Le réseau est surveillé grâce à des missions de patrouillage périodiques, qui permettent de détecter sur le terrain les défauts qui pourraient avoir un impact sur la sécurité de l'utilisateur, ou sur la pérennité de l'infrastructure. Le patrouillage permet également de suivre l'état du trafic et de détecter des situations perturbées. Afin que le patrouillage soit fiable et systématique, il convient de le programmer : sa fréquence minimale peut être fixée en fonction d'un niveau de trafic. Elle peut être renforcée en fonction des spécificités du trafic (avant les heures de pointe du matin et du soir en grandes agglomérations par exemple, en pointes saisonnières, en chantiers sous circulation, risque de gel, etc.).

3.4.1.4 Interventions sur le réseau

Comme le RNnc s'étend sur toute la France, il est dirigé localement par les DIR. Dans chaque centre d'exploitation et d'intervention (CEI) des DIR, une équipe d'intervention doit être mobilisable en permanence. Ainsi, il est possible d'intervenir à toute heure et en tout point du réseau. En journée, les équipes patrouilles sont affectées à des activités facilement repliables (e.g. équipe de patrouillage) de manière à être en mesure d'intervenir rapidement. Une même équipe peut donc assurer le patrouillage et les interventions. En dehors des horaires de travail programmés, une équipe est placée en astreinte. Souvent est mis en place un 2x8 de « jour », et une astreinte de nuit.

Selon le nombre d'interventions moyen, une organisation de type 3x8 peut aussi être mise en place. Dans les secteurs à faible trafic, l'équipe d'intervention en astreinte peut être mutualisée entre deux CEI voisins, si le temps de route est de l'ordre d'une demi-heure et si le nombre d'interventions annuel est faible (moins d'une cinquantaine par CEI et par an).

3.4.2 RRN concédé

L'approche de la maintenance est un peu différente pour les SCA françaises qui, en tant que sociétés proposant un service, sont d'une certaine façon davantage contraintes d'offrir une haute qualité de service pour générer du chiffre d'affaire (attractivité des infrastructures) et préserver leur image de marque, et de rendre compte de cette performance à l'État via un certain nombre d'indicateurs inscrits dans le contrat de plan État-SCA qui régit les obligations de cette dernière. De plus, les réseaux que les SCA gèrent ont une importance particulière à l'échelle du pays du fait des trafics supportés et de leur influence économique territoriale.

3.4.2.1 Données patrimoine

Les SCA possèdent des BDD souvent de très bonne qualité avec un très bon historique, comparées aux bases des routes gérées par le public qui même au niveau du RNnc et même sur la dernière décennie ne sont pas très complètes. À titre d'exemple, Cofiroute produit un catalogue de structures depuis 40 ans (1^{ère} autoroute de son réseau : A10-A11 (La Folie-Bessin-Thivard) en 1972). Aujourd'hui, il émet chaque année un rapport de mesures en voie de droite au 1^{er} janvier, ainsi qu'un catalogue des structures. Le premier présente les mesures : notations en bande d'onde, CFT, dégradations. Le second contient le repérage des tronçons, les voies, les points singuliers, les entretiens détaillés et structures en coupe réelle (voie rapide puis voie lente), les derniers entretiens, ainsi que les risques amiante et hydrocarbure aromatique polycycliques (HAP).

3.4.2.2 Utilisation des données

Ces données permettent de déterminer un indicateur de confort lié à l'uni longitudinal en ondes courtes et à l'orniérage et un indicateur de sécurité lié aux caractéristiques de surface : adhérence (CFT, PTE (=profondeur de texture équivalente)) et uni. De plus, la valeur de certaines mesures permet de réaliser un entretien préventif afin de conserver à tout moment des conditions de sécurité irréprochables du point de vue de l'adhérence.

3.4.3 Réseau départemental

3.4.3.1 Recueil de données hétérogène

Chaque conseil départemental gère ses chaussées comme il le souhaite, et les disparités en termes de gestion patrimoniale sont énormes sur le Réseau Routier Départemental. Le département du Nord est par exemple très équipé pour l'entretien des routes. En revanche, d'autres conseils départementaux ne disposent que de peu de moyens, et réalisent peu de gros travaux. Ces disparités de moyens s'expliquent par plusieurs raisons : la réalité du territoire départemental (réseaux départementaux existants, moyens financiers, choix politiques, climat, ...), et son histoire, liée aux lois de décentralisation : quel réseau et quels moyens existaient avant les lois successives ? En partie du fait de ces décentralisations, un même département gère des routes de typologies diverses, à l'instar du CG33 qui possède environ 6500 km de routes, soit un réseau presque aussi long que le réseau autoroutier français dont 3000 km sont des routes principales et sont soumises à des relevés à grands rendements – i.e. relevés des profils en long et de l'uni par équivalent M3 (méthode 3). Le « petit réseau » quant à lui est ausculté par GSR, développé avec l'IFSTTAR (Ph. Lepert).

Certains conseils départementaux (CD) sont en avance sur le recueil de données (trafic, etc.) comme celui du Nord (59). Le CD44 a également servi de terrain d'expérimentation pour la récolte de données smartphones, avec GPS embarqués⁷².

⁷² Il s'agit du projet Miranda mené par l'IFSTTAR sur différents tronçons de routes départementales principales et secondaire (Martin et al. 2015)

3.4.3.2 IQRD

Nous n'avons pas de liste complète, mais certains CD ont adapté l'IQRN à la gestion de leur RD. En effet, en 1996, l'« Image Qualité » a été étendue aux Départements propriétaires et gestionnaires de leurs réseaux qui le souhaitent. Ce fut le cas du Val de Marne suite au transfert de routes nationales à son réseau début 2006. Le CG94 a lancé une expérimentation de mise en place d'un IQRD sur 60 km de son réseau inspiré de l'IQRN en 2012. D'autres départements ont lancé récemment des appels d'offre pour déléguer la constitution et la gestion de bases de données routières, tandis que certains n'utilisent pas du tout le principe de l'IQRD pour gérer leurs réseaux.

3.4.4 Réseau communal

Peu étudié, il représente pourtant un linéaire d'environ 600 000 km, soit 2/3 du réseau routier français. Certaines routes communales peuvent soutenir un trafic très intense : c'est le cas par exemple du périphérique parisien dont la capacité de 2100 véhicules/heure est souvent atteinte, et dont le niveau de trafic excède 250 000 véhicules/jour sur plusieurs tronçons (IAU 2013). La route constitue le premier patrimoine des communes, avec une moyenne de 17 km par commune (Cula 2011). Les routes communales coûtent en moyenne 110 euros par habitant et par an (contre 90 euros pour le réseau départemental)(Corniou 2012). L'entretien des routes peut constituer un budget très important pour certaines petites communalités et même se révéler réellement difficile à assumer. Il va de soi que les moyens d'entretien sont très variables, entre les réseaux à fort enjeu comme le périphérique de la Ville de Paris et les petites routes de campagne peu fréquentées.

3.5 Outils d'aide à l'entretien routier

Il existe plusieurs outils de gestion de la maintenance routière. Certains ont été développés avec le seul but de gérer l'entretien routier selon des critères spatiaux, temporels et/ou budgétaires. D'autres sont des outils plus globaux sur les routes incluant l'évaluation de projets neufs et/ou de programmes d'entretien.

3.5.1 Outils de gestion patrimoniale routière

En dehors de l'outil IQRN utilisé sur le réseau non concédé qui a déjà été décrit en 3.4.1.2 et des protocoles de reporting d'indicateurs de performances des SCA auprès de l'État (Loi Organique relative aux Lois de Finances (LOLF)), des outils spécifiques ont été développés pour la gestion patrimoniale des infrastructures routières.

3.5.1.1 GiRR : simulation de dégradation et priorisation sous contrainte budgétaire

Le logiciel GiRR pour « Gestion Intelligente des Réseaux Routiers » a été développé par Ph. Lepert au LCPC en France. GiRR est un système d'aide à la gestion de l'entretien routier qualifié de « première génération » par son auteur (Lepert 2006). C'est davantage un outil technique de détermination de programme via une évaluation qu'un moyen de gestion prévisionnelle, avec des aspects prédictifs, sociaux, et économiques. Il a été développé à partir de 1991 dans le cadre de la contractualisation DR-DDE, mis en service entre 1992 et 1996, et a évolué jusqu'à 2002. Il contient deux modules fonctionnels : un module de simulation de l'état des chaussées précis à 6 ans, et un module d'aide à la programmation des travaux. Ce système d'aide à la décision pour la gestion de l'entretien routier permet d'affecter les budgets annuels d'entretien routier sur un réseau, et comprend trois modules : un module d'évaluation du patrimoine routier et de ses besoins d'entretien, un module d'analyse de stratégies d'entretien routier, et enfin un module de programmation des travaux. C'est un outil destiné aux réseaux routiers importants, à savoir RRN et RD. La dernière version du logiciel s'appelle L²R et est aujourd'hui utilisé par une quinzaine de collectivités importantes (départements, métropoles), et également par une dizaine de pays africains.

3.5.1.2 Autres outils

Dans la même veine, les outils GEVU⁷³ – à destination des grandes agglomérations urbaines – et FIGULINE⁷⁴ – à destination des petites agglomérations – permettent également d'évaluer les besoins de travaux et à mettre en œuvre ces travaux de manière optimisée. Toujours en France, le logiciel d'établissement de diagnostic et de solutions de travaux ERASMUS est utilisé depuis 1985 afin d'optimiser les travaux pour l'entretien et la réhabilitation des routes. D'autres logiciels existent de par le monde, sous le nom générique de Pavement Management Systems (PMS), dont sont dotés de nombreux États aux États-Unis et ailleurs. La Californie fut l'un des premiers à utiliser un PMS en 1979. Les logiciels de PMS sont très nombreux : Deighton Total Infrastructure Management System (Iowa), PavePRO Manager (Arizona, Illinois, Ontario, ...), StreetSaver MTC PM Software (Baie de San Francisco, Oregon, ...), SMEC PMS (Colorado, Australie, Asie, Afrique, Amérique), MicroPAVER PMS (États-Unis (EU), Canada), ... Selon certains experts français, les DoT, ministères des transports des États aux USA, utiliseraient moins les PMS que les HPMS – pour Highway Performance Monitoring System – qui sont communément utilisés dans la démarche permettant de demander des budgets d'entretien à Washington. Citons enfin un outil récent d'aide au choix technique : Tracc-Expert (Baumann 2012).

3.5.2 Outils globaux

3.5.2.1 Tracc-Expert

Développé par un projet mené en partenariat entre l'Espagne, le Portugal et la France (CEREMA Sud-Ouest, CD de Haute Garonne et SPRIR Midi-Pyrénées), le logiciel Tracc-Expert permet d'évaluer (de manière plutôt qualitative) une centaine de techniques d'entretien routier sur leurs performances globales – techniques, environnementales et économiques. Sans affranchir les opérationnels des études de dimensionnement, ce logiciel permet néanmoins d'orienter les décideurs vers une solution adaptée à leurs contraintes : budget, besoins, savoir-faire des opérateurs. D'un point de vue pratique, l'on peut s'identifier comme maître d'ouvrage, comme maître d'œuvre ou encore comme entrepreneur, ce qui permet d'accéder à des fonctionnalités variées adaptées (choix stratégiques de construction ou d'entretien, étude de projet ou socioéconomique, objectifs de performance holistiques). Selon le choix stratégique, plusieurs solutions techniques sont proposées, présentant les notes aux divers critères correspondant aux catégories d'objectifs, des notes pondérées par catégorie et une note totale selon la pondération choisie. Les techniques sont présentées dans le détail (mise en œuvre, performance, etc.). L'évaluation finale contient une note relative aux conditions et contraintes d'exploitation, à l'environnement, à la technique, à l'acceptabilité sociale, aux conditions de travail et répercussions, une note économique, et enfin une note sur les coûts directs. Ces données sont basées sur plusieurs chantiers de référence, qui sont eux-mêmes plus ou moins détaillés par des fiches chantiers. Cependant, les fiches sont souvent partiellement remplies, car certains chantiers ont été réalisés 20 ans avant le projet TRACC. Les chantiers récents sont très bien renseignés en règle générale : localisation, caractéristiques environnementales, géométriques, structures, faisabilité, formulation, ainsi qu'une sous-fiche contenant des relevés visuels. Les chantiers référencés sont côtés par les anciens Laboratoires Régionaux des Ponts et Chaussées (LRPC, maintenant devenus CETE du CEREMA), les CD, et les constructeurs routiers.

Sans entrer davantage dans le logiciel, il semble plutôt complexe à manipuler du fait des nombreux choix de techniques d'entretien et critères de notation. De plus, la notation finale manque de transparence.

⁷³

http://www.cvrh-nancy.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/grr_gestion_reseaux_routiers_cle5638f1.pdf

⁷⁴

<https://www.lemoniteur.fr/article/un-logiciel-simple-adapte-a-la-gestion-de-l-entretien-des-voies-communales.1411879>

3.5.2.2 Le développement incrémental du Highway Development and Management (Kerali, Odoki, et Stannard 2006)

L'outil Highway Development and Management, plus communément appelé HDM-4 2.0 dans sa dernière version, est un outil initialement développé sous le nom de Modèle du Coût de la Route (Highway Cost Model ou HCM) par le MIT sur demande de la Banque Mondiale en 1972. HCM avait pour but de gérer et d'évaluer économiquement les projets d'infrastructures routières dans les pays en développement et, en fonction de cette évaluation, de motiver l'attribution de prêts aux projets. HCM fut suivi du Modèle pour la Conception et l'Entretien des Routes (Highway Design and Maintenance Standards Model ou modèle HDMS) développé en 1976 à nouveau par le MIT, puis par RTIM2 en 1982 (Parsley et Robinson 1982), et enfin par HDM-III en 1987 (Watanatada et al. 1987). En 2000, l'Association Mondiale de la Route (AIPCR) est intervenue dans le pilotage du développement d'un nouveau modèle, HDM-4, mené par l'université de Birmingham. La dernière version d'HDM-4, HDM-4 2.0, est parue en août 2005. L'AIPCR est propriétaire d'HDM-4. HDM-4 2.0 est un outil d'aide à la décision qui analyse les infrastructures routières en visant une approche en cycle de vie. Ses fonctionnalités sont multiples, et vont de la programmation des travaux et de la gestion budgétaire à l'évaluation multicritère des projets et aux études d'impacts. Les impacts sur les usagers, qu'il s'agisse du confort ou des coûts d'exploitation de véhicule, sont pris en compte. HDM-4 aurait été utilisé dans plus d'une centaine de pays. Parmi les études menées, citons la réorganisation de l'entretien routier au Gabon approuvée par la Banque Mondiale en 2007, l'entretien et les projets routiers au Kosovo sur financement de l'Union Européenne, l'élaboration d'un programme quinquennal de travaux routiers en Ouzbékistan financé par la Banque asiatique, ou encore la post-évaluation de projets au Honduras financé par Millenium Challenge Corporation⁷⁵.

4 Véhicules routiers

Comme nous l'avons déjà dit, la circulation des véhicules est responsable d'une partie des dégradations des infrastructures routières. Mais l'infrastructure est également en partie responsable de la rapidité d'usure des véhicules. En effet, les différents éléments composant un véhicule s'usent à des vitesses différentes et variables, dépendant entre autres de l'âge et des kilomètres parcourus, mais également des sollicitations du véhicule liées aux conditions de surface des infrastructures et de la conduite de l'utilisateur. On peut appréhender l'usure des véhicules par le couple âge-usage des véhicules, ce qui est particulièrement adapté dans le cas des véhicules particuliers.

À noter également la difficulté d'estimer la seconde vie des véhicules, quand ceux-ci sont exportés en Afrique en fin de vie française par exemple. Cela pourrait être quantifié grâce aux données douanières obtenues via le formulaire EX1, mais ces données ne semblent pas exploitées.

4.1 Parc français

4.1.1 Typologies

4.1.1.1 Véhicules

A/ Véhicules Légers et Poids Lourds

Les véhicules se classent en deux grandes catégories : les PL définis par la norme NF P 98-082 (AFNOR 1994)⁷⁶ comme des véhicules dont le Poids Total Autorisé en Charge (PTAC) est au moins égal à 3.5 tonnes, et les véhicules légers dont le PTAC est inférieur à 3.5 tonnes. Les PL peuvent être des véhicules transportant des marchandises (camions, tracteurs routiers, remorques et semi-remorques... qu'il conviendrait de qualifier de Poids Lourds de Fret « PLF ») ou de passagers (autocars, autobus). Malgré

⁷⁵ <http://www.hdmglobal.com/>

⁷⁶ Norma actualisée en 2017 après rédaction de cette partie du mémoire mais dont les éléments chiffrés restent cités exacts.

la norme NF P 98-082 (1994), l'expression PL fait majoritairement référence aux PLF dans la littérature, presse, etc.

Les Véhicules Légers (VL) peuvent être des Voitures Particulières (VP), des Véhicules Utilitaires Légers (VUL), des deux-roues motorisés (2RM). Ces grandes typologies sont ensuite segmentées selon d'autres caractéristiques : VP en voitures petites, moyennes ou grandes par exemple (d'autres segmentations et sous-segmentations existent), PLF selon leur PTAC, ...

B/ Répartition modale (MEDDE 2013)

En matière de transport intérieur terrestre de voyageurs en 2011, 84% des déplacements étaient effectués à bord de VP soit 813 milliards de voyageur.km, contre 11% en transports ferrés et 5.7% en PL (autobus et autocars). En transport intérieur terrestre de marchandises sur territoire français compté en tonnes.kilomètres, le mode routier représentait 84% du trafic en 2011, contre 9.1% pour le fer, 4.8% pour les oléoducs et 2.1% pour le fluvial. 63% de ce transport était effectué sous pavillon français⁷⁷.

C/ Répartition des silhouettes PLF

La grande majorité des PLF circulant sur le réseau français sont des PL 5 essieux ou plus (en 2004-2005), suivis par la classe PL2 des PL à 2 essieux. Parmi les PL5, la catégorie la plus rencontrée est noté T2S3, pour 2 essieux sur le tracteur et 3 essieux (soit un tridem) sur le semi-remorque (Tableau 9).

Tableau 9 Répartition des silhouettes du trafic PLF sur le RRN (en %) (Source : auteur ; Chiffres issus du Sétra (2009d))

	Répartition PLF sur Routes Nationales	Répartition PLF sur Autoroutes	Répartition PLF sur Réseau Routier National
PL2	31	20	25
PL3	6	4	5
PL4	15	16	15.5
PL5	44.2	58.9	53.2

4.1.1.2 Parcs roulant et statique (MEDDE 2013)

Il faut différencier le parc roulant du parc statique. Le parc roulant est représenté par des véhicules-kilomètres réalisés par type de véhicules. Le parc statique est donné en termes de nombre total de véhicules et pourcentages par types détenus – basés souvent sur les cartes grises, mais sans indication d'utilisation de ces véhicules⁷⁸. Le parc statique français comptait 32 millions de VP au 1^{er} janvier 2012, et 940 300 PL⁷⁹, dont 31% de camions, 21% de tracteurs routiers, 4.9% de remorques, 33% de semi-remorques, 7.0% d'autocars et 2.7% d'autobus. Les VUL représentent presque 6 millions de véhicules.

4.1.2 Inventaires et projections

4.1.2.1 Types d'inventaires

Il existe plusieurs inventaires de parcs roulants routiers français : le parc IFSTTAR, le parc CITEPA, les données du gouvernement (SOeS), les données de la CCFA, les parcs FLEETS et SYBIL, et enfin des parcs locaux (Bordeaux et Grenoble) (CEREMA 2016). Ces inventaires proposent des projections, par exemple à horizon 2030. Les parcs IFSTTAR et CITEPA divergent jusqu'à plus de 20% à ces horizons, avec une plus grande part de technologies alternatives considérées par l'IFSTTAR (CEREMA 2016).

⁷⁷ Désigne les PL enregistrés en France

⁷⁸ Sur un tronçon, la composition du trafic en catégories COPERT se comptabilise en parc roulant (le parc moyen est un vecteur avec % des différentes catégories), alors que dans une approche s'appuyant sur une EMD, la description des caractéristiques du parc statique de l'individu ou du ménage permet d'aller jusqu'aux facteurs d'émissions avec les autres paramètres du déplacement...

⁷⁹ Avec le nombre de camions au 1^{er} janvier 2010

4.1.2.2 Choix

L'évaluation de l'impact d'une politique publique doit se faire à moyen et long termes, et nécessite donc d'utiliser des projections permettant d'estimer des scénarii d'évolution possible des paramètres clés des modèles (et donc des caractéristiques des parcs). Différents travaux de recherche viennent compléter ou enrichir le modèle de parc CITEPA. Ces travaux ont été réalisés au LTE afin de prévoir l'évolution du parc français entre 1970 et 2025 (Hugrel et Joumard 2004). Une révision en profondeur et l'extension à 2030 ont été proposées par André et al. (André, Roche, et Bourcier 2013), et plus récemment, l'évolution de la structure du parc a également été revisitée par un groupe de travail piloté par l'IFSTTAR, afin d'actualiser un parc roulant 1970-2030. Ces travaux incluent notamment les apports de la thèse de Z. Kolli sur les lois de survie et le renouvellement du parc automobile (Kolli 2012). Nous préférons le parc IFSTTAR, qui est plus actuel que les autres dans le contexte national.

4.2 Usure des véhicules

L'usure d'un véhicule dépend de plusieurs facteurs comme le kilométrage cumulé, l'âge, mais également les conditions d'utilisation, le type de véhicule et la maintenance. Elle dépend également de la période de conception du véhicule : ainsi, d'anciennes générations de véhicules ont eu par exemple des carburateurs qui se déformaient à haute température, ou des carrosseries qui se dégradaient rapidement car elles n'étaient pas protégées par cataphorèse, procédé qui n'est apparu que vers la fin des années 70 dans l'industrie automobile. On peut considérer deux grandeurs pour estimer l'utilisation maximale en cycle de vie d'un véhicule : sa durée de vie et sa longévité kilométrique. Le parc automobile français présentait début 2015 un âge moyen de 8.7 ans (CCFA 2015). L'âge d'un véhicule est en règle générale bien corrélé avec son kilométrage cumulé (Kolli 2012). Nous allons maintenant nous intéresser aux pièces d'usure des véhicules.

4.2.1 Pneumatiques

Les pneumatiques routiers sont constitués de polymères – du caoutchouc vulcanisé mélangé à d'autres matériaux. L'usure des polymères correspond à une perte de matière de surface due aux mouvements de cisaillement interfaciaux entre le polymère et la surface avec laquelle il est en contact.

4.2.1.1 Marché français

A/ Segmentation

Les types de pneumatiques qui nous intéressent sont les pneumatiques automobiles dits « de tourisme », les pneus VUL, et enfin les pneumatiques PL. 25 millions de pneumatiques tourisme sont vendus en France chaque année, contre 1.5 millions de pneus SUV, 2.3 millions de pneus camionnettes et 1 million de pneus PL (Europool-SNCP⁸⁰). Les types de clients sont : de première monte, de deuxième monte, ou de monte occasionnelle (pneus neiges, etc.). Selon le syndicat des professionnels du pneu⁸¹, 65% de ce marché correspond à des pneus de rechange, quand le tiers restant est qualifié « de première monte », soit équipant des véhicules neufs. Les pneus de VUL sont des pneus VP renforcés en dimensions et caractéristiques mécaniques (résistance à la charge et renfort des flancs)⁸². Leur prix peut ainsi représenter un surcoût de 30% comparé aux pneus VP²⁴.

B/ Origine des pneumatiques français

L'Europe produit environ 300 millions de pneumatiques par an dans ses usines. Elle en consomme 260 millions de remplacement, et représente 25% du marché mondial du pneumatique en 2014. Elle importe 116 millions de pneumatiques et en exporte 62 millions (Eurostat 2014). En 2014, la France a importé 2/3 des pneumatiques consommés sur l'année (INSEE 2016). Le détail des provenances est

⁸⁰ <https://www.lecaoutchouc.com/economie/les-marches-du-pneumatique>

⁸¹ <http://www.lesprofessionnelsdupneu.com/>

⁸² pneus.ooreka.fr/comprendre/pneu-utilitaire

indiqué dans le Tableau 10. L'industrie pneumatique française est globalement en berne, avec -25% de production entre 2010 et 2014 (ETRMA 2017). Le groupe Michelin, qui détiennait 12 des 16 usines de production de pneumatiques du territoire en janvier 2017 (ETRMA 2017), a annoncé en 2015 qu'il fermerait 3 usines européennes à horizon 2018, du fait de la concurrence asiatique. Il semblerait donc que la tendance soit à une baisse de la production et consommation d'origine française, bien que la croissance ait repris chez Michelin entre 2014 et 2015 (ETRMA 2017).

Tableau 10 Pays producteur des pneumatiques consommés en France (Source : auteur ; chiffres : Insee, Douanes 2014⁸³)

Pays producteur	Consommation française	
	Mds€	%
Chine	147	5.50%
Italie	193	7.22%
Pologne	267	9.99%
Royaume-Uni	298	11.14%
Espagne	436	16.31%
Allemagne	463	17.31%
France	870	32.54%

4.2.1.2 Cycle de vie

A/ Durées de vie

La durée de vie d'un pneumatique automobile est déterminée par l'épaisseur de la gomme en bande de roulement, la qualité de la gomme ainsi que par des facteurs liés à la conduite et à la route. Le type de véhicule, qui influe sur la taille des pneumatiques, est également un facteur important. L'ordre de grandeur de la durée de vie moyenne actuelle d'un pneu de tourisme serait d'environ 45000 km (chez Michelin⁸⁴, en 1998 la médiane kilométrique valait 33 000 km en Europe (Le Maître, Süssner, et Zarak 1998).

Aujourd'hui, les pneumatiques PLF peuvent parcourir en moyenne 200 000⁸⁵ km (E&Y 2016), 25% de plus s'ils sont recreusés⁸⁶, 200 000 de plus s'ils sont rechapés (i.e. réutilisation de la carcasse pneumatique) et encore 25 % supplémentaires si les pneus rechapés sont à leur tour recreusés (Michelin 2007). En 2015, 40% des pneus de PL vendus en France étaient rechapés (E&Y 2016). Une maintenance optimale des pneus PLF permet de parcourir une distance 2.5 fois plus longue que la distance moyenne réalisée par les pneus PLF. Ceci s'explique principalement par la différence du volume de gomme usable sur les différents pneus considérés, bien que la pression engendrée sur la route par les pneus PLF (environ 0.8 MPa) soit 4 fois plus importante que celle des pneus VP (environ 0.2 MPa) et donc que l'usure par adhésion voire abrasion soit relativement plus importante : sans considérer le rechapage et le recreusage, un PLF présente des pneumatiques plus grands (en largeur de bande de roulement et diamètre) et une épaisseur de gomme en bande de roulement plus élevée que ceux équipant les VP, d'où un volume de gomme à user plus important.

Un pneumatiques PL rechapé coûterait par ailleurs environ 40% moins cher qu'un pneumatique de première monte, et permettrait d'augmenter l'adhérence de 10% et d'économiser jusqu'à 2L de carburant aux 100 km⁸⁷.

B/ Fin de vie

⁸³ <https://www.insee.fr/fr/statistiques/fichier/1908485/if54.xls>

⁸⁴ michelin.com

⁸⁵ Extrapolé de la longévité kilométrique de 220 000 km pour un pneu PL haut de gamme

⁸⁶ L'opération de recreusage auprès revendeur spécialisé coûterait entre 20 et 25 € par pneu (xlpneus.com)

⁸⁷ transport.michelin.fr/Produits/Le-recreusage-le-rechapage

Lorsqu'un pneumatique ne peut plus être utilisé, que l'épaisseur de gomme de la bande de roulement soit trop fine ou que sa résistance mécanique soit devenue trop faible, l'on peut soit réutiliser le pneumatique – entièrement après rec्रेसage, partiellement si l'on ne réutilise que la chape – soit le recycler. L'European Tyre & Rubber Manufacturers Association récapitule les différentes façons de recycler les pneumatiques en fin de vie selon le catalogue de recyclage européen (réglementation REACH) sur un schéma visualisable en Annexe 12. Selon l'European Tyre & Rubber Manufacturers Association (ETRMA 2009), 22% des pneumatiques usagés (toutes catégories confondues) en Europe des 15 sont réutilisés, 3.7% étant réutilisés directement ou après rec्रेसage, 12% après rechapage, et 6% étant exportés pour utilisation. 74% des pneumatiques usagés sont valorisés énergétiquement dans les centrales thermiques ou utilisés en tant que matériau industriel (bâtiment, routes et autres). Les 4.5% restants sont mis en décharge (interdit en Europe depuis juillet 2006) ou non tracés (voir détail en Annexe 7).

4.2.1.3 Usures

A/ Différents types d'usure (Barquins 2010; Zeng 2013)

Les pneumatiques assurent l'interaction entre le véhicule et la chaussée. Concernant les pneumatiques routiers, deux usures entrent en ligne de compte : la *dégradation des caractéristiques mécaniques de la carcasse pneumatique*, et l'*usure de la gomme de la bande de roulement par adhésion* (i.e. enlèvement de matière par cisaillement ou déchirement après un contact intime avec les aspérités en regard), par *abrasion* (i.e. effet de coupe produit par des aspérités anguleuses du contre-matériau ou des particules d'un troisième corps), *fatigue* (i.e. processus dû aux chargements-déchargements cycliques impliquant un dommage structurel croissant, s'accompagnant souvent par la formation de fissuration. La progression de la fissuration peut ensuite générer une perte de particules) ou éventuellement par *corrosion* (i.e. attaque chimique de la surface) voire *érosion* (i.e. une particule solide, liquide ou gazeuse empiète sur une surface). Cette usure de la gomme, mesurée via la perte de gomme en g/100km par exemple, est dépendante de la surface de chaussée puisque la gomme des pneumatiques frotte sur le revêtement de surface, mais également d'autres facteurs.

La *détérioration mécanique* est une *usure de fatigue*, provoquée par la répétition des sollicitations mécaniques induites par l'interaction chaussée-véhicule. Cela cause l'apparition de fissure puis leur propagation, et ainsi une élimination de matière (des particules se détachent).

Ces différents modes d'usure sont souvent combinés.

La détérioration des pneumatiques est principalement due au *contact glissant* entre la bande de roulement et la *microtexture* du revêtement routier, et dans une moindre mesure à la présence de défauts de surface : *uni*, nids de poule, ornières ou joints, et imperfections diverses affectant la *mégatexture*.

B/ Facteurs d'usure

La Figure 15 représente les principaux facteurs d'usure des pneumatiques. Les frottements entre pneumatiques et chaussées dépendent des propriétés à l'interface gomme-sol, donc des conditions environnementales telles que la température, l'humidité, la composition chimique atmosphérique (Zeng 2013). Dans le cas de l'humidité, si l'on considère le cas extrême d'aquaplanage, l'on comprend bien comment l'humidité peut réduire les frottements gomme-chaussée et donc l'usure pneumatique. L'étude de Le Maître et al. (1998) et concernant les VP (échantillon représentatif du parc européen) montrait que l'usure pneumatique variait dans un rapport 2 selon la saison (donc l'humidité, la température, ...). Les caractéristiques de surface de la route, telle que la microtexture, font varier l'usure selon un rapport 2 à 3 (Le Maître, Süssner, et Zarak 1998). En effet, une microtexture forte permet une bonne tenue de route par temps sec mais génère une usure par abrasion du pneumatique (voir Figure 10).

Le type de pneumatique, d'après des critères de taille (dont dépendent la raideur et le volume de gomme usable), de sculptures (voir en Annexe 13 un tableau comparatif des pneumatiques selon le type de sculpture), de matériaux... était responsable d'une variation de l'usure pneumatique d'un facteur 3 en 1998 (Le Maître, Süssner, et Zarak 1998). Considérant les avancées technologiques des pneumatiques (remplacement de l'agent renforçant constitué de noir de carbone par des dérivés de silices, et passage d'une majorité de pneus à carcasse diagonale par des pneus radiaux), ces chiffres devraient avoir évolué aujourd'hui. La pression de gonflage est également importante dans l'usure pneumatique, et une mauvaise pression de gonflage provoque une usure non homogène de la bande de roulement et donc une durée de vie raccourcie⁸⁸.

Toujours d'après Le Maître et al. (1998), le coefficient d'impact global imputé au style de conduite vaudrait 6 tandis que celui lié à la trajectoire vaudrait 15. Le véhicule lui-même, à travers l'alignement de ses roues (géométrie du train roulant), aurait un coefficient d'impact de 1.5, pour un coefficient global du facteur véhiculaire incluant poids et suspensions équivalent à 2.

En plus de cela s'ajoute dans le groupe de facteurs «véhicule » la puissance⁸⁹ du véhicule considéré : un véhicule dont la puissance est élevée possède un potentiel d'accélération important, ce qui peut amener à une sollicitation supérieure des pneumatiques. Un véhicule électrique userait plus rapidement la gomme de ses pneus car le couple maximal est disponible sans latence contrairement au moteur thermique où cet état n'est atteint que pour certains régimes (voir la comparaison du couple maximal de véhicules thermiques et électriques de puissances maximales similaires en Annexe 14) : l'accélération au démarrage par exemple est plus rapide et sollicite davantage les pneus, générant ainsi une abrasion plus forte. Ceci doit être exploré plus avant.

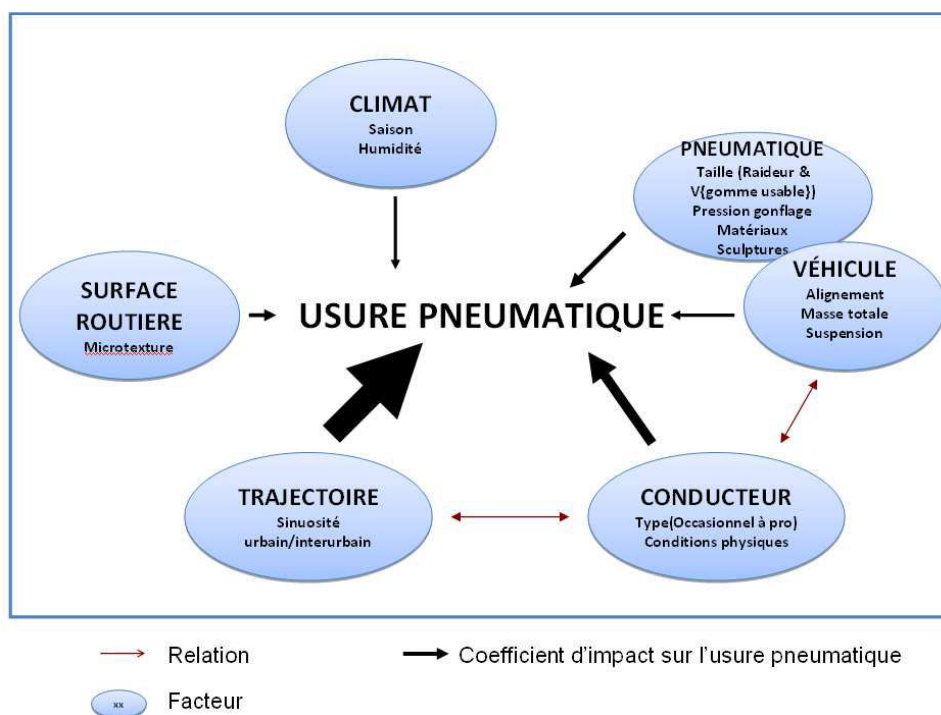


Figure 15 Facteurs principaux d'usure pneumatique VL et coefficients d'impact (Inspiré de (Le Maître, Süssner, et Zarak 1998))

⁸⁸ Michelin.com

⁸⁹ Un moteur thermique se caractérise par : sa puissance P en watt ; son couple disponible C en mètre-newton ; sa vitesse de rotation ω en radians/seconde ; reliés entre eux par la relation : $P = C\omega$. On voit donc pourquoi la consommation dépend du régime moteur, i.e. vitesse de rotation moteur (Boudet 1999).

À noter qu'il n'y a généralement pas de relation directe entre coefficient de friction et usure polymère (Zeng 2013).

C/ Évaluation de l'usure

L'usure pneumatique peut être étudiée suivant trois techniques différentes et complémentaires : en laboratoire, sur pistes d'essais ou sur routes. En laboratoire, les machines sont souvent composées d'un cylindre rotatif de grand diamètre dont les surfaces latérales (intérieures et/ou extérieures) sont recouvertes d'une couche abrasive ou de revêtement routier sur laquelle on applique un pneumatique sur roue avec des taux de glissement variés. L'usure peut être évaluée – selon la distance parcourue ou/et les conditions particulières de sévérité d'utilisation – par la perte de poids de gomme ou l'amincissement de la bande de roulement. La seconde méthode est plus rapide et économique, et permet une étude fine de localisation de l'usure. D'après l'étude de Le Maître et al. publiée (1998), un usage sévère des pneumatiques correspondait à l'époque à une perte de gomme de 7.8 g/100km, un usage modéré à 3.3 g/100km, un usage en milieu urbain à 2.8 g/100km, et un usage sur autoroute à 0.5 g/100km. Notre estimation actuelle d'usure d'un pneumatique type tourisme de référence 185/60R15 ayant parcouru 50 000 km sur cycle de vie (donnée Michelin) vaut en moyenne 1.0 g/100km. Cela correspond à un usage mixte moyen. Pour un pneumatique PL de longévité kilométrique de 100 000 km (donnée Michelin), cette perte de gomme serait environ de 13.6 g/100km.

B/ Modélisation de l'usure pneumatique

Un modèle d'usure pneumatique a été développé par Watanatada et al (1987) sur lequel est basé le calcul d'usure pneumatique dans HDM-4. Carpenter et Cenek (1999) ont ensuite proposé une formule permettant d'évaluer l'impact des conditions de trafic (comparaison à même vitesse moyenne de l'usure pneumatique en trafic congestionné et trafic fluide) sur l'usure des pneumatiques. Ce modèle a ensuite été calé pour les VP moyennes et les PL. Ce facteur de congestion est inclus dans notre schéma présentant les facteurs d'usure et leurs coefficients d'impact au sein du facteur « trajectoire ».

4.2.2 Usure des pièces détachées (Odoki et Kerali 2000)

On désigne sous l'appellation « pièces détachées » les pièces à changer durant la vie du véhicule autres que les pneumatiques.

4.2.2.1 Durée de vie

Les pièces détachées d'un véhicule n'ont pas toutes la même durée de vie moyenne, et leur vitesse d'usure dépend en partie de l'utilisation faite du véhicule et de l'environnement dans lequel évolue le véhicule.

La littérature sur le sujet est plutôt faible. À titre d'exemple, un tableau proposant des ordres de grandeur de longévité de pièces est visualisable en Annexe 15.

4.2.2.2 Facteurs d'usure

La Figure 16 représente une carte des facteurs d'usure des pièces de rechange des véhicules, et les interactions existant entre ces facteurs. Ces facteurs sont principalement issus du modèle de consommation de pièces détachées proposé dans HDM-4.

En ce qui concerne la surface, le facteur considéré par le modèle d'HDM-4 est l'IRI, ce facteur n'étant dimensionnant qu'à partir d'une valeur minimale de 3. Il semblerait pourtant que la mégatexture impacte également l'usure globale du véhicule (voir Figure 10).

Le véhicule lui-même, du fait de son état (en lien avec son utilisation) et de la qualité de ses pièces détachées, possède un impact sur la rapidité d'usure des pièces. Sans parler, dans le cas du véhicule électrique, de l'incertitude concernant la durée de vie des différents types de batteries (Rapport du CAS (Syrota et al. 2011)).

Les variations de vitesse, impliquant des accélérations (et décélérations), et dépendant elles-mêmes de la fluidité du trafic, du type de conduite, de la géométrie de la route, des obstacles et des frictions en bord de route (exemple : arrêts de bus, stands sur les bords de route, voies d'insertion), affectent l'usure de la voiture et donc celle de ses pièces détachées.

Par défaut, le modèle HDM-4 considère qu'une consommation énergétique supérieure à la moyenne de 10% (correspondant à davantage d'accélérations) implique une surconsommation en pièces détachées d'1%. Cette consommation additionnelle de carburant est elle-même calculée à partir du « bruit d'accélération⁹⁰ » et de la vitesse véhiculaire.

Enfin, l'environnement, qui ne semble pas clairement pris en compte dans HDM-4 (mais se retranscrit probablement dans le calage (ou calibrage, par francisation du terme anglais « calibration ») des modèles), est certainement un facteur important d'usure des pièces. Par exemple, un air humide et salé génèrera une détérioration des pièces métalliques plus rapide du fait de conditions favorisant l'oxydation. De même, l'ensoleillement et les intempéries provoqueront une usure accélérée de la peinture de la carrosserie : les assurances voitures coûtent davantage si le véhicule est garé en extérieur, une place de stationnement couverte à l'aéroport est plus onéreuse qu'en extérieur...

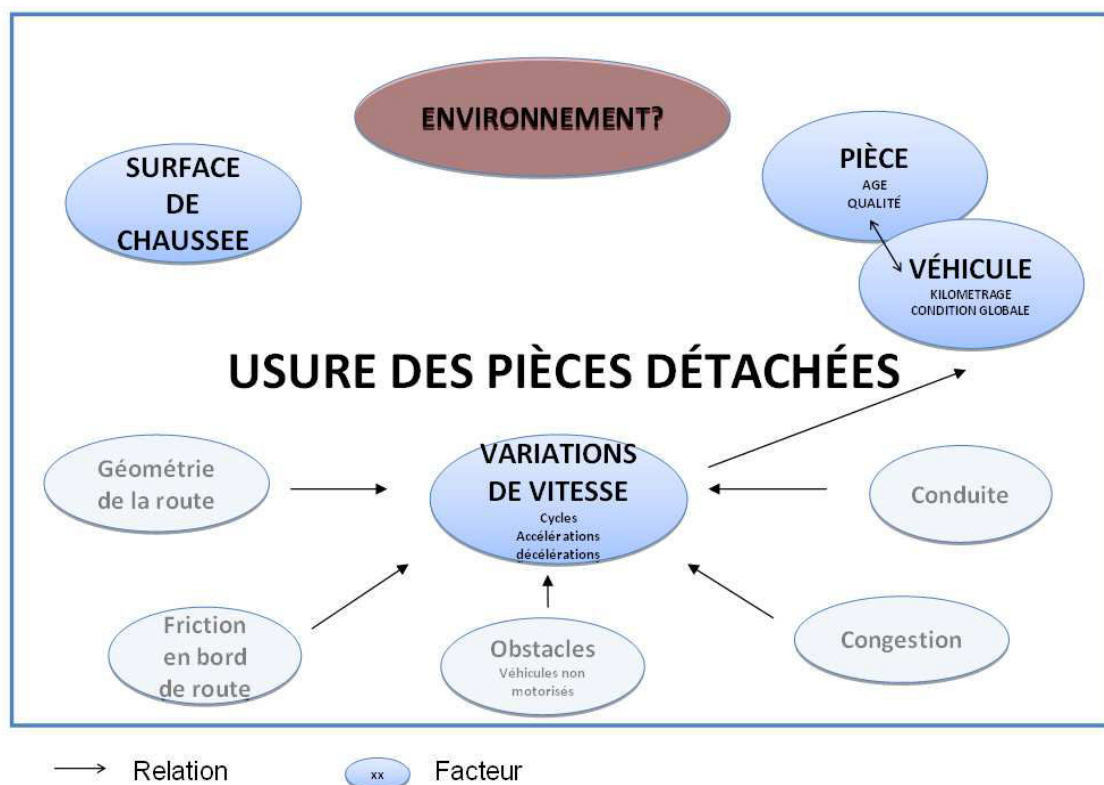


Figure 16 Facteur d'usure des pièces détachées automobile

4.2.2.3 Modélisation

Comme évoqué précédemment, HDM-4 propose un modèle d'usure des pièces détachées automobile, ou plutôt un modèle de consommation de pièces détachées. Cette consommation se base entre autres sur une longévité kilométrique du véhicule considéré et sur l'IRI.

4.3 Consommations énergétiques et émissions

Dans cette partie est considérée la consommation énergétique des véhicules et leurs émissions. L'énergie consommée est principalement issue de produits hydrocarbonés – diesel ou essence – et

⁹⁰ Le bruit d'accélération fait référence à la mesure de la sévérité des changements de vitesse : c'est l'écart-type des accélérations (voir (Odoki et Kerali 2000)).

plus rarement de l'électricité, dans le cas de l'électromobilité qui sera rapidement évoquée. En France, l'évaluation des impacts environnementaux du transport a débuté vers la fin des années 70 avec un focus d'abord énergétique via les travaux sur les Budgets Énergie-Transport (Orfeuil 1984) suivi, à partir du milieu des années 90 par des considérations sur les émissions de polluants locaux puis de gaz à effet de serre. Des modèles tels que ADEME-DEED (Dupont, Hivert, et Papaix 2013) ont été développés afin d'évaluer divers polluants comme les oxydes d'azote, le monoxyde de carbone, les composés organiques volatils et les particules fines (PM10, PM2.5). On applique ensuite ces modèles de consommation et d'émissions sur des parcours types en se basant sur des cycles de conduite ou sur des tronçons d'infrastructures.

4.3.1 Déterminants de la consommation

La puissance moteur totale requise pour se mouvoir dépend de la puissance requise pour contrer les forces d'opposition au mouvement et avancer à la vitesse désirée, de celle requise pour le fonctionnement des accessoires, de la puissance nécessaire pour contrer la friction interne dans le moteur, et de l'efficacité de la transmission. Rappelons également que l'énergie consommée par le véhicule est égale au produit de la puissance moteur totale requise et du temps de fonctionnement du véhicule, mais que le rendement moyen aux roues n'est que de 14 à 26% de l'énergie consommée du fait des pertes diverses (transmission, mise en chauffe, alimentation, arrêts et fonctionnement à puissance non maximale, ... (US Department of Energy 2013). Nous détaillons par la suite les principaux facteurs de consommation énergétique, représentés sur la Figure 17 .

4.3.1.1 Facteurs de résistance au mouvement

La consommation énergétique d'un véhicule est directement liée aux forces de résistance au mouvement qui lui sont appliquées, puisque ces forces doivent être contrées pour que le véhicule puisse se mouvoir. Nous présentons les éléments de résistance au mouvement sur la Figure 17.

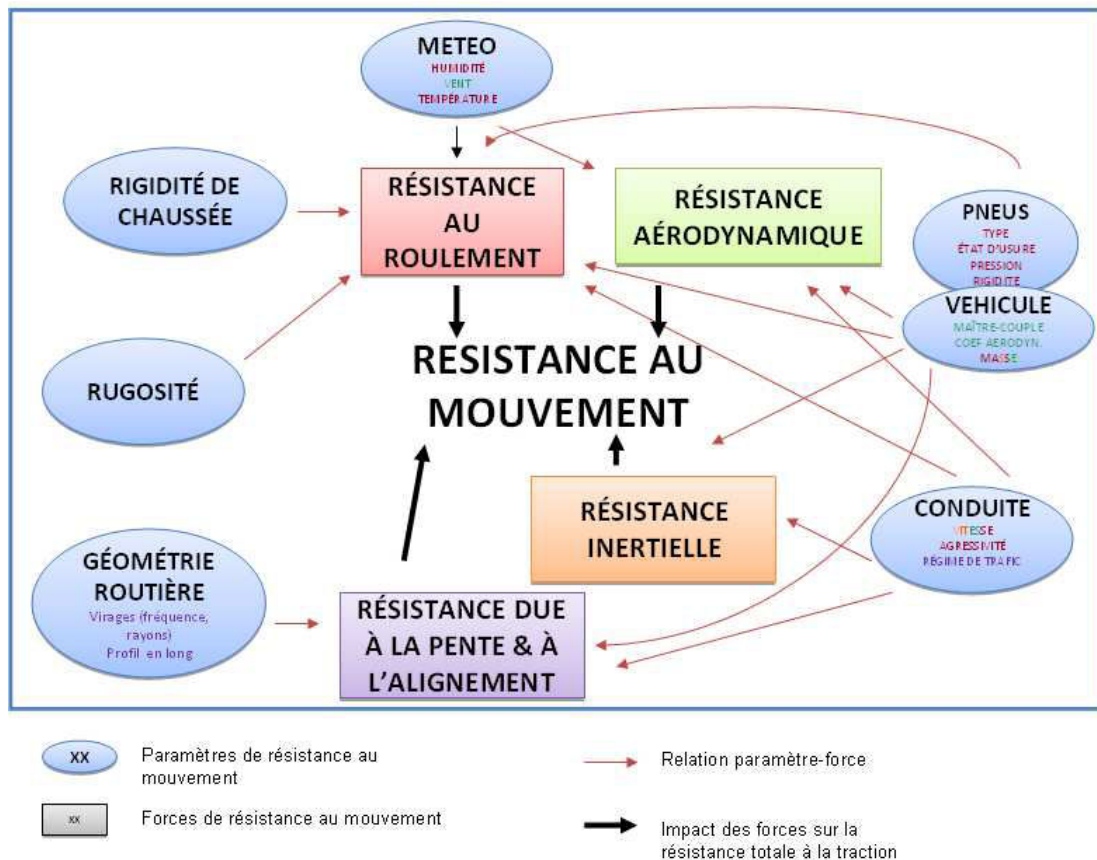


Figure 17 Facteurs principaux des forces de résistance au mouvement (Voir sources en Annexe 16)

4.3.1.2 Impact majeur de la route

La route, par sa géométrie – profil en long, tracé en plan – et par ses conditions de surface, agit sur la consommation énergétique véhiculaire.

A/ État de surface

La littérature fait état de surconsommations sur route en mauvais état de 6 à 11% selon les études (Descornet 1990; Laganier et Lucas 1990; Ulf Sandberg 1990; du Plessis, Visser, et Curtayne 1990). L'uni, selon la vitesse, influence plus ou moins la consommation : Berthier (1991) fait état d'essais du LCPC sur routes et en laboratoire, dans la gamme d'unis des pays développés, mettant en évidence une augmentation de 0.4 L/100km sur route à mauvais uni et de 0.3 L/100km lorsque l'on compare une route à enduit superficiel (forte macrorugosité) à un revêtement à enrobé standard (Berthier 1991) (Annexe 17). Malheureusement, nous n'avons pas trouvé trace de ces essais pour en savoir davantage. Une étude plus récente a mis en évidence qu'une augmentation (respectivement diminution) de 10% de résistance au roulement augmentait (respectivement diminuait) de 0.8 à 2.7% la consommation des VP (Mellios et al. 2009).

B/ Rigidité de chaussée

De même, plusieurs études se sont attachées à quantifier l'influence de la rigidité des chaussées sur la consommation. Du fait d'une dissipation viscoélastique se produisant par le roulement des pneus sur la chaussée qui flue, une surconsommation entre 1 et 11% serait induite par les chaussées hydrocarbonées comparées aux chaussées en béton, plus rigides. Un consensus scientifique semble indiquer que cette surconsommation serait en réalité plutôt de l'ordre de 1% (voir sources en Annexe 16), selon la charge à l'essieu et les propriétés thermiques du bitume. Un des travaux les plus récents a été réalisé au MIT et fait état d'une réduction de la dissipation énergétique des véhicules de 40% lorsque l'on double la rigidité de la chaussée (Louhghalam, Akbarian, et Ulm 2014).

4.3.1.3 Conduite et pneumatiques

Le type de conduite – accélération, vitesse – impacte fortement la consommation du véhicule. L'éco-conduite sur parcours mixte permettrait une économie d'énergie d'environ 14% comparée à une conduite standard, quand on relèverait une surconsommation moyenne de 40% pour une conduite sportive/agressive (Fonseca, Casanova, et Espinosa 2010). Sur route extra-urbaine, elle économiserait jusqu'à 25% d'énergie comparée à une conduite standard (Van Mierlo et al. 2004). Sur autoroute, une conduite sportive implique une surconsommation moyenne de plus de 12%, tandis qu'une éco-conduite permet une réduction jusqu'à 5.7% (Gense 2000). En milieu urbain, les différences de consommation induites par des conduites sportives ou économiques sont encore plus marquées du fait des phases énergivores d'accélération et de décélération.

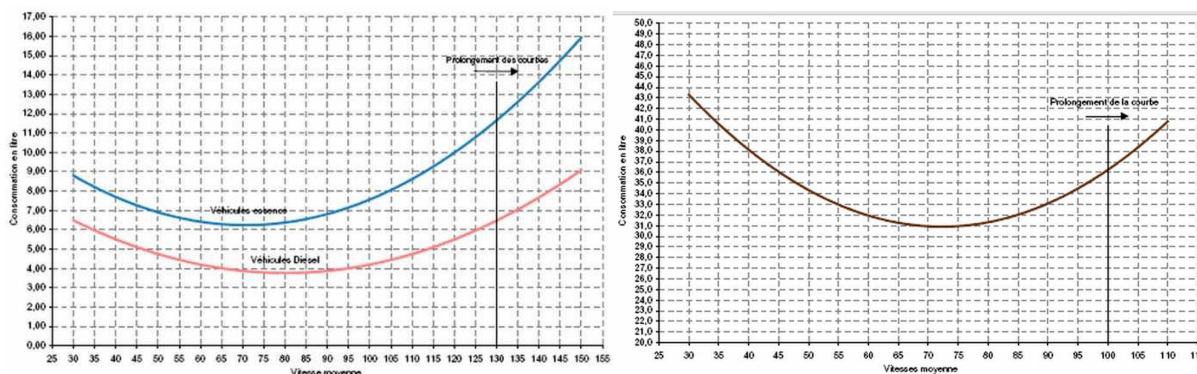


Figure 18 Consommation (en l/100km) VP (à gauche) et PL (à droite) en fonction de la vitesse moyenne de roulage (en km/h) calculés avec IMPACT – ADEME (Chevasson 2007)

La vitesse est un facteur crucial dans la consommation d'énergie véhiculaire. La représentation graphique de la consommation en fonction de la vitesse moyenne est une courbe en U (Figure 18) dont l'optimum énergétique VL se situe autour de 80 km/h, et autour de 70 km/h pour le PL (Chevasson 2007). La consommation VL augmente plus fortement avec la vitesse autour de 130 km/h (autoroute) qu'autour de 80 km/h.

Les caractéristiques du pneumatique – niveau de frottement et d'hystérèse, pression de gonflage – influent sur la résistance au roulement. Tous les types de pneumatiques ne présentent pas la même résistance au roulement, et celle-ci diminue avec l'usure de la bande de roulement. Les pneus basse consommation permettrait de réduire de 5% la consommation véhiculaire selon l'ADEME (2008), ce chiffre chutant à 3% selon une étude prospective du CAS (Syrota et al. 2011). En ce qui concerne la pression de gonflage, une étude publiée par l'ADEME (Gagnepain 2005) et s'appuyant sur les données de l'opération « Faites le plein d'air » de 2002 (Michelin) montrait que le parc roulant en France semblait en moyenne être équipé de pneumatiques sous-gonflés, impliquant une surconsommation nationale moyenne d'environ 2%⁹¹. Selon le rapport n°37 du CAS (Syrota et al. 2011) citant Continental, des systèmes de gestion de la pression des pneus devraient se généraliser dans les années à venir, afin de détecter tout gonflage pneumatique insuffisant, ce système ayant un potentiel de réduction de consommation nationale estimé à 3 %.

4.3.1.4 Technologies

D'autres facteurs affectent la consommation énergétique des véhicules, dépendant en grande partie de la qualité de la mécanique moteur, de l'état général du véhicule et des contraintes technologiques: le facteur d'efficacité de la transmission (consommation moyenne de 5-6% (US Department of Energy 2013), les pertes parasites (alternateur, pompe à eau : 5-6%), les pertes moteur (thermiques (radiateur, gaz d'échappement) : 61% – combustion : 3% – pompage : 4% – friction interne : 3% – freins : 4-5%). Selon l'ADEME (2008), un filtre à air encrassé pourrait même provoquer une augmentation de consommation du véhicule de 3 %. Les accessoires sont également influents, telle la climatisation responsable de 2 à 5% des consommations véhiculaires françaises, ou le désembuage qui implique une surconsommation en fonctionnement d'environ 10% (Gagnepain 2006). La direction assistée améliore le confort de conduite, mais augmente également la consommation. Il serait intéressant de connaître l'influence des boîtes automatiques et des régulateurs de vitesse. Utiliser un modèle électrique plutôt qu'hydraulique permettrait un gain de consommation de 2% selon Continental (Syrota et al. 2011). Le système « Stop and Start » développé en partenariat avec l'ADEME permet de couper le moteur dès que le véhicule est à l'arrêt, et de redémarrer très rapidement. Les phases d'arrêt pouvant compter pour 35% du temps de déplacement en véhicule (milieu urbain ou trajet congestionné), la version de première génération de cet équipement permettrait selon les tests menés par des équipementiers, le Laboratoire Transport et Environnement (LTE) et l'IFSTTAR un gain de consommation de 1.5% en cycle routier, de 5% sur cycle normalisé européen et de 9% en cycle urbain dense (Biscaglia 2005). Sans cette technologie, l'arrêt/redémarrage d'un véhicule consomme moins que de laisser tourner le moteur au-delà de 20 secondes d'immobilité (ADEME 2008). Il existe aussi divers systèmes de récupération d'énergie cinétique, par exemple au freinage. Cette énergie peut être emmagasinée dans un volant d'inertie (Formule 1), être transformée en air comprimé (recharge de moteur à air comprimé) ou être stockée dans des batteries (véhicules hybrides). Pour les TC, l'énergie peut également être transformée en électricité pour être réinjectée dans un réseau électrique (tramways, ferroviaire lourd). L'étude MELODYS – Medium Duty & Low Emission for Distribution – coordonnée par Renault Trucks et subventionnée par l'ADEME, a montré qu'un tel système peut fournir 25% de l'énergie de propulsion nécessaire à un PL 16t. Il est également possible d'équiper son véhicule de diverses technologies de récupérateurs d'énergie thermique. Le projet

⁹¹ Sous-gonflage moyen de 0.4 bar impliquant une augmentation de la résistance au roulement d'environ 10%

RENOTER – Récupération d'ENergie à l'échappement d'un mOteur par ThERmoélectricité – coordonné par Renault Trucks et subventionné par l'ADEME, a montré que la valorisation thermoélectrique d'un véhicule thermique pouvait produire 100 à 300W pour une voiture et 400 à 800 W pour un camion, à un coût système inférieur à 1 €/W. Enfin, la réduction de consommation peut tout simplement passer par la bonne information et l'éducation du conducteur vers l'éco-conduite : la consommation instantanée est maintenant communément affichée sur le tableau de bord des nouveaux véhicules, et Continental a mis au point un système d'éco-conduite appelé CAN pour Controller Area Network, qui transmet en temps réel les informations de consommation moyennée au conducteur : un système d'alerte permet de visualiser les marges d'économies et pourrait générer de 5 à 20% d'économie en carburant (Syrota et al. 2011).

Un tableau synthétisant les réductions potentielles de consommation est proposé en Annexe 18.

4.3.2 Éléments quantitatifs de la consommation

4.3.2.1 Consommations et émissions moyennes françaises au cours du temps

Les consommations des véhicules routiers sont globalement à la baisse sur les 15 dernières années, bien que les tendances ne soient pas constantes comme le montrent les séries temporelles du Ministère de l'Environnement présentées sur la Figure 19, associées à leurs régressions linéaires entre 2004 et 2016. Ces régressions donnent une idée des tendances de diminution annuelle de consommations, comprises entre 0.5 et 0.9% par an.

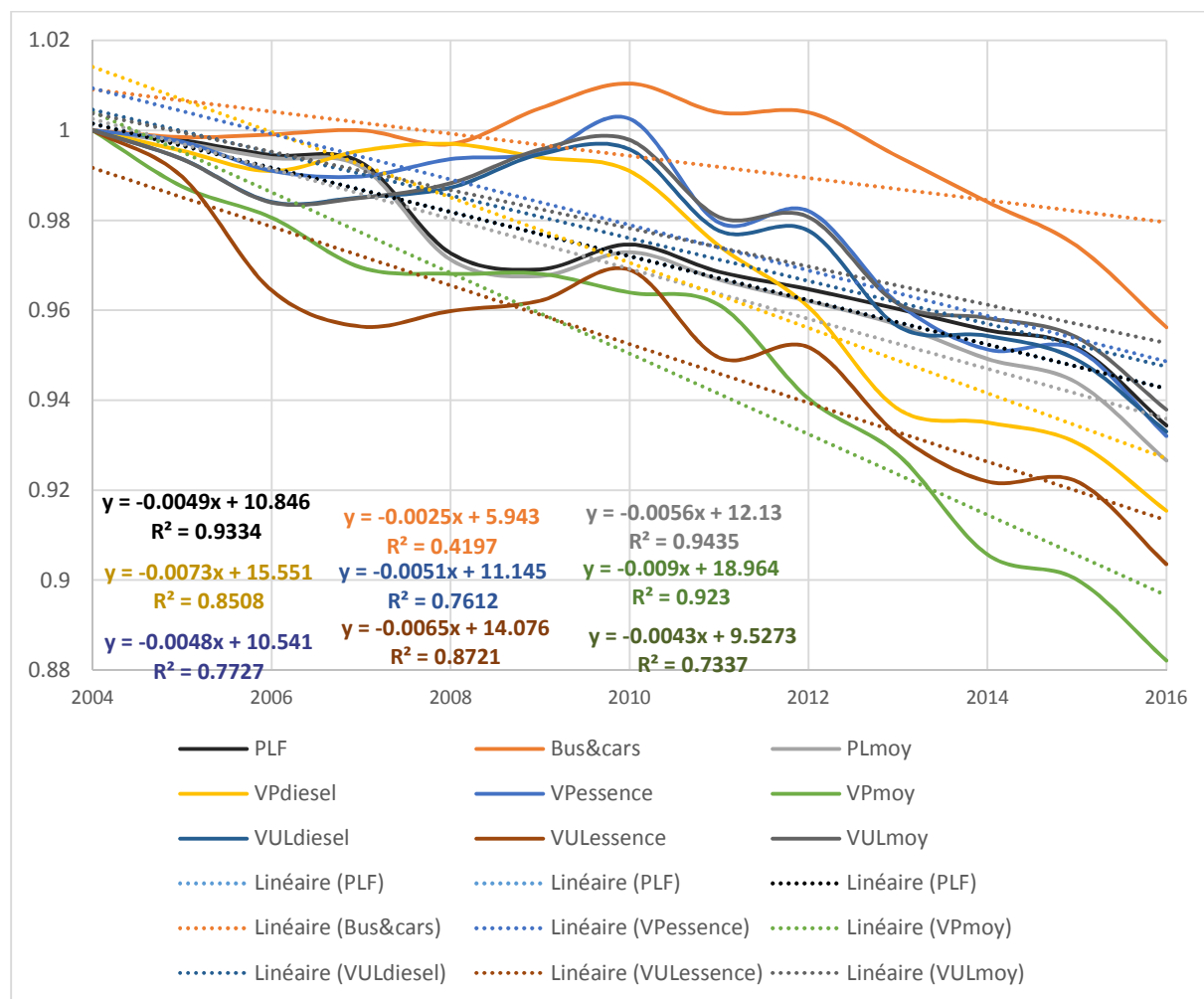


Figure 19 Évolution des consommations des véhicules routiers entre 2004 et 2016 (Source : SOeS)

4.3.2.2 Impact du type de véhicule : VP / PL

En conditions nord-américaines de conduite urbaine et sur autoroute, la résistance aérodynamique serait responsable en moyenne de 8 à 10% de la consommation d'énergie (cette part augmentant avec la vitesse, elle est donc supérieure sur autoroute), et la résistance au roulement de 5 à 6% en moyenne (US Department of Energy 2013).

A/ Résistance aérodynamique

La résistance aérodynamique⁹² à vitesse égale peut varier d'un facteur 20 entre une voiture sportive (Berthier 1991) et un camion, du fait des différences de coefficients de pénétration dans l'air Cx et des maîtres couples. Cependant, d'après la loi de Bernoulli, la résistance aérodynamique varie proportionnellement au carré de la vitesse. Les PL ne circulant qu'à 90 km/h maximum sur autoroute pour un PTAC supérieur à 12 tonnes, contre 135 km/h pour les VP, un rapide calcul⁹³ montre que la résistance aérodynamique rencontrée par un PL serait environ 9 fois supérieure à celle rencontrée par un véhicule de type sport dans ces conditions.

B/ Résistance au roulement

La résistance au roulement sur plan horizontal étant dépendante du poids total du véhicule et d'un coefficient de résistance au roulement⁹⁴ dépendant de l'interface chaussée-pneumatique, elle est plus élevée pour un PL que pour un VL. A même coefficient de résistance au roulement, la résistance au roulement d'une VP de masse 1.3 tonne (voiture de tourisme moyenne) est 30 fois inférieure à celle d'un PL de 40 tonnes.

4.3.2.3 Impact du type de motorisation : véhicules essence, diesel et électrique

A/ Comparaison des rendements du réservoir à la roue

Le rendement d'un véhicule du réservoir à la roue, également appelé efficacité énergétique du réservoir à la roue (tank-to-wheels energy efficiency, voir schéma explicatif en Annexe 19), peut être défini comme le ratio de l'énergie effectivement utilisée par le véhicule pour se mouvoir par l'énergie fournie au véhicule, ou encore par l'énergie fournie restituée en énergie mécanique, sous forme de carburant dans le réservoir ou d'énergie électrique via les batteries par exemple. Elle ne tient donc pas compte de la consommation d'énergie primaire totale nécessitée pour fournir cette énergie, donc elle ne s'intéresse pas aux efficacités des filières énergétiques selon la zone géographique, mais permet de comparer seulement l'efficacité d'une technologie de traction véhiculaire.

Du fait des pertes sous forme de chaleur et/ou de frottements, ce rendement vaut environ 18% pour les moteurs à essence, 22% pour les moteurs diesel⁹⁵, tandis que le Véhicule Electrique (VE) affiche des rendements d'environ 60% de la prise électrique à la roue en batterie conventionnelle (plomb Acide) et de 72% en batterie lithium (Association européenne pour les véhicules électriques 2009). Un tableau très complet d'efficacité énergétique des véhicules thermiques, électriques et à hydrogène en fonction des sources de production énergétique considérées peut être consulté en Annexe 20.

B/ Surpoids du véhicule électrique

Le véhicule électrique serait plus performant sans le surpoids engendré par les batteries. Le moteur d'une voiture pèse environ un quintal et un réservoir de carburant plein environ 40 kg⁹⁶, pour une

⁹² Résistance au roulement en côte de pente α : $R_{roul} = \mu_{roul} P_{veh} \cos \alpha$

⁹³ $V(PL)/v(VL)=90/135=2/3$, $(2/3)^2=0.44$, et $0.44*20=8.9$

⁹⁴ Coefficient de résistance au roulement : $\mu_{roul} = 0,005 + \frac{0,01055}{P_{pneu}} + \frac{1,235 \times 10^{-5} \times v_{veh}^2}{P_{pneu}}$ avec P_{pneu} = pression de gonflage

⁹⁵ Mais 40% en zone de meilleur rendement

⁹⁶ Capacité de 50 L, densité des carburants autour de 0.8

masse totale moyenne des deux composants en condition d'usage de 120 kg (demi-plein). Une batterie électrique de véhicule a une capacité énergétique de 15 à 30 kWh, ce qui permet de parcourir entre 100 et 250 km sans recharger son véhicule. Un pack de batteries lithium-Ion permettant une autonomie de 160 km pèserait aujourd'hui 250 kg⁹⁷. Toute chose égale par ailleurs, un VE aurait donc à tracter en moyenne 130 kg de plus qu'un Véhicule thermique (Vth). En technologie hybride, la batterie implique également un surpoids⁹⁸.

C/ Évolution des consommations moyennes de carburant en France

Les consommations moyennes des moteurs thermiques ont diminué avec l'amélioration technologique : entre 1985 et 2012, la consommation moyenne des VP essence a diminué de 17% pour atteindre 7.7 L/100km en 2012, et celle des VP diesel de 29% pour atteignant 6.4 L/100km en 2012 (Comptes du transport 1985 et 2012). En 2012, d'après les comptes des transports, 72% des véhicules-kilomètres VL sont effectués par des VL diesel, contre 28% en essence.

4.3.3 Émissions

4.3.3.1 Normes d'émissions

Il existe aujourd'hui des normes de niveaux d'émission des véhicules, au niveau européen notamment (norme Euro). Les normes Euro réglementent 4 types d'émissions : les particules (PM, en mg/km), les oxydes d'azote (NOx), les hydrocarbures (HC) et le monoxyde de carbone (CO). Le Japon et les États-Unis possèdent leurs propres réglementations sur ces émissions également. Les différents niveaux normatifs d'émissions sont indiqués en Annexe 21, néanmoins, les cycles d'essai étant différents pour tous les pays, cela biaise toute comparaison. De plus, niveaux normalisés et émissions en conditions réelles sont bien différentes comme l'a montré le très médiatisé « diesel gate ».

4.3.3.2 Cycles de conduite

En Europe, les émissions étaient mesurées jusqu'à septembre 2018 avec le cycle de conduite normalisé (accélération, paliers, décélération, arrêts) appelé NEDC (New European Driving Cycle) avec une phase représentant une conduite en ville puis une phase de conduite interurbaine, pour une vitesse moyenne de 33 km/h et une durée de parcours de 20 minutes. Le cycle NEDC ayant été critiqué pour son inaptitude à évaluer des émissions réelles (distorsions pouvant atteindre 500% entre tests et réalité), il a été remplacé par le cycle plus réaliste WLTC-RDE.

4.3.4 Modèles de consommation et d'émission

Parmi ces modèles, il existe deux approches assez différentes : l'approche « individu » et l'approche flux ou trafic. Dans le premier cas, les calculs sont réalisés à partir d'enquêtes de mobilité : l'individu est l'objet observé et les diagnostics peuvent se décliner selon ses caractéristiques. Dans le second cas, les modèles se basent sur des données de trafic (pour fournir des inventaires et cadastres d'émissions), sans même nécessairement s'occuper du taux d'occupation du véhicule. Ces modèles permettent de calculer des quantités d'énergie consommées par les véhicules de transport, et des quantités de polluants émis – souvent gazeux mais parfois solides – tels que gaz à effet de serre, monoxyde de carbone, composés organiques volatils, oxydes d'azotes ou particules fines pour en citer quelques-uns. Dans certains cas (calculs très agrégés et transports non routiers notamment), les émissions peuvent être directement calculées à partir des consommations et de relations simples.

⁹⁷ <http://www.lefigaro.fr/automobile/2010/10/05/03001-20101005ARTFIG00437-batteries-le-n339ud-du-probleme.php>

⁹⁸ <http://www.lefigaro.fr/automobile/2009/02/20/03001-20090220ARTFIG00341-au-volant-du-futur-touareg-hybride-.php>

4.3.4.1 Définition et principe méthodologique

Un modèle d'émission peut être une simple table, un ensemble d'abaques, ou sa traduction en une relation fonctionnelle, réalisés à partir d'émissions mesurées sur banc d'essai sur des cycles de conduite fixés. Les facteurs unitaires (au km) d'émission retranscrits sont soit moyennés par typologie de véhicules (classe, type d'énergie de traction, ...), soit directement ceux d'un véhicule considéré comme représentatif d'une segmentation véhiculaire. Le manuel de l'EMEP/EEA (GuideBook) est aujourd'hui la référence européenne (European Environment Agency 2016). Il considère les émissions d'abrasion – composées de particules de freins, de pneumatiques et d'infrastructure – depuis peu. D'autres phénomènes qui contribuent à la pollution locale ne sont pas encore pris en compte (remise en suspension de particules par le trafic, polluants secondaires résultants de transformations après émission).

Le principe méthodologique général posé depuis le début des modèles d'émission (Bouscaren et Leygonie 1989; Joumard 1990; Sétra 2009a) pour le calcul des émissions repose sur l'**Équation 2**.

Équation 2 Équation fondamentale du calcul d'émissions

$$E = A \times FE$$

où E est l'émission, généralement exprimée en masse, A l'activité des émetteurs (généralement exprimée en véhicule.km) et FE un facteur d'émission unitaire.

4.3.4.2 COPERT

Cette équation est utilisée dans les versions successives du modèle COPERT (« COmputer Program to calculate Emission from Road Transport »), qui se fonde lui-même sur la base de données des facteurs d'émission routiers du manuel de l'Agence Européenne de l'Environnement (EEA 2013; European Environment Agency 2016, 2017) pour la version COPERT 4 notamment. À chaque catégorie de véhicule et pour chaque polluant est attribué un facteur d'émission déterminé en fonction de plusieurs caractéristiques : type de véhicule et mode de carburation, cylindrée ou PTAC pour les PL, date de mise en circulation, vitesse ou plus globalement usage du véhicule (charge, etc.), conditions de circulation. Les courbes d'émissions en fonction des vitesses sont basées sur des mesures effectuées sur banc d'essai pour différents cycles de conduite. Il faut noter des évolutions quasi-annuelles des modèles COPERT qui peuvent quelquefois être significatives.

4.3.4.3 Artemis et HBEFA (André 2009)

Artemis (pour « Assessment and reliability of transport emission models and inventory systems ») et HBEFA (Handbook of emissions factors) sont des modèles développés de manière concomitante à COPERT 4. Artemis a été développé dans le cadre d'un projet de recherche européen. HBEFA existait antérieurement, puis a intégré les développements d'Artemis : il en est la prolongation plus pérenne. Ces outils contiennent une base de données d'émissions déclinée selon des situations de trafic détaillées. Alors que l'approche COPERT ne tient compte que de la vitesse moyenne du trafic pour rendre compte des conditions de circulation, Artemis et HBEFA permettent une approche dynamique plus fine et une meilleure spatialisation des émissions par assimilation d'une situation concrète (une rue type, un « niveau de service »). Tout comme COPERT, HBEFA et Artemis se basent sur une classification des véhicules par familles, catégories, et sous-catégories, permettant de décomposer plus finement un parc de véhicule et donc d'obtenir des quantifications plus proches de la réalité (André et al. 2008). Les situations de trafic considérées par HBEFA/Artemis sont différenciées selon quatre caractéristiques : la zone (urbaine ou rurale), le type de voie (hiérarchisé, de la voie d'accès aux grandes infrastructures), la vitesse limite et la condition de trafic.

4.3.4.4 Comparaison des modèles prospectifs

Plusieurs modèles de consommation/émissions existent dans le monde. Nous avons détaillé les plus populaires en Europe – COPERT, Artemis et HBEFA, mais nous pouvons également citer l'outil français

CopCete développé par le RST (CEREMA, du temps du CETE de l'Est) qui se base sur la vitesse moyenne de circulation en application directe des équations COPERT5 et tient compte des projections de parc français de l'IFSTTAR. Ces différentes alternatives ne sont pas équivalentes en termes de qualité de données, d'abord parce qu'elles ne permettent pas de considérer l'influence des caractéristiques des véhicules, de la vitesse et de l'accélération sur les consommations et émissions de la même manière, et qu'elles ne considèrent pas les mêmes évolutions parcs. Or, la qualité des données d'émissions est très importante dans un modèle d'évaluation environnementale (Reyna et al. 2015). Artemis et CopCete ont été comparés sur le Plan de Déplacement Urbain (PDU) de Lille (Mezdour et Bugajny 2014), et il a été montré qu'Artemis mettait bien en évidence l'augmentation des émissions aux heures de pointe par rapport à CopCete, mais que les outils donnaient des résultats similaires sur un certain nombre de composants. À notre tour, nous avons comparé (Figure 20) les consommations et émissions que l'on obtient pour un VP moyen en 2025 à 120 km/h sur autoroute avec plusieurs modèles : la dernière version (V4_vb) de l'outil ministériel CopCete⁹⁹, une version ancienne de CopCete (Sétra 2009a) et le tableur du « Handbook » européen pour les émissions routières (Ntziachristos et Samaras 2017) (EMEP/EEA, approximation grossière en VP diesel Euro 6 segment medium, sachant que les véhicules Euro 6 seront largement majoritaires en 2025 selon les prévisions du Parc IFSTTAR 2013 (taux de renouvellement annuel d'environ 1/15 ans soit presque 7%). Si, en termes de carburant, les chiffres convergent totalement, la convergence des modèles est moins forte pour les NOx, tandis que les émissions de PM, COV et CO divergent fortement (jusqu'à un rapport 20). Si les données européennes sont probablement moins adaptées à la France, les différences entre les données SETRA 2009 et CopCete 2017 pourraient s'expliquer par deux éléments : l'évolution du parc pris en compte et la méthodologie COPERT utilisée.

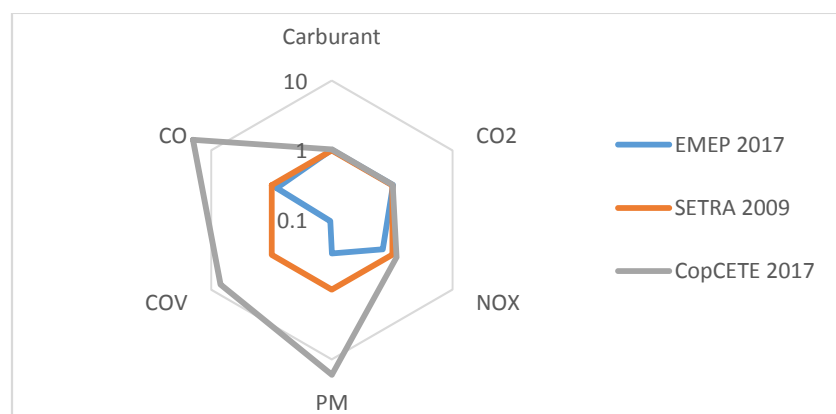


Figure 20 Comparaison logarithmique des consommations et émissions d'une VP en 2025 sur autoroute selon 3 modèles

Les modèles utilisent toujours les équations de COPERT IV, mais en version V11.4 pour CopCete et en version antérieure à la V7 pour le SETRA. En ce qui concerne le parc, l'ancien modèle de l'INRETS (Hugrel et Joumard 2004) est utilisé dans le cas du SETRA a priori, et un modèle plus récent de l'IFSTTAR (2013) pour CopCete. Selon les développeurs de CopCete¹⁰⁰, les facteurs d'émissions entre les premières et les dernières versions de COPERT IV auraient beaucoup changé particulièrement sur les PM, COV et CO – ce que met très bien en évidence la Figure 20. Les dernières versions de COPERT IV resteraient en revanche très proches de la première version de COPERT V. Les prévisions de parcs de l'INRETS/IFSTTAR entre 2004 et 2013 changent également, mais ce changement n'est pas le facteur principal de changement dans les émissions du VP moyen.

⁹⁹ Téléchargeable gratuitement à ce lien pour les agents du Ministère de l'Environnement : <http://www.infra-transport-materiaux.cerema.fr/telechargement-CopCete-a6085.html>

¹⁰⁰ Échange avec Renaud Martin en février 2018 sur les évolutions de CopCete, de COPERT, des parcs.

4.3.4.5 Synthèse

Plusieurs modèles de consommation et d'émission existent. Ces modèles évoluent souvent, tels que la série des modèles COPERT, atteignant sa cinquième version en 2018. Les modèles sont souvent hybridés, et déclinés selon des périmètres géographiques variés. L'aspect temporel est également important, puisque les carburants et les performances des moteurs en termes de consommation et d'émissions ont beaucoup évolué ces 20 dernières années. La prise en compte de l'évolution du parc roulant, dans un logiciel d'évaluation des consommations et émissions moyennes à une échelle géographique donnée est primordiale pour la qualité des données en sortie de simulation.

Nous avons ici comparé et discuté les modèles existants que nous pouvions utiliser dans le cadre du parc roulant français, leurs hypothèses et leur périmètre. Les différences des trois modèles comparés, SETRA 2009, EMEP 2017 et COPCete 2017, ont été interprétées.

4.4 Bruit du trafic routier

Le son est une onde mécanique longitudinale produite par la vibration d'un corps et propagée dans le milieu environnant. Un son s'inscrit dans le cycle émission – propagation – réception. Le bruit routier est le son perçu comme négatif de la route, et dépend en partie du type de véhicule considéré. Les phénomènes (et sources de bruit) se manifestent sur une gamme de fréquences larges mais avec des pics d'émission autour de 1000 Hz pour les VL et 600-700 Hz pour les PL. Le niveau sonore varie avec la vitesse (voir Annexe 22) mais pas la position du pic d'émission. Les niveaux sonores associés aux automobiles ont diminué en moyenne en France comme en Europe entre 1996 et 2006 de plus d'1dB(A) selon la SFA (2010).

4.4.1 Sources de bruit

Le bruit généré par le trafic routier provient de plusieurs sources. On distingue le bruit du moteur (bloc moteur, transmissions mécaniques, pot d'échappement) qui dépend du nombre de rotations par minute, les bruits aérodynamiques (faibles aux vitesses autorisées), le bruit de contact pneumatique-chaussée qui dépend de la vitesse¹⁰¹ (Gautier 2006) et enfin le bruit issu des vibrations et entrechoquements des divers éléments du véhicule et dépendant donc de celui-ci (Bérenghier et al. 2001). Pour les VL à moteur thermique, le bruit moteur est la principale source de nuisances sonores en dessous de 50 km/h. Au-dessus de cette vitesse, la source principale est le contact pneu-chaussée (voir Annexe 23), qui augmente avec la vitesse (SFA 2010)

Le bruit de contact pneumatique-chaussée se compose d'abord d'émissions acoustiques générées par des phénomènes vibratoires aux basses fréquences particulièrement mais également aux moyennes fréquences (dans la gamme de fréquences audibles pour l'oreille humaine, soit 20 à 20 000 hertz). Ces excitations sont dues aux impacts des pains de gomme du pneumatique sur les granulats de surface, aux déformations de la zone de contact entre le pneumatique et la chaussée, et à la rupture d'adhérence des pains de gomme (*stick and slip*). Cette source de bruit est prédominante sur chaussée à macrotexture importante (Hamet 2003). Une forte mégatexture (voir Figure 10) est également responsable de bruits de contact pneu-chaussée et dans l'habitacle importants.

Interviennent également des phénomènes de résonance d'air aux hautes fréquences, appelé *air pumping* et qui correspond à la compression/détente de l'air piégé entre la gomme et le revêtement. Ce phénomène diminue avec la porosité des revêtements routiers : l'air peut circuler, car il n'est plus piégé (Hamet 2003).

4.4.2 Facteurs d'influence pour le bruit

Divers facteurs influencent les émissions acoustiques du trafic routier : le débit de trafic, sa composition (parts de VP, VUL, PL, trains routiers (TR), 2RM), le type et la vitesse des véhicules, leurs

¹⁰¹ Loi de bruit_moteur = 65 + 50 log(RPM/3000) (en dB(A)), loi de bruit_pneu = 75 + 30 log(v/90) (en dB(A)) (Gautier 2006)

pneus, le comportement du conducteur, mais aussi le type de revêtement de chaussée (structure ouverte, fermée, granularité), l'état de surface de la route, et l'environnement de propagation (voir en Annexe 24).

4.4.2.1 Type de véhicule

Les niveaux sonores des PL sont plus importants que ceux des VL. Les analyses PL sont peu nombreuses car la disparité des niveaux sonores est bien plus étendue au sein des PL que des VL.

Si l'on considère le bruit intérieur des véhicules, le véhicule électrique présente un net avantage à faibles vitesses, tandis qu'à vitesse constante de 113 km/h, la différence est beaucoup moins marquée (Syrota et al. 2011).

Le marché automobile est souvent analysé de manière segmentée, par catégorie de véhicules différenciée par taille et usage. Selon les segments automobiles, les véhicules ne présentent pas les mêmes niveaux d'émission sonore. Un traitement statistique des niveaux d'émission rapportés par la Société Française d'Acoustique (SFA) (2010) montre que ceux-ci augmentent avec la diminution de la taille du véhicule, mais aussi avec la vitesse comme le montre la Figure 21. De plus, les émissions moyennes émises par segment sont plus élevées en Europe qu'en France, à l'exception du segment des petites urbaines et citadines pour lesquelles les niveaux sont à peu près équivalents.

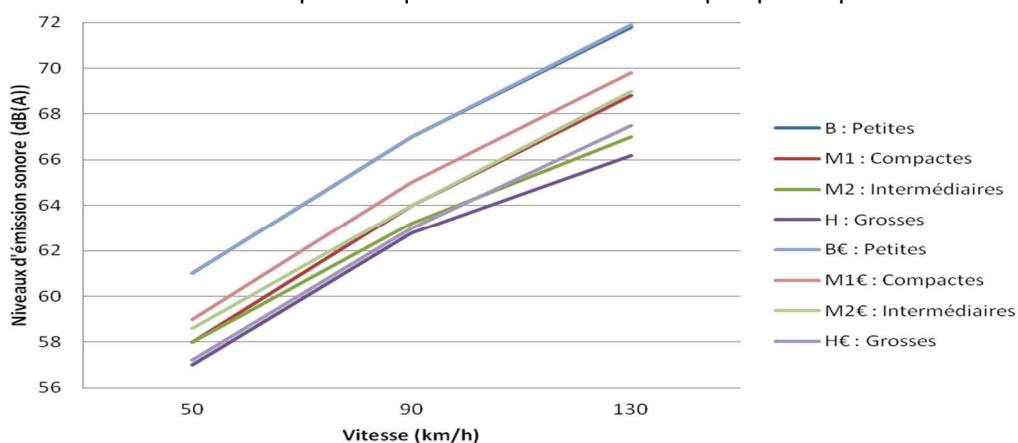


Figure 21 Niveaux de bruit des VL par segment selon la vitesse en 2006 : comparaison France-Europe (Source du graphique : auteur ; Chiffres : SFA 2010)

4.4.2.2 Environnement

Les conditions de propagation sont également très importantes dans le bruit perçu par le riverain routier, qui dépend de nombreux facteurs tels que le profil en travers de la route ou les phénomènes physiques de réflexion, diffraction, diffusion et absorption acoustique de l'environnement (obstacles, chaussée, bâti, etc.), mais aussi la micrométéorologie (par exemple profils verticaux de vent et température) (Gauvreau 2015). Des schémas de principe d'influence des conditions atmosphériques sur la trajectoire des ondes sonores sont visibles en Annexe 24 (Bérenghier et al. 2001).

4.4.2.3 Pneumatiques (Lelong 1999)

Une étude de l'INRETS effectuée sur un même revêtement, sur un échantillon d'une vingtaine de VP au kilométrage varié représentatif du parc automobile français au moment du test, a permis de mesurer le bruit émis par les automobiles en condition de passage « point mort » afin de s'affranchir au mieux du bruit moteur, à plusieurs vitesses différentes. Les pneus étaient considérés comme représentatifs du parc également, et leur largeur était comprise entre 155 mm et 195 mm. À vitesse égale, les différences de niveaux d'émissions acoustiques entre véhicules sont inférieures à 4 dB(A).

4.4.3 Modélisation des émissions sonores (SFA 2010)

Plusieurs modèles de simulation du bruit routier ont été développés, et sont recensés dans la thèse de Ludovic Leclercq (2002). Selon les gammes de fréquences des phénomènes étudiés, l'on va utiliser

différents modèles de simulation (voir en Annexe 22). Le confort vibratoire concerne les très basses fréquences et est étudié grâce aux modèles mécaniques multi-corps (phénomènes linéaires ou non linéaires). Les phénomènes à basse fréquence sont simulés par des méthodes d'éléments finis. Les phénomènes instables correspondant aux hautes fréquences sont modélisés statistiquement.

Il existe, de ce fait, de nombreux logiciels de simulation acoustique. Par exemple, le logiciel Mithra, et son extension Mithra-SIG, permettent de faire de la simulation et de la cartographie (2D ou 3D) acoustique¹⁰². Ce logiciel a été développé par le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB). Il existe bien d'autres logiciels, comme soundplan, l'un des premiers logiciels mis sur le marché en 1986¹⁰³.

5 Conclusion

Après une brève introduction à la pensée systémique et intégrative et son utilisation pour aborder la maintenance routière, ce chapitre s'est attaché à décrire les deux sous-systèmes techniques relatifs à l'entretien des routes : les infrastructures routières et les véhicules qui s'y déplacent. Ces descriptions abordent à la fois les caractéristiques importantes de ces systèmes pour l'entretien des routes, les mécanismes de leurs dégradations et leurs méthodes de modélisation, leur maintenance et les outils d'aide de gestion. Les éléments rapportés sont principalement adaptés au contexte français.

Ce premier chapitre esquisse déjà les interactions systémiques de l'infrastructure et des véhicules routiers, et laisse entrevoir en quoi la maintenance routière est une opération décisive dans la performance du système de transport routier. En effet, on voit apparaître dans les mécanismes de dégradation une interaction route-véhicule forte. La chaussée est dégradée par les conditions météorologiques et climatiques mais également par le trafic et son agressivité. De l'autre côté, les consommations en carburant, et pneumatiques des véhicules, leurs émissions de bruit et de substances polluantes, leur adhérence à la route et le confort de roulement dépendent de la texture routière.

Pour entrer dans le détail, le chapitre 2 abordera plus précisément cette systémique des impacts de l'entretien routier, principalement de manière qualitative, impacts que subissent toutes les parties prenantes de la route.

¹⁰² <https://logiciels.cstb.fr/sante-confort/acoustique-environmentale-et-urbaine/mithrasig/>

¹⁰³ <https://www.soundplan.eu/english/soundplan-acoustics/>

6 Bibliographie

ADEME. 2008. « Conduire moins vite c'est moins d'accidents, moins de CO2 et moins cher ». juillet 2008. <http://www2.ademe.fr/servlet/getDoc?cid=96&m=3&id=54779&ref=21479&p1=B>.

AFNOR. 1994. « NF P98-082 Janvier 1994 ANNULÉE le 12/08/2017 Chaussées - Terrassements - Dimensionnement des chaussées routières - Détermination des trafics routiers pour le dimensionnement des structures de chaussées. » <https://www.boutique.afnor.org/norme/nf-p98-082/chaussees-terrassements-dimensionnement-des-chaussees-routieres-determination-des-trafic-routiers-pour-le-dimensionnement/article/737954/fa029584>.

———. 2004. « NF EN ISO 13473-1 Octobre 2004 Caractérisation de la texture d'un revêtement de chaussée à partir de relevés de profils - Partie 1 : détermination de la profondeur moyenne de la texture ». <https://www.boutique.afnor.org/norme/nf-en-iso-13473-1/caracterisation-de-la-texture-d-un-revetement-de-chaussee-a-partir-de-relevés-de-profil-partie-1-determination-de-la-profondeur/article/720886/fa049013>.

———. 2010a. « NF EN 13306 Octobre 2010 ANNULÉE le 27/01/2018 Maintenance - Terminologie de la maintenance ». <https://www.boutique.afnor.org/norme/nf-en-13306/maintenance-terminologie-de-la-maintenance/article/725442/fa159291>.

———. 2010b. « NF P98-150-1 Juin 2010 Enrobés hydrocarbonés - Exécution des assises de chaussées, couches de liaison et couches de roulement - Partie 1 : enrobés hydrocarbonés à chaud - Constituants, formulation, fabrication, transport, mise en oeuvre et contrôle sur chantier ». <https://www.boutique.afnor.org/norme/nf-p98-150-1/enrobes-hydrocarbones-execution-des-assises-de-chaussees-couches-de-liaison-et-couches-de-roulement-partie-1-enrobes-hydrocarbones/article/672007/fa166684>.

———. 2016. « F EN 13108-8 Octobre 2016 Mélanges bitumineux - Spécifications pour le matériau - Partie 8 : agrégats d'enrobés ». <https://www.boutique.afnor.org/norme/nf-en-13108-8/melanges-bitumineux-specifications-pour-le-matériau-partie-8-agregats-d-enrobes/article/814543/fa179879>.

———. 2018. « NF EN 13306 Janvier 2018 Maintenance - Terminologie de la maintenance ». <https://www.boutique.afnor.org/norme/nf-en-13306/maintenance-terminologie-de-la-maintenance/article/828621/fa185755>.

André, Michel. 2009. « The Artemis European tools for estimating the transport pollutant emissions ». In *Comprehensive Inventories - Leveraging Technology and Resources*. Baltimore, Maryland. <http://www.epa.gov/ttnchie1/conference/ei18/session6/andre.pdf>.

André, Michel, Anne-Laure Roche, et Lauréline Bourcier. 2013. « Statistiques de parcs et trafic pour le calcul des émissions de polluants des transports routiers en France ». Rapport Ifsttar-LTE. https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/ADM00013842_ADM_ATTACHE1.pdf.

Archilla, Adrian, et Samer Madanat. 2000. « Development of a pavement rutting model from experimental data ». *The Journal of Transportation Engineering*, août 2000, UCTC Reprint No. 452 édition.

Balay. 2008. « Dimensionnement des chaussées aéroportuaires et chaussées routières à assises non traitées (2002-2005) ». *RGRA*, n° 864 (février): 31-35.

Barquins. 2010. « Tribologie des matériaux caoutchouteux ». *Techniques de l'Ingénieur*, n° TRI4500 (octobre). <http://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/mecanique-th7/materiaux-et-tribologie-42467210/tribologie-des-materiaux-caoutchouteux-tri4500/comportement-tribologique-tri4500niv10003.html#3.3>.

- Baumann. 2012. « Route: un logiciel expert pour choisir sa chaussée durable ». LeMoniteur.fr. 26 décembre 2012. <http://www.lemoniteur.fr/179-innovation-produits/article/actualite/19776487-route-un-logiciel-expert-pour-choisir-sa-chaussee-durable>.
- Bérenghier, Michel, et al. 2001. « Influence de la couche de roulement de la chaussée sur le bruit du trafic routier ». 4. Cftr - info - Notes d'information. Comité français pour les techniques routières. <http://portail.documentation.developpement-durable.gouv.fr/dtrf/pdf/pj/Dtrf/0002/Dtrf-0002693/DT2693.pdf?openerPage=notice>.
- Bertalanffy, Ludwig von, et Jean Benoît Chabrol. 1973. *Théorie générale des systèmes*. Paris: Dunod.
- Berthier, Jean. 1991. *Véhicules et routes*. Les Sélections-Techniques de l'ingénieur. Ed. Techniques Ingénieur.
- Biscaglia. 2005. « Stop and Start : un système innovant ». septembre 2005. <http://www.ademe.fr/htdocs/publications/lettre/105/tech.htm>.
- Bitelli, Gabriele, Andrea Simone, Fabrizio Girardi, et Claudio Lantieri. 2012. « Laser Scanning on Road Pavements: A New Approach for Characterizing Surface Texture ». *Sensors* 12 (12): 9110-28. <https://doi.org/10.3390/s120709110>.
- Bordes, P, G Guinard, et G Laurent. 1996. « L'entretien courant des chaussées - guide pratique ». Sétra.
- Bouscaren, et Leygonie. 1989. « Le programme européen CORINAIR = The European CORINAIR programme. » 31, no124. Journée scientifique de Toulouse.
- BRGM. 1996. « Etude technico-économique des granulats de substitutions dans les bétons hydrauliques ». Ministère de l'Industrie, de la Poste et des Télécommunications. <http://infoterre.brgm.fr/rapports/RR-39261-FR.pdf>.
- Carpenter, et Cenek. 1999. « Tyre Wear Modelling for HDM 4 ». 986529474. Central Laboratories Report. Opus International Consultants Limited. http://www.lpcb.org/index.php/component/docman/doc_view/11018-1999-wb-tyre-wear-modelling-for-hdm-4?Itemid=32.
- CCFA. 2015. « L'industrie automobile française - Analyse & statistiques 2014 ». Comité des Constructeurs Français d'Automobiles.
- CEREMA. 2015. « L'adhérence des chaussées - État de l'art et recommandations ». Guide technique. Collection Références.
- — —. 2016. « Étude sur les parcs roulants routiers français - Inventaire, comparaison et impact sur les courbes d'émission ». http://www.infra-transports-materiaux.cerema.fr/IMG/pdf/1541w-Etude_parcs_roulant_routiers_francais.pdf.
- Cerema-DTecITM, et IDRRIM. 2014. *Uni longitudinal: état de l'art et recommandations : guide technique*. Bron.
- Cerezo, Veronique. 2011. « L'adhérence des revêtements routiers ». Journée Cotita, octobre 18. http://www.cotita.fr/IMG/pdf/1pdf_cete69_DLL_SAGRI_Club_Labo_2011_10_18_v2.pdf.
- CFTR. 2003. « Aide au choix des techniques d'entretien des couches de surface des chaussées - Guide technique ». Sétra. http://catalogue.setra.fr/document.xsp?id=Dtrf-0003341&qid=sdx_q0&n=5&q=.

Chehovits, et Galehouse. 2010. « Energy Usage and Greenhouse Gas Emissions of Pavement Preservation Processes for Asphalt Concrete Pavements ». In .
http://techtransfer.berkeley.edu/icpp/papers/65_2010.pdf.

Chevasson. 2007. « Le calcul économique à l'épreuve des contraintes du secteur des transports routiers. Les cas de l'insécurité routière et de l'effet de serre ». LET, Laboratoire Economie des Transports.
http://theses.univ-lyon2.fr/documents/getpart.php?id=lyon2.2007.chevasson_g&part=129571.

Christory. 2007. « Routes et rues stratégiques en France : du présent au futur - vers des chantiersfurtifs ». septembre.
<http://lavocwww.epfl.ch/JT/2007/Presentations/Christory%20Routes%20et%20rues%20strar%C3%A9giques%20en%20France.pdf>.

Cluzel, F., B. Yannou, Y. Leroy, et D. Millet. 2012. « Proposition for an Adapted Management Process to Evolve from an Unsupervised Life Cycle Assessment of Complex Industrial Systems towards an Eco-Designing Organisation ». *Concurrent Engineering* 20 (2): 111-26.
<https://doi.org/10.1177/1063293X12446663>.

Cohen, Simon, et Mehdi Danech-Pajouh. 2000. « Initiation à l'ingénierie du trafic routier ». Support de cours.

Communauté du Grand Lyon - Direction de la Voirie - VQL. 2009. « Guide Technique de conception et de dimensionnement des structures de chaussées communautaires ». Fascicule 2.
http://www.grandlyon.com/fileadmin/user_upload/media/pdf/voirie/20091118_gl_voirie_guide_conception_structures_de_chaussees.pdf.

Corniou, Jean-Pierre. 2012. « Le réseau routier français, un actif menacé ». *Les Echos*, 1 juin 2012, LesEchos.fr édition. http://archives.lesechos.fr/archives/cercle/2012/06/01/cercle_47481.htm.

Corté, Goux, et al. 1994. « Conception et dimensionnement des structures de chaussées ». Paris; Bagnaux: LCPC-Sétra.

Corté, Guidoux, et al. 1998. « Catalogue des structures types de chaussées neuves ». Sétra-LCPC.

Cula, Patrick. 2011. « La route, un patrimoine ». SPRIR de Franche Comté, Dole, novembre 28.
https://www.google.fr/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=6&cad=rja&uact=8&ved=0ahUK Ewi2rrn4z9nKAhVDQBoKHaJDB8gQFghBMAU&url=http%3A%2F%2Fwww.cotita.fr%2FIMG%2Fppt%2Fppt_1-1_Patrick_Cula.ppt&usg=AFQjCNHfHFd6DoqCkXVhhQTVLkF1qfehMw&sig2=g8EUq9p_aTvIAFq8e8oYw&bvm=bv.113034660,d.ZWU.

De Bortoli, Anne. 2014. « Eco-concevoir l'entretien routier : contexte national et identification des enjeux énergétiques du système routier ». *Revue générale des Routes RGRA*, n° 920 (mai): 67-70.

Delanne, Yves. 2008. « Mesure et analyse de l'uni des chaussées ». LCPC.

Descornet, G. 1990. « Road-Surface Influence on Tire Rolling Resistance ». In *Surface Characteristics of Roadways: International Research and Technologies*, édité par We Meyer et J Reichert, 401-401-15. 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959: ASTM International.
<https://doi.org/10.1520/STP23377S>.

DGITM. 2014. « Politique pour l'entretien des chaussées du réseau routier national non concédé ». Volume 2-Rapport sur les simulations budgétaires.

———. 2015. « Image Qualité du Réseau Routier National et Indicateur d'Usage - Manuel de Présentation ».

Direction des Routes. 2000. « Structure expérimentale de chaussée - Recyclage des matériaux de chaussée. »

Doré, Drouin, Pierre, et Desrochers. 2005. « Estimation of the Relationships of Road Deterioration to Traffic and Weather in Canada ». T8080-4-242. Université Laval. <http://www.bv.transports.gouv.qc.ca/mono/0965375.pdf>.

Dupont, Ariane, Laurent Hivert, et Claire Papaix. 2013. « BETTI : Rapport Intermédiaire - Rapport méthodologique : Questions soulevées par la réalisation de diagnostics environnementaux des mobilités à l'échelle d'une région urbaine ». Version révisée de décembre 2014 – janvier 2015.

Durand, et Cousin. 2009. « Incidence des PL sur les surcoûts de construction des chaussées neuves ». Sétra. http://www.setra.equipement.gouv.fr/IMG/pdf/0917w_PL_et_couts_construction_chaussees.pdf.

EEA. 2013. « EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2009. Technical guidance to prepare national emission inventories ». European Environment Agency Technical report n°12/2013. Luxembourg: European Environment Agency. <http://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2013>.

ETRMA. 2009. « Tyre Generic Exposure Scenario End of Life Tyre Guidance ». ChemRisk LLC. <http://www.etrma.org/uploads/Modules/Documentsmanager/chemrisk--09-12-16-end-of-life-tyre.pdf>.

———. 2017. « European tyre & rubber industry - Statistics - Edition 2016 ». ETRMA. <http://www.etrma.org/uploads/Modules/Documentsmanager/20161208---statistics-booklet-2016-final5.pdf>.

European Environment Agency. 2016. *EMEP/EEA Air Pollutant Emission Inventory Guidebook 2016: Technical Guidance to Prepare National Emission Inventories*. <http://bookshop.europa.eu/uri?target=EUB:NOTICE:THAL16020:EN>.

———. 2017. « EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2016 – Update May 2017 ».

E&Y. 2016. « L'impact socio-économique du rechapage poids lourd en France et en Europe - L'économie circulaire du pneu en danger ». [http://www.ey.com/Publication/vwLUAssets/ey-l-impact-socio-economique-du-rechapage-poids-lourd-en-france-et-en-europe/\\$FILE/ey-l-impact-socio-economique-du-rechapage-poids-lourd-en-france-et-en-europe.pdf](http://www.ey.com/Publication/vwLUAssets/ey-l-impact-socio-economique-du-rechapage-poids-lourd-en-france-et-en-europe/$FILE/ey-l-impact-socio-economique-du-rechapage-poids-lourd-en-france-et-en-europe.pdf).

Foley, Smyth, Murphy, et Gallachóir. 2011. « A well-to-wheel analysis of electric vehicles and greenhouse gas savings ». In . University College Cork. http://www.itrn.ie/uploads/SesA1_ID103.pdf.

Fonseca, Casanova, et Espinosa. 2010. « Influence of Driving Style on Fuel Consumption and Emissions in Diesel-Powered Passenger Car ». In . http://oa.upm.es/13473/1/INVE_MEM_2010_78666.pdf.

Gagnepain. 2005. « Les pneumatiques - influence du gonflage sur la consommation ». ADEME. <http://www2.ademe.fr/servlet/KBaseShow?sort=-1&cid=96&m=3&catid=13661>.

———. 2006. « La climatisation automobile - Impacts consommation et pollution ». Repères. ADEME. <http://www2.ademe.fr/servlet/getDoc?cid=96&m=3&id=25236&p1=00&p2=12&ref=17597>.

Gautier. 2006. « La lutte contre le bruit de roulement ». janvier. http://www.arts-et-metiers.net/pdf/JeanLucGautier_1_16.pdf.

Gense. 2000. « Driving style, fuel consumption and tail pipe emissions ». *TNO Automotive*, mars. <http://etec.vub.ac.be/publications/evs18jvm1.pdf>.

Gustafsson, Mats, Göran Blomqvist, Anders Gudmundsson, Andreas Dahl, Per Jonsson, et Erik Swietlicki. 2009. « Factors Influencing PM10 Emissions from Road Pavement Wear ». *Atmospheric Environment* 43 (31): 4699-4702. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.04.028>.

Hamet, Jean-François. 2003. « Les mécanismes de génération de bruit de roulement et l'influence des caractéristiques de chaussée ». *Acoustique & Techniques*, n° 32. http://www.infobruit.com/revues/78_09956.PDF.

Hong, Feng, et Jorge A. Prozzi. 2006. « Estimation of Pavement Performance Deterioration Using Bayesian Approach ». *Journal of Infrastructure Systems* 12 (2): 77-86. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1076-0342\(2006\)12:2\(77\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1076-0342(2006)12:2(77)).

Horvath. 2003. « Life-cycle Environmental and Economic Assessment of Using Recycled Materials for Asphalt pavements ». University of California, Berkeley. <http://uctc.net/research/papers/683.pdf>.

Hugrel, C, et R Joumard. 2004. « Transport routier - parc, usage et émissions des véhicules en France de 1970 à 2025 ». Rapport de recherche.

IAU. 2013. « La circulation routière en Île-de-France en 2010 ». Institut d'Aménagement et d'Urbanisme. http://www.omnil.fr/IMG/pdf/la_circulation_routiere_en_idf_en_2010.pdf.

IDRRIM. 2016. « Diagnostic et conception des renforcements de chaussées ». Référence.

INSEE. 2016. « a production de pneumatiques en France : une industrie concentrée ». INSEE FOCUS n°54. INSEE. <https://www.insee.fr/fr/statistiques/1908485#graphique-figure5>.

Jolliet, Saadé, et Crettaz. 2005. *Analyse du cycle de vie - Comprendre et réaliser un écobilan*. Gérer l'environnement. Presses polytechniques et universitaires romandes.

Joumard, Robert, et INRETS (Institute : France). 1990. *Emissions unitaires de polluants des véhicules légers: étude*. Arcueil: Institut national de recherche sur les transports et leur sécurité.

Kane, Do, et Piau. 2010. « On the Study of Polishing of Road Surface under Traffic Load ». *Journal of Transportation Engineering*, n° 136: 45-51.

Kerali, Odoki, et Stannard. 2006. *HDM-4 - Vue d'ensemble de HMD-4 (Version 2)*. Vol. 1. AIPCR - Banque Mondiale. http://www.hdmglobal.com/esp/hdm4v2_downloadGSPDF.asp?File=HDM4Version2_Vol1_Fra_webversion.pdf.

Kolli, Zehir. 2012. « Dynamique de renouvellement du parc automobile: Projection et impact environnemental ». UNIVERSITE DE PARIS I, PANTHEON-SORBONNE. <http://hal.archives-ouvertes.fr/tel-00860364/>.

Laboratoire central des ponts et chaussées (France). 2001. *Commande et contrôle des reconnaissances géotechniques de tracés*. Paris: LCPC.

Laganier, R, et J Lucas. 1990. « The Influence of Pavement Evenness and Macrotecture on Fuel Consumption ». In *Surface Characteristics of Roadways: International Research and Technologies*, édité par We Meyer et J Reichert, 454-454-56. 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959: ASTM International. <https://doi.org/10.1520/STP23381S>.

LCPC. 1998. « Catalogue des dégradations de surface des chaussées ». 52. Techniques et méthodes des LPC - Méthode d'essai. <http://portail.documentation.equipement.gouv.fr/dtrf/notice.html?id=Dtrf-0001954>.

LCPC-Sétra. 2000. « Aide à la gestion de l'entretien des réseaux routiers – volet chaussées - méthode ».

LCPC-Sétra, France. 1994. *Conception et dimensionnement des structures de chaussée*. Paris; Bagnaux: LCPC ; SETRA.

Le Maître, Süssner, et Zarak. 1998. « Evaluation of Tire Wear Performance ». Society of Automotive Engineers, Inc. https://www.google.fr/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&ved=0CDYQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.lpcb.org%2Findex.php%2Fcomponent%2Fdocman%2Fdoc_download%2F62-1998-france-evaluation-of-tire-wear-performance%3Fitemid%3D32&ei=syj5UdvZDKLA7Aauy4CgCw&usg=AFQjCNGd9t0rQfw7JfKTPKt4649Slq8Dyw&sig2=WtARsoOwZmfj25mHa1Nn-Q.

Le Moigne, Jean-Louis. 1984. *La théorie du système général: théorie de la modélisation*. 2e éd. mise à jour. Systèmes-décisions. Paris: Presses universitaires de France.

Leclercq. 2002. « Modélisation dynamique du trafic et applications à l'estimation du bruit routier ». Insa Lyon. <http://theses.insa-lyon.fr/publication/2002ISAL0070/these.pdf>.

Lelong, J. 1999. « Vehicle Noise Emission: evaluation of tyre/road and motor noise contribution ». In *Proceedings of Internoise 1999*. Fort Lauderdale, Florida, USA.

— — —. 2000. « Véhicules légers : Émission acoustique aux différentes allures urbaines et interurbaines ». Rapport LTE 2024. INRETS.

Lepert. 2006. « Gestion technico-économique des infrastructures routières ». *Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées*, n° 261-62: 3-23.

Louhghalam, A, M Akbarian, et F-J Ulm. 2014. « Pavement Infrastructures Footprint: The Impact of Pavement Properties on Vehicle Fuel Consumption ». Massachusetts Institute of Technology Cambridge, Massachusetts, United States. <https://cshub.mit.edu/sites/default/files/documents/louhghalam-Euro-C-2014.pdf>.

MEDDE. 2013. « Chiffres clés du transport - Edition 2013 ». Ministère de l'Écologie, du développement durable et de l'énergie. http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/fileadmin/documents/Produits_editoriaux/Publications/Reperes/2013/reperes-transport-2013.pdf.

Mellios, Giorgos, Stefan Hausberger, Mario Keller, Christos Samaras, Leonidas Ntziachristos, Panagiota Dilara, Georgios Fontaras, European Commission, Joint Research Centre, et Institute for Energy and Transport. 2009. *Parameterisation of Fuel Consumption and CO2 Emissions of Passenger Cars and Light Commercial Vehicles for Modelling Purposes*. Luxembourg: Publications Office. <http://dx.publications.europa.eu/10.2788/58071>.

MELTT. 1996. « Dictionnaire de l'entretien routier - volume 1-2-3 ». MELTT.

Michelin. 2007. « Brochure recreusage pour véhicules Poids Lourds ». http://www.michelintransport.com/ple/front/document.DocumentRepositoryServlet?codeDocument=2904&codeRepository=MICH_PLOE&codeRubrique=CatalogueTechnique.

National Research Council, et Transportation Research Board. 2010. *Highway Capacity Manual, 2010*. Washington, D.C.: Transportation Research Board.

Ntziachristos, Leonidas, et Zisis Samaras. 2017. « EMEP/EEA Air pollutant emissions inventory guidebook 2017 - Passenger cars, light commercial trucks, heavy-duty vehicles including buses and motor cycles ». Copenhagen: European environmental agency.

OCDE. 1992. « Le chargement dynamique des chaussées ».

———. 1998. « Technical report - Dynamic interaction between vehicles and infrastructure experiment (Divine) ». <http://www.oecd.org/sti/transport/roadtransportresearch/2754406.pdf>.

Odoki, et Kerali. 2000. *HDM-4 - Analytical Framework and Model Descriptions*. Vol. 4. AIPCR et Banque Mondiale.

Orfeuil, Jean-Pierre. 1984. « Les budgets énergie-transport ». INRETS. <https://trid.trb.org/view/1036283>.

Parsley, L. L, et R Robinson. 1982. « The TRRL, road investment model for developing countries (RTIM2) ». TRRL Laboratory Report 1057. Crowthorne, UK: Transport and Road Research Laboratory.

Plessis, Hw du, At Visser, et Pc Curtayne. 1990. « Fuel Consumption of Vehicles as Affected by Road-Surface Characteristics ». In *Surface Characteristics of Roadways: International Research and Technologies*, édité par We Meyer et J Reichert, 480-480-17. 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959: ASTM International. <https://doi.org/10.1520/STP23383S>.

Prades, José A. 1995. *L'éthique de l'environnement et du développement*. 1. éd. Que sais-je? 2967. Paris: Presses universitaires de France.

Prozzi, Jorge. 2001. « Modeling pavement performance by combining fuel and experimental data ». UC Berkeley. <http://www.uctc.net/research/diss066.pdf>.

Prozzi, Jorge A., et Samer M. Madanat. 2003. « Incremental Nonlinear Model for Predicting Pavement Serviceability ». *Journal of Transportation Engineering* 129 (6): 635-41. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(2003\)129:6\(635\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2003)129:6(635)).

Quinet, E, et al. 2013. « L'évaluation socioéconomique des investissements publics - Rapport final ». Tome 1.

Rèche, M. 2004. « Effet des travaux d'entretien sur les lois d'évolution des dégradations de chaussées ». Clermont-Ferrand: Université Blaise Pascal.

Reyna, Janet L., Mikhail V. Chester, Soyoung Ahn, et Andrew M. Fraser. 2015. « Improving the Accuracy of Vehicle Emissions Profiles for Urban Transportation Greenhouse Gas and Air Pollution Inventories ». *Environmental Science & Technology* 49 (1): 369-76. <https://doi.org/10.1021/es5023575>.

Robert, et Lafon. 2011. « Route - Matériaux, durabilité des chaussées ». <http://www-lmdc.insa-toulouse.fr/pres/mastergc/telechargement/pedagogie/COURS%20ROUTE%20UPS%20MASTER%202011%20II%20Impression.pdf>.

Rosnay, Joël de. 1975. *Le macroscope: vers une vision globale*. Paris: Éd. Points.

Sandberg, Ulf. 1990. « Road Macro- and Megatexture Influence on Fuel Consumption ». In *Surface characteristics of roadways*. Meyer/Reichert editors. <http://books.google.fr/books?hl=fr&lr=&id=hGoJxlkTrckC&oi=fnd&pg=PA460&dq=Sandberg,+Ulf+S.+I.+Ro+ad+Macro+and+Megatexture+Influence+on+Fuel+Consumption.+ASTM+STP+1031+page+460->

+479,+USA+1990&ots=cLlql_xoFP&sig=I5C19usl6E655ak-
WSONVF9DfzA&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false.

Santero, Nicholas J., Eric Masanet, et Arpad Horvath. 2011. « Life-Cycle Assessment of Pavements. Part I: Critical Review ». *Resources, Conservation and Recycling* 55 (9-10): 801-9. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.03.010>.

Sebaaly, Peter E., et Nader Tabatabaee. 1992. « Effect of Tire Parameters on Pavement Damage and Load-Equivalency Factors ». *Journal of Transportation Engineering* 118 (6): 805-19. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(1992\)118:6\(805\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(1992)118:6(805)).

Setra. 1998. « aménagement des carrefours interurbains sur les routes principales - carrefours plans ».

Sétra. 2000a. « Instruction sur les Conditions Techniques d'Aménagement des Autoroutes de Liaison ».

———. 2000b. « Instruction sur les Conditions Techniques d'Aménagement des Routes Nationales ».

———. 2009a. « Emissions routières de polluants atmosphériques - Courbes et facteurs d'influence ». 92. Note d'information Sétra.

———. 2009b. « Sondage de circulation 2004-2005 - Document de synthèse ». Les rapports. http://www.setra.equipement.gouv.fr/IMG/pdf/0942w_Sondage_de_circulation_2004-2005.pdf.

Sétra - Observatoire des Techniques de Chaussées. 1997. « Béton Bitumineux Très Minces et Ultra-Minces ». 94. <http://portail.documentation.equipement.gouv.fr/dtrf/pdf/pj/Dtrf/0000/Dtrf-0000609/DT609.pdf>.

SFA. 2010. « Chapitre 1 ». In *Le livre blanc de l'acoustique en France 2010 - L'acoustique dans les grands secteurs d'activité - Automobile*, 16-18. <https://www.sfa.asso.fr/fr/documentation/livre-blanc-/page16.pdf>.

Syrotta, Jean, Étienne Beeker, Alan Bryden, Johanne Buba, Caroline Le Moign, et Felix Von Pechmann. 2011. « La voiture de demain: carburants et électricité ». *Conseil d'Analyse Stratégique, Paris, Rapports&Documents*, n° 40. https://www.strategie.gouv.fr/en/system/files/cas_rapp37_voiture_de_demain_web_0.pdf.

Tang, Zhenzhong. 2007. « Polissage et adhérence des chaussées routières ». Ecole des Ponts ParisTech. <http://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00003623/>.

Tourenq, et Fourmaintraux. 1971. « Propriétés des granulats et glissance routière ». 51. Bulletin de Liaison, Laboratoire des Ponts et Chaussées. LCPC. <http://www.geotech-fr.org/sites/default/files/revues/blpc/BLPC%2051%20pp%2061-69%20Tourenq.pdf>.

US Department of Energy. 2013. « Fuel economy : where the energy goes ». US Department of Energy. septembre 2013. <http://www.fueleconomy.gov/FEG/atv.shtml>.

USIRF. 2015. « La dépense de gestion, d'entretien et d'investissement routier en France : Quelles réalités derrière les chiffres globaux et leurs évolutions pour les Travaux Publics ? - Etude sur neuf départements tests ». <http://www.usirf.com/wp-content/uploads/USIRF-Rapport-d%C3%A9tude-sur-la-d%C3%A9pense-de-gestion-d'entretien-et-d'investissement-routier-en-France-30.10.2015.pdf>.

Van Mierlo, Joeri, Gaston Maggetto, E. Van de Burgwal, et R. Gense. 2004. « Driving style and traffic measures-influence on vehicle emissions and fuel consumption ». *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering* 218 (1): 43-50.

Wang, Ting, In-Sung Lee, Alissa Kendall, John Harvey, Eul-Bum Lee, et Changmo Kim. 2012. « Life Cycle Energy Consumption and GHG Emission from Pavement Rehabilitation with Different Rolling Resistance ». *Journal of Cleaner Production* 33: 86-96. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.05.001>.

Watanatada, Herral, Paterson, Dhareshwar, Bhandari, et Tsunokawa. 1987. *The HDM standards model – Description of the HDM-III Model*. Vol. 1. The highway design and maintenance standards series 9951. The Johns Hopkins University Press. http://www.worldbank.org/transport/roads/rd_tools/hdm-iii%20_vol-1.pdf.

Zeng, Hongbo, éd. 2013. *Polymer adhesion, friction, and lubrication*. Hoboken, New Jersey: Wiley. <http://books.google.fr/books?id=kakXzMJfy9kC&pg=PA1&lpg=PA1&dq=zeng+Polymer+Adhesion,+Friction,+and+Lubrication&source=bl&ots=INZGTgB-uY&sig=LgyiiQheoHK-9Bi4sPFAbhDsfZk&hl=fr&sa=X&ei=BwuwUrcQB8LQ7Aa13ICYDw&ved=0CI0BEogBMAk#v=onepage&q=zeng%20Polymer%20Adhesion%2C%20Friction%2C%20and%20Lubrication&f=false>.

7 Annexes

Annexe 1. Répartition des catégories de trafic sur le Réseau National Interurbain (RNI) (Source : auteur ; chiffres calculés à partir de (Sétra 2009d))

Répartition du trafic total sur le RNI	VL (%)	PL (%)	DRM (%)
RN	40.3	5.18	0.366
Toutes autoroutes	45.9	8.02	0.271
Total	86.1	13.2	0.637

DRM : deux roues motorisées

RNI : Réseau National Interurbain

Répartition par type de véhicules sur le RNI	VL	PL	DRM
RN	47	39	57
Toutes autoroutes	53	61	43
Total	100	100	100

Annexe 2. Famille de chaussées (données (Corté, Guidoux, et al. 1998))

Famille de structure de chaussée	Matériaux			Epaisseurs indicatives
	Surface	Assise		
		Base	Fondation	
Souple	MB	MT aux liants hydrocarbonés (épaisseur < 15cm)	GNT (20 à 50cm)	Structure totale entre 300 et 800 mm
Bitumineuse épaisse	MB	MT aux liants hydrocarbonés (15 à 40cm)		Couches d'assise entre 150 et 400 mm
Semi-rigide (= à assise traitée aux LH)	MB (6 à 14cm)	MTLH (20 à 50cm)		Couches d'assise entre 200 et 500 mm
Rigide (=à structure en béton de ciment)	Béton de ciment ou MB	Béton de ciment (béton armé continu ou dalles)	Béton maigre ou bitumineux	
Mixte	MB	MTLH (10 à 20cm)	MTLH (20 à 40cm)	Surface / Assise : 50/50
Inverse	MB	MB (10 à 20cm)	GNT (12cm)	+ 1 couche MTLH de 15 à 20cm

MB = Matériaux Bitumineux GNT = Grave Non Traitée MT= Matériaux Traités MTLH = MT aux liants hydrauliques

Annexe 3. Constitution standard des chaussées types (Durand et Cousin 2009)

Nom de couche Type de chaussée	% RRN	Roulement		Assise				Type Plate-Forme
		Epaisseur	Matériau	Base		Fondation		
				Epaisseur	Matériau	Epaisseur	Matériau	
Epaisse	38	8 (cm)	BB	15(cm)	GB	15 (cm)	GB	PF2
Semi-rigide	41	8 (cm)	BB	25 (cm)	GC	20 (cm)	GC	PF2

Annexe 4. Questionnaire diffusé sur les pratiques de resurfaçage des routes interurbaines en France

PRATIQUES ET CARACTÉRISTIQUES DU RESURFAÇAGE ROUTIER EN FRANCE

Ce questionnaire technique va nous permettre de développer un modèle d'évaluation holistique de l'impact de la fréquence de renouvellement des couches de surface (i.e. resurfaçage) en France. L'objectif est de constituer une première bibliothèque restreinte de types de techniques d'entretien pertinentes par type de réseau (autoroutier, national/départemental principal, départemental secondaire/communal) et de développer la méthode en fonction des données d'entrée actuellement disponibles ou potentiellement disponibles sous 10 ans.

SECTION 1 – LE RENOUELEMENT DES COUCHES DE SURFACE ROUTIÈRES EN FRANCE

Vous appartenez à un-e : SCA / DIR / Conseil Départemental / Commune / Entreprise de construction / Autre

Quel type de réseau entretenez-vous? Autoroutier / National-Départemental principal / Secondaire-communal / Autre

Linéaire (en km pour les gestionnaires)

Budget d'entretien global (M€/an, k€/km)

Répartition (parts resurfaçage et autres, pour les gestionnaires) (%)

SECTION 2 – CHOIX DES TECHNIQUES DE RESURFAÇAGE

Ici, nous voulons comprendre quelles techniques vous utilisez pour renouveler vos tapis routiers, et pourquoi.

Quelle technique majoritaire de resurfaçage utilisez-vous [par type de réseau RA/RN/RD1/RD2/RC/Autre] [BBUM/BBTM/BBM/BBSG/BBME/ESU/ECF/Autre]

Si vous utilisez la technique citée sur moins de 80% du linéaire, précisez les autres techniques (%) par réseau

Base de votre réponse précédente: [Estimation à dire d'expert/ Données existantes exploitées/ Données existantes non exploitées mais communicables (éventuellement sous conditions)/ Données existantes hautement confidentielles]

Quelle épaisseur de matériaux mettez-vous en œuvre par technique (en mm)

Pouvez-vous lister la composition des matériaux de chacune de vos techniques? Ex : 95% de granulat + granulométrie, 4.5% de tel liant, 0.5% de tel additif...

Comment est choisie la technique de resurfaçage? Expliquez.

SECTION 3 – COÛT DES TECHNIQUES

De quels paramètres le coût de resurfaçage dépend-il, par technique?

Pouvez-vous donner des fourchettes de prix pour chaque technique, ainsi qu'une moyenne actuelle? (€HT/m²)

Connaissez-vous la répartition fine des coûts de resurfaçage (matières premières, main d'œuvre, assurance, ... ?)? Si oui, pouvez-vous les communiquer?

SECTION 4 – GESTION DES TRAVAUX

Cette section vise à comprendre les stratégies de planification des chantiers.

Quels types de planification mettez-vous en œuvre pour vos travaux de resurfaçage [Travaux de nuit / Travaux de jour] [Réduction de voirie sans alternat / Alternat / Coupure avec déviation]

Si vous utilisez plusieurs types de planification, quels sont vos critères de décision?

SECTION 5 – CONNAISSANCE DU PATRIMOINE (POUR LES GESTIONNAIRES)

Quelle est la fréquence d'entretien moyenne de votre/vos réseaux?

Fondement de votre réponse précédente: [Estimation à dire d'expert/ Données existantes exploitées/ Données existantes non exploitées mais communicables (éventuellement sous conditions)/ Données existantes hautement confidentielles]

Quels sont les facteurs de déclenchement de l'opération de resurfaçage (en % et selon quels seuils : adhérence, fissuration, orniérage, autre (défaut, budget, logiciel de gestion, ... : précisez))?

Fondement de votre réponse précédente: [Estimation à dire d'expert/ Données existantes exploitées/ Données existantes non exploitées mais communicables (éventuellement sous conditions)/ Données existantes hautement confidentielles]

Vous arrive-t-il de repousser l'opération de resurfaçage par contrainte budgétaire? [Fréquemment / Rarement / Jamais]

Si cela arrive fréquemment, expliquez à quelle fréquence, les arbitrages, les opérations de substitution et les conséquences selon vous

Considérez-vous des équivalences fonctionnelles/augmentation de durée de vie résiduelle par technique de resurfaçage? Si oui précisez : lesquelles, sur quelle base empirique/déterministe?

Faites-vous des relevés de : NGO, NMO ou NPO? Si oui: avec quel appareil, pourquoi, à quelle fréquence, dans quelles conditions, et vos données sont-elles communicables?

Faites-vous des relevés d'adhérence? Si oui: avec quel appareil, pourquoi, à quelle fréquence, dans quelles conditions, et vos données sont-elles communicables?

Annexe 5. Sources des facteurs d'usure de chaussée

(OCDE 1992)

- Pneus superlarges Vs pneus jumelés : x1.5 à x10
- Pneu isolé Vs pneus jumelés : x7 à 10 (en déformation)
- Déséquilibre des charges statiques entre essieux d'une suspension tandem => dégradation x1.5 à 3 (Gillespie) (=répartition inégale de la charge par la suspension)

(OCDE 1998) (DIVINE) : Type de suspension : suspension mécanique = rapidité d'usure de chaussée de 15% supérieure comparée à celle avec suspensions pneumatiques

(Tang 2007) : matériaux, climat, trafic, rayonnement (=>ensoleillement), gel/dégel

(Sebaaly et Tabatabaee 1992) : type, taille, et configuration des pneumatiques

(Gustafsson et al. 2009) : vitesse (Annexe 2)

Annexe 6. Extension de durée de vie selon les techniques de maintenance (Chehovits et Galehouse 2010; Horvath 2003)

TREATMENT TYPE	LIFE EXTENSION
Thin HMA Overlay	5 – 10 years
Hot In-Place Recycling	5 – 10 years
Chip Seal	3 – 6 years
Slurry/Micro Surfacing	3 – 5 years
Crack Sealing	1 – 3 years
Crack Filling	1 – 2 years
Fog Sealing	1 year

(Chehovits et Galehouse 2010)

Treatment	Average life extension (year)	Average GHG emissions (kg/m ²)	Average GHG emissions per year (kg/m ²)
HMA	7.5	5.8	0.77
HIPR	7.5	4.35	0.58
Chip Seal	4.5	0.45	0.10
Slurry Seal / micro resurfacing	4	0.25	0.063
Crack seal	2	0.08	0.040
Crack fill	1.5	0.14	0.093
Fog seal	1	0.043	0.043

(Calculé à partir de Chehovits et Galehouse (2010))

Maintenance Options	PARAMETERS					TOTAL EMISSIONS (g/m ²)				
	Treated Depth (mm)	Overlay Depth (mm)	Emulsion Amount (%weight)	Life time (years)	Cost (\$/m ²)	CO ₂	NO _x	SO ₂	PM-10	TOC
CIR	101.6	50.8	1.50%	105	3.09	23,599	16	4	6	4
HIR-Surfacing	25.0			55		172	5	0.3	0.32	0.4
HIR Repaving	25	25		8	4.28	11,695	10.1	2	3.1	2.1
HIR-Remixing	40	19		8	3.58	8,964	7.9	1.6	2.4	1.6
HMA-Overlay		25		65		12,323	27.1	3.2	4.3	3.5

(Horvath 2003)

Annexe 7. Définition et comparaison des méthodes de modélisation statistique d'évolution des dégradations (Lepert 2006)

- méthode de régression indirecte : on commence par ajuster par procédure itérative une courbe d'équation prédéfinie sur les observations faites sur chaque section routière, puis on détermine une relation entre les coefficient de cette courbe et les variables caractérisant les sections (variables explicatives)
- méthode de régression directe non linéaire : une équation qui intègre directement les variables explicatives pressenties est calée en exploitant toutes les observations disponibles sur l'ensemble des sections
- méthode des classes : les observations sont réparties dans des classes correspondant à des catégories d'états de dégradation. Un abaque expérimental est formé par les fonctions de répartition qui donnent la probabilité qu'une section soit encore dans une classe à un âge donné. En ajustant cet abaque expérimental sur un abaque théorique, on obtient les paramètres du modèle
- méthode dérivée des lois de survie : c'est une méthode dérivée de la théorie des lois de survie. On caractérise la probabilité pour qu'un indicateur de dégradation – par exemple le pourcentage de fissuration – franchisse des seuils successifs selon l'âge de la section

Critère	Régression indirecte	Régression directe	Méthode des classes	Méthodes des lois de survie
Prend en compte toutes les observations	Non	Oui	Oui	Oui
Intègre l'état de dépendance entre observations faites sur la même section	Oui	Non	Non	Non
Intègre l'identification directe des variables explicatives	Oui	Oui	Moins fine	
Produit directement une évaluation du degré de contribution des variables explicatives	Oui	Oui ²	Moins fine	Oui

Annexe 8. Modèles de performances

Les modèles de performance des chaussées relient les dégradations des chaussées aux états de sollicitations issus des divers modèles de calcul de sollicitations (modèle élastique semi-infini de Boussinescq de 1885, modèle élastique bicouche de Westergaard de 1926, modèle élastique bicouche de Hugg de 1938, modèle élastique multicouche de Burmister de 1943, modèle élastique tricouche de Jeuffroy de 1955, modèle viscoélastique tricouche VESYS de Kenis de 1978). Le modèle théorique de Burmister est le fondement théorique de la doctrine de dimensionnement française, et est également utilisé dans le logiciel Alizé : il modélise mécaniquement la structure routière par un massif semi-infini constitué d'une superposition de couches de matériaux d'épaisseur constante à comportement élastique linéaire isotrope (Durand et Cousin 2009). La performance dépend de l'état de la chaussée. En France, elle est évaluée via la fatigue au bas des couches liées et la déformation permanente au sommet du sol support. Aux USA, elle se base sur le pourcentage de faïençage, le linéaire de fissurations longitudinale et transversale, l'orniérage total et l'orniérage de l'enrobé, et enfin l'Index de Rugosité International IRI (Bressi 2012) : la performance aux USA dépend donc des dégradations structurelles comme surfaciques par différence aux modèles français. Une série de modèles empiriques de performance a été développée, se basant sur le Test Routier de la Banque Mondiale réalisé au Brésil dans les années 70 pendant presque 10 ans¹⁰⁴ (Watanatada et al. 1987). Le modèle de

¹⁰⁴ Étude citée sous « GEIPOD 1982 » mais sans référence dans le document suivant : http://espace.etsmtl.ca/80/9/ROY_Jean-Philippe.pdf

détérioration d'HDM y fait appel en mêlant une approche mécanique-empirique. Il inclut de nombreux paramètres dont ceux du climat : gel/dégel, gradients de température, températures, taux d'humidité. Il modélise les chaussées béton comme bitumineuses. Une étude de Lepert et al. publiée en 2007 présente un travail franco-québécois visant à établir des modèles de performance de chaussées, dans le but de mieux gérer l'entretien routier (analyse coût-avantage).

Annexe 9. Tableau de synthèse des propriétés des techniques de resurfacement (Communauté du Grand Lyon - Direction de la Voirie - VQL 2009)

(1)	Sécurité	Confort		Les possibilités d'apport structurel		
	Adhérence	Uni	Bruit	Orniérage	Imperméabilité	Anti-remontée de fissure
ESU	Bo	Ma	Ma		Bo	Ma
BBSG	Mo	Bo	Mo	Mo	Tb	Bo
BBM	Mo	Bo	Mo	Mo	Bo	Mo
BBi	Bo	Bo	Tb	Mo	Mo	Mo
BBCS	Mo	Bo	Mo	Ma	Bo	Mo
BBME	Mo	B	Mo	Tb	Tb	Bo
BBUM	Bo	(2)	Bo	Bo	Bo	Ma
BBTM	Bo	Mo	Bo	Bo	Bo	Ma
BBDr	Bo	Bo	Tb	Tb	Ma (3)	Mo
BBDP	Mo	Bo	Ma	Tb	Mo	Mo

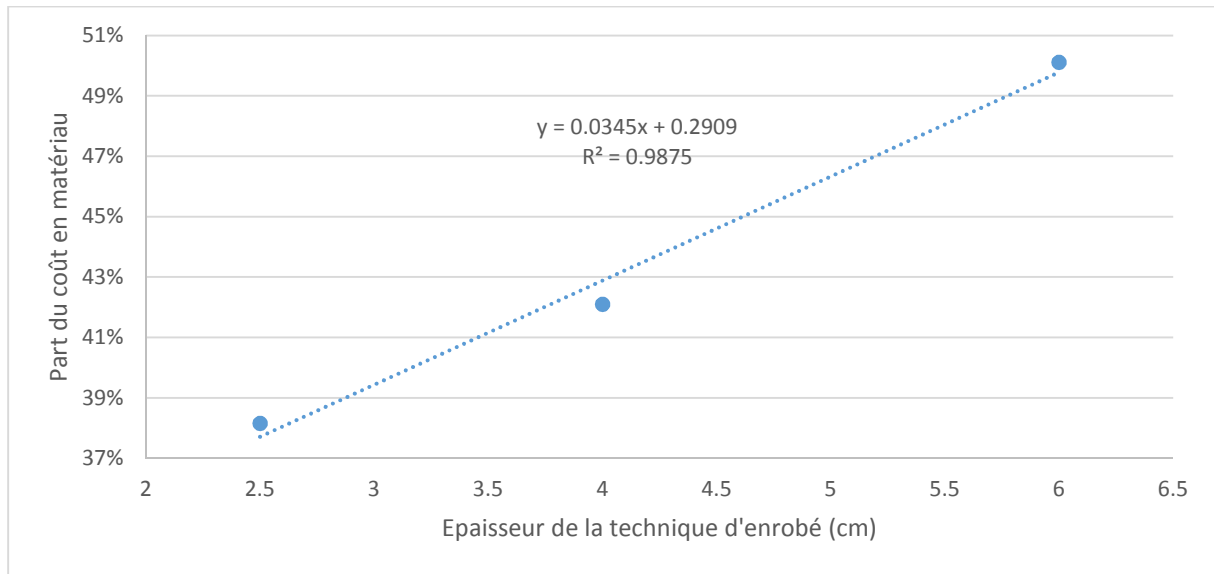
Légende :

Tb : Très bon
Bo : Bon
Mo : Moyen
Ma : Mauvais

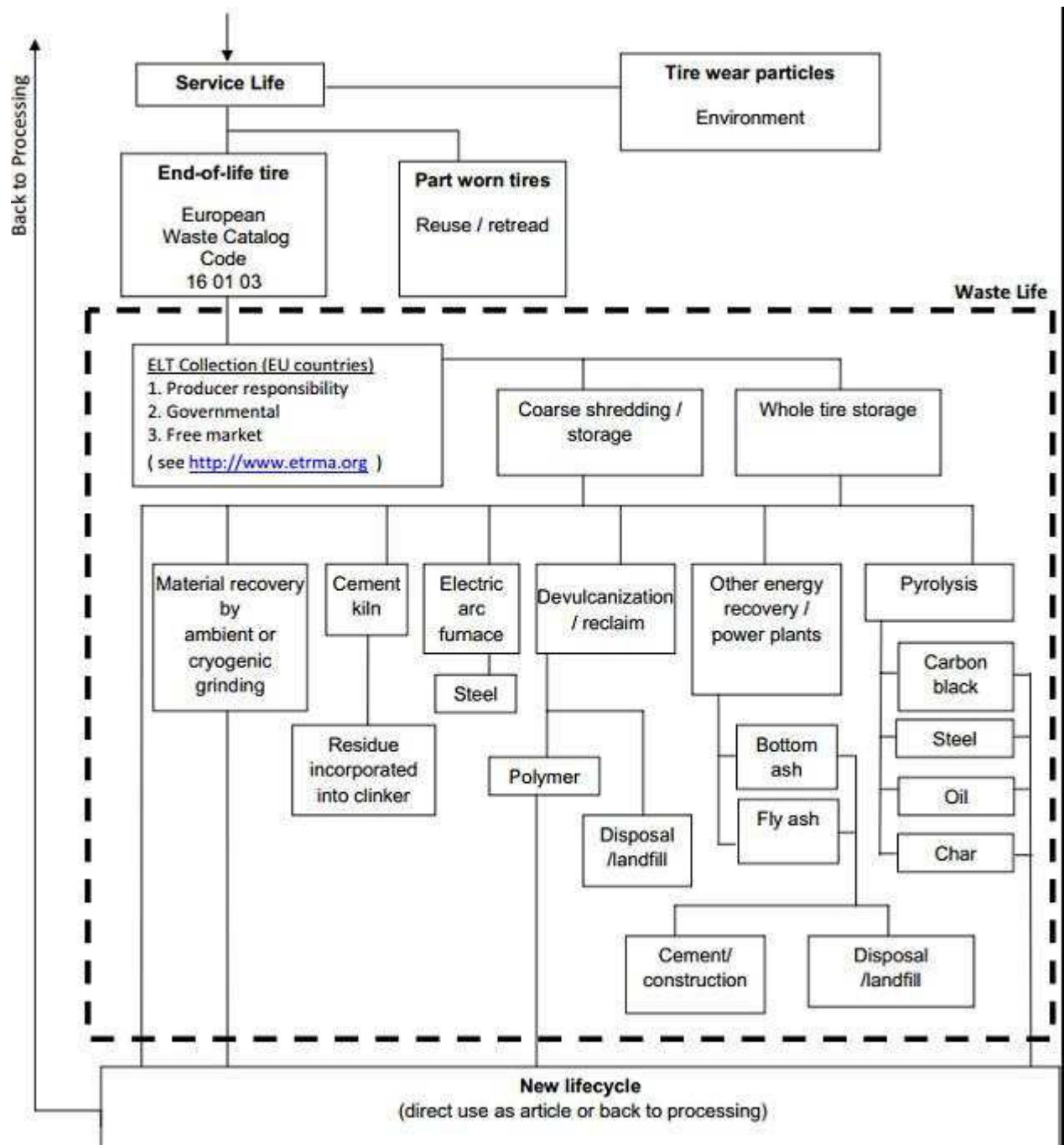
Annexe 10. Techniques d'entretien et spécifications pour chaussée à faible trafic (Cula 2011)

	Fréquence travaux (ans)		Types d'entretiens recommandés	Prix HT (€/m ²)		Coût de maintien à neuf (€/m ² .an)	
	Min	Max		Min	Max	Min	Max
<i>Chaussée neuve</i>	5	7	ESU ou ECF	2	3.2	0.3	0.6
<i>Chaussée fissurée</i>	7	12	Pontage de fissure + ESU, voire ECF	3.2	5	0.3	0.7
<i>Chaussée fortement fissurée + nids de poules</i>	12	20	Préparation + pontage + (reprofilage) +ESU bicouche / ECF	6	10	0.3	0.8
<i>Chaussée orniérée et fissurée</i>	15	25	GE + ESU bicouche ou enrobés à froid	10	15	0.4	1.0
			Recyclage en place +ESU	15	20	0.9	
<i>Chaussée affaissée, détruite</i>	20	30	<u>Ou</u>	<u>ou</u>		<u>Ou</u>	
			Reconstruction	40	60	2.5	






Annexe 11. Corrélation analytique entre épaisseur de la technique d'enrobé et part du coût en matériau sur le coût total



Annexe 12. phase de fin de vie des pneumatiques selon la réglementation REACH



Annexe 13. Tableau multicritère des types de sculptures pneumatiques

Type de sculptures	Avantages et Inconvénients				Applications principales		Aspect physique
	Résistance au roulement	Résistance aux dérapages latéraux	Usure	Confort, sécurité	Types de véhicules	Paramètres de conduite	
Nervures	Basse	Haute	Fatigue des sillons	Vibrations faibles, bonne conduite	VP, bus, camions légers	Routes pavées, hautes vitesses	
Pavés	Elevée	Plus basse		Bonne conduite, bruit plus élevé	PL, véhicules de construction & industriels	Routes régulières, routes non pavées	
Nervures-pavés			extrémités pavés, déchirures sillons	Puissance freinage basse	Camions, bus	Routes pavées, non pavées	
Bloc	Elevée		Rapide	Bon freinage	véhicules de sablage	Pneu d'hiver	
Asymétrique			Faible	Bon freinage	VP, parfois camions	Haute vitesse	

(Production personnelle, depuis informations sources : site internet Handkook Tire)

Annexe 14. Comparaison des couples de quelques véhicules thermiques et électriques (CAS 2011)

	Puissance maximale	Couple maximal
Nissan Versa [thermique]	80 kW	150 Nm
Nissan Leaf [électrique]	80 kW	280 Nm
Mitsubishi i [thermique]	47 kW	94 Nm
Mitsubishi i-Miev [électrique]	47 kW	180 Nm
Renault Fluence 1.6 [thermique]	81 kW	151 Nm
Renault Fluence Z.E. [électrique]	70 kW	226 Nm

Nm : Newton-mètre.

Annexe 15. Durées de Vie Typiques de pièces d'usure véhiculaires

Pièce	Durée de vie (km) (ou années)
Pneumatiques	33 000 à 50 000
Amortisseurs* (2) (3)	80 000 et 120 000
Crémaillère de direction*	250 000 à 380 000
Boîte de vitesses manuelle et automatique*	260 000 à 400 000
Embrayage*	140 000 à 200 000
Alternateur*	150 000 à 450 000
Démarrateur*	150 000 à 250 000
Cardans*	140 000 à 200 000
Filtre à huile (2)	15 000 (ou 1 an)
Filtre à air / Filtre d'habitacle (2)	30 000 (ou 2 ans)
Pneus / Plaquettes de freins avant (2)	30 000
Filtre (gasoil ou essence) (2)	60 000
Plaquettes de freins arrière/Disques de freins avant (2)	60 000
Batterie (2)	2 ou 4 ans
Disque de freins arrière (2)	120 000
Embrayage (2)	120 000
Moteur	
Durits diverses*	130 000 à 300 000
Turbo*	200 000 à 450 000
Débitmètre*	180 000 à 300 000
Pompe de gavage*	190 000 à 300 000
Pompe haute pression (injecteurs pompe etc ...)*	220 000 à 350 000
Injection*	230 000 à 260 000
Calculateur électronique d'injection*	320 000 à 400 000
Sonde lambda*	140 000 à 250 000
Vanne EGR*	170 000 à 300 000
Segmentation*	200 000 à 400 000
Pistons*	300 000 à 500 000
Bougies de préchauffage (diesels* / essence (2))	120 000 à 180 000 / 60 000
Culasse*	320 000 à 500 000
Joint de culasse*	250 000 à 400 000
Pompe à huile*	220 000 à 300 000
Pompe à eau*	220 000 à 300 000
Radiateur*	230 000 à 400 000
Ventilateur du radiateur*	200 000 à 400 000
Bielle*	300 000 à 40 000
Galet tendeur*	130 000 à 200 000
Volant moteur*	230 000 à 400 000
Arbre à cames*	250 000 à 400 000
Catalyseur*	180 000 à 250 000
Villebrequin*	280 000 à 400 000
Courroies de distribution et d'accessoire ((2) à (*))	60 000 à 120 000

(Sources : *manuel-automobile.com, (2) L'internaute Magazine l'internaute.com) (3) Différentes sources en ligne

Annexe 16. Sources de facteurs de résistance au mouvement

Rugosité (méga- et macro- textures) :

- +6 à 11% :
 - Descornet 1990, Lagarnier et Lucas 1990 : +6% due macrotexture
 - Sandberg 1990 : +11% uni, +7% macrotexture
 - Du Plessis et Al. 1990 : uni +11%, Megatexture +10%, Macrotexture +5%

Rigidité des bétons bitumineux => dissipation viscoélastique :

- 2000 : +11%
- NRC-CNRC 2006 : 1 à 2%
- NPC 2002 : 1% max
- Chupin 2001, Benbow et Al. 2007 : +1%)
- Wang et Al. 2012 et Ulm and Akbarian 2012 (MIT, article à paraître (TRR))

Régime de trafic, météo, état de chaussée, rigidité pneumatique: HDM-4 (Odoki et Kerali)

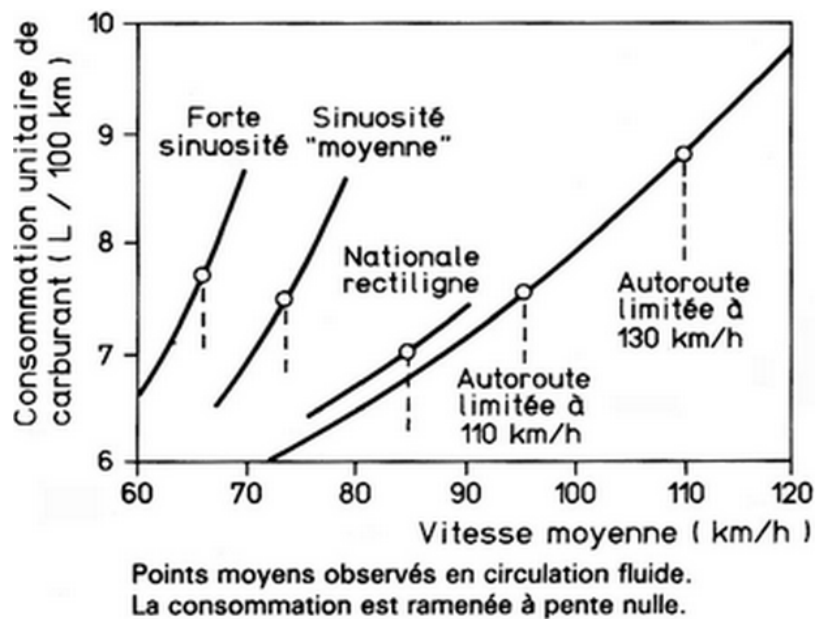
Géométrie (virages + profil en lg) : Berthier 1991

Type de véhicule et cycle de conduite : Clark et Dodge 1979

Conduite, vitesse, maître-couple, charge, météo, alignement d'essieu, pneus, surface de chaussée : GoodYear.com

Résistance au roulement : tous les paramètres => Balmer et Gallaway 1983

Annexe 17. Consommation unitaire de carburant par le trafic de véhicules légers selon la vitesse et le type de parcours

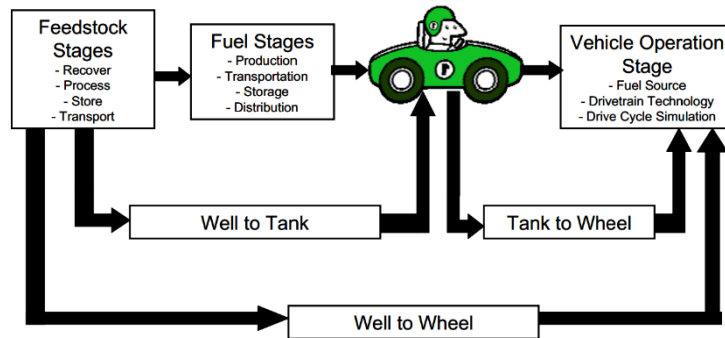


Annexe 18. Réduction potentielle des consommations (CAS 2011)

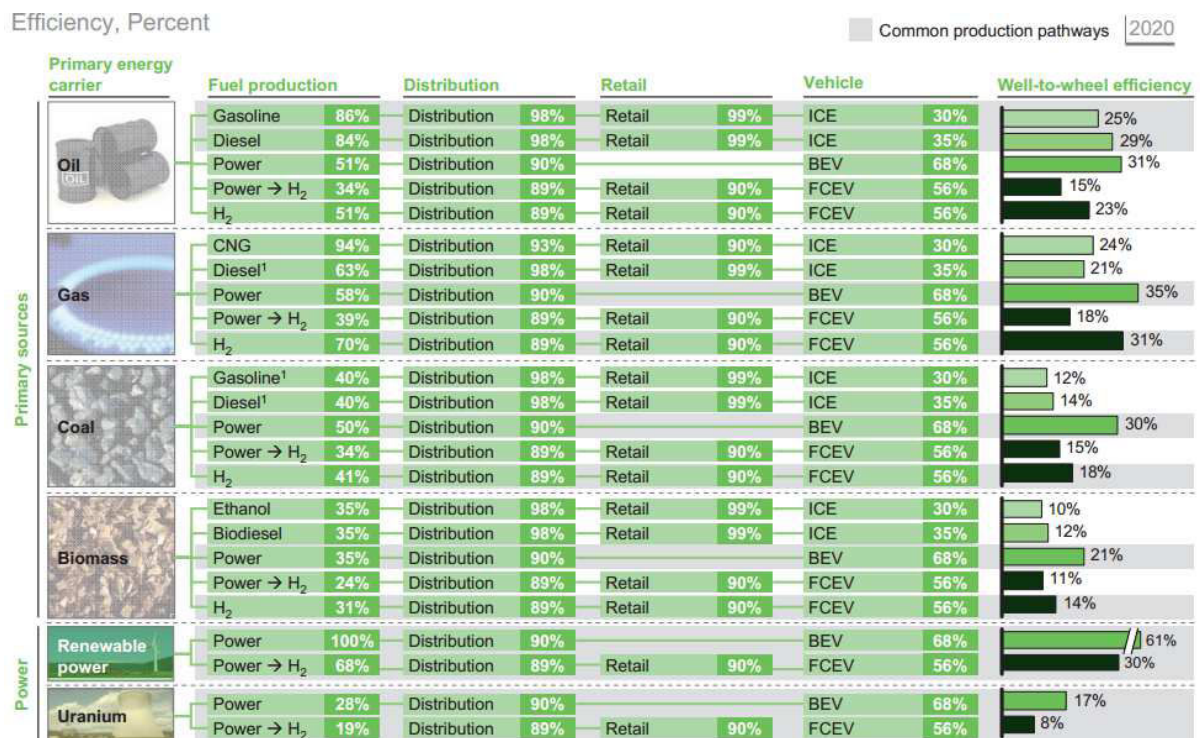
Réduction potentielle des consommations du réservoir à la roue	Gain potentiel
Allègement [nouveaux matériaux]	7 %
Aérodynamisme	4 %
Pneumatiques à bas frottement	3 %
Système de contrôle de la pression des pneus	3 %
Système de climatisation	5 %
Direction assistée électrique [par rapport à la direction assistée hydraulique]	2 %
Pompe électro-hydraulique pour boîte de vitesses	2 %
Transmission automatisée	4 % à 6 %
Éclairage [LED]	3 %
Autres [gestion thermique optimisée, sécuritéE]	5 %

Les gains indiqués sont non cumulatifs et les pourcentages ne doivent pas être additionnés.

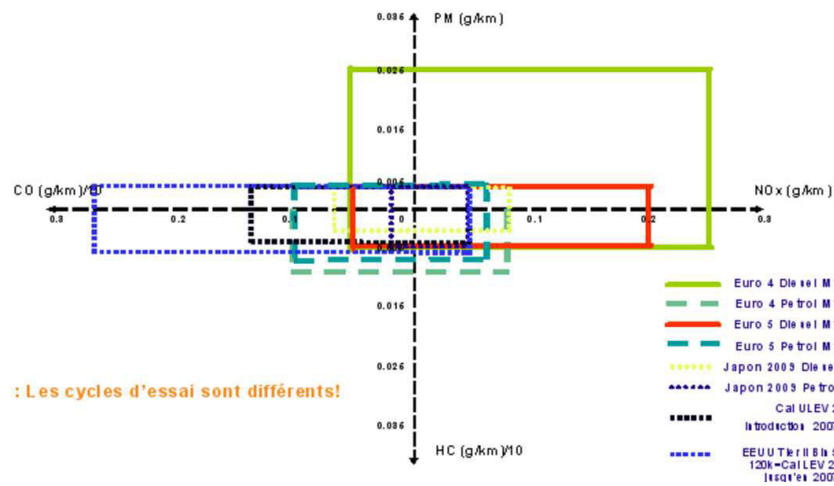
Annexe 19. Illustration des différents types de rendements énergétiques véhiculaires (Foley et al. 2011)



Annexe 20. Rendements énergétiques des différents types de VP par source énergétique unique (Sources : CONCAWE-EUCAR JEC-WTW study)



Annexe 21. Comparaison des valeurs limites d'émissions pour les voitures entre l'Union Européenne, le Japon et la Californie (source : senat.fr¹⁰⁵)

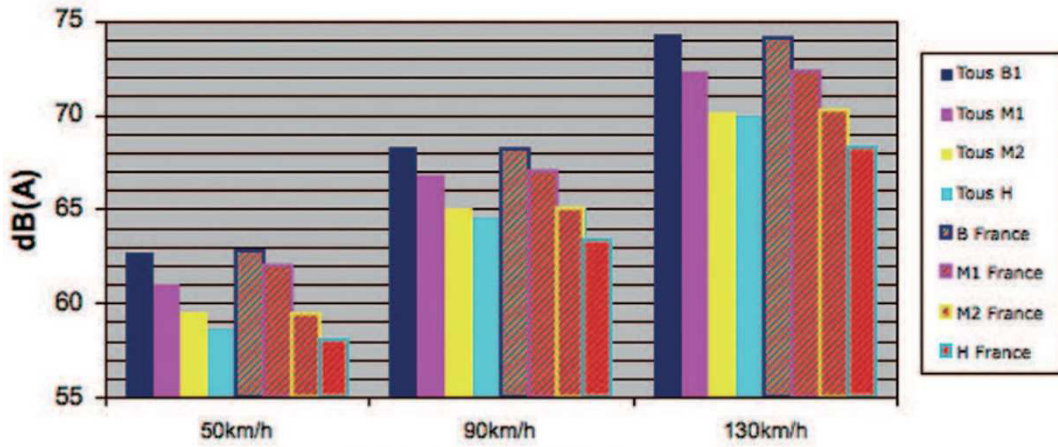


Annexe 22. Les segments VL européens et leurs niveaux d'émissions sonores moyens (SFA 2010)

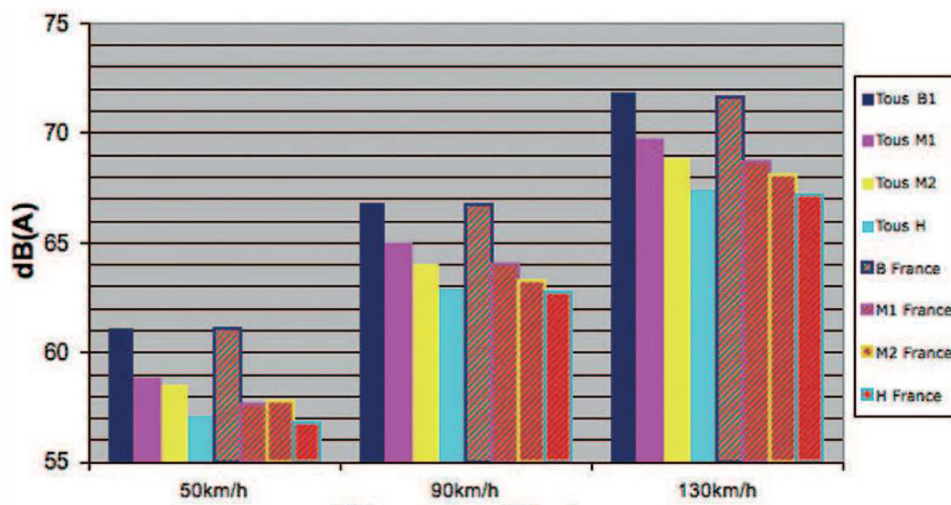
Les segments VL européens sont les suivants :

- B1 : urbaines ou mini/petites citadines
- M1 : compactes
- M2 : familiales ou intermédiaires
- H : routières, berlines de luxe et limousines

¹⁰⁵ <https://www.senat.fr/rap/r05-125/r05-12519.html>



Niveaux sonores des véhicules par segments et selon la vitesse, en Europe et en France en 1996



Niveaux sonores des véhicules par segments et selon la vitesse, en Europe et en France en 2006

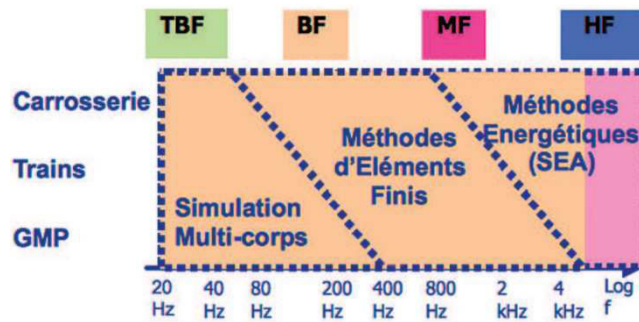
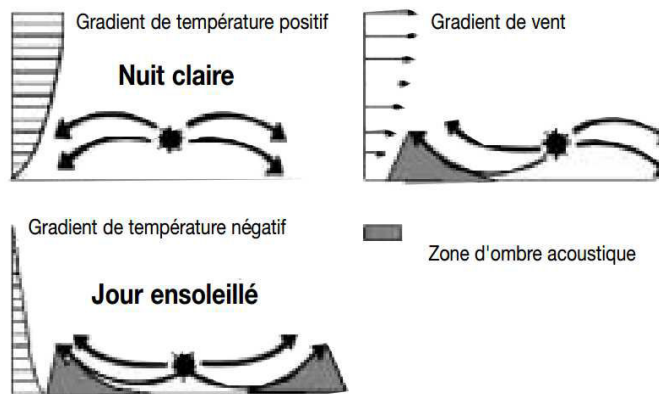


Figure 22 Outils de simulation pour les 3 principaux sous système d'un véhicule (SFA 2010)

Annexe 23. Source principale de bruit (chiffres en dB(A)) selon motorisation et rapport de vitesse pour une VP à vitesse constante (Lelong 1999)

Gear ratio	Gas & Diesel		Hybrid & Electric	
	Main noise source	Bracket (dB)	Mode electric	Mode thermal
1	Motor	7	Reduc. > 10 dB	Reduc. > 5 dB
2	Motor	5	Reduc. > 3 dB	Reduc. > 2 dB
3	Equivalent	4	Reduc. > 2 dB	=
4	Tyre/road	3	=	=
5	Tyre/road	3	=	=

Annexe 24. Influence des conditions atmosphériques sur la trajectoire des rayons sonores (Bérenghier et al 2001)



CHAPITRE 2 – Systémique des impacts du resurfaçage des chaussées

Table des matières

1	Introduction : représentations de l'objet étudié	128
1.1	Des impacts hétéroclites	128
1.2	Trois strates représentatives complémentaires.....	128
2	Système géophysique terrestre	129
2.1	Représentation: approche et causalités.....	129
2.2	Capital abiotique	130
2.2.1	Dépenses	130
2.2.2	Recettes	132
2.3	Système climatique	133
2.3.1	Effet de serre	133
2.3.2	Changement climatique : variations de stocks et d'états	134
2.3.3	Émissions de GES.....	135
2.4	Hydrologie et circulations aériennes.....	135
2.4.1	Circulations aériennes	136
2.4.1.1	Cellule de Hadley.....	136
2.4.1.2	Cellule de Ferrel et cellules polaires.....	136
2.4.1.3	Impact de l'entretien.....	136
2.4.2	Composition atmosphérique.....	137
2.4.3	Hydrologie	137
2.4.3.1	Généralités géophysiques	137
2.4.3.2	Impact de l'entretien.....	137
2.4.4	Évènements climatiques extrêmes	138
2.5	Températures.....	139
2.6	Orographie.....	139
2.7	Environnement sonore.....	139
2.7.1	Base de données du LRPC Strasbourg.....	139
2.7.2	Évolution des propriétés acoustiques des couches de roulement (Bérenghier 2001)	140

2.8	Synthèse	140
3	Système écologique	141
3.1	Ancrage théorique : l'écologie routière (Fourès et Pech 2015)	141
3.2	Processus environnementaux affectés par le transport routier par milieu naturel	142
3.2.1	Atmosphère	142
3.2.2	Hydrosphère	143
3.2.3	Lithosphère.....	143
3.2.4	Enjeux principaux dans les écosphères	143
3.3	Approche multi-échelle des impacts de l'entretien routier	143
3.3.1	Différentes échelles en interaction	143
3.3.2	Effets aux niveaux micro-local à local	144
3.3.3	Effets au niveau local étendu	145
3.3.4	Effets au niveau global	145
3.3.4.1	Augmentation de température	145
3.3.4.2	Déséquilibre hydrique	146
3.3.4.3	Acidification marine	146
3.3.4.4	Montée du niveau de la mer (Paskoff 1998)	146
3.3.4.5	Événements extrêmes.....	147
3.3.4.6	Augmentation de la concentration en CO ₂ atmosphérique.....	147
3.4	Biodiversité et gestion patrimoniale des espèces.....	147
3.4.1	Biodiversité.....	148
3.4.1.1	Composantes.....	148
3.4.1.2	Nombre d'espèces.....	148
3.4.2	Évolutions écologiques.....	148
3.4.3	Préservation de la biodiversité	149
3.4.3.1	Biocentrisme.....	149
3.4.3.2	Anthropocentrisme et enjeux utilitaires	150
3.4.4	Synthèse	151
4	Système socioéconomique	151
4.1	Penser le système socioéconomique de l'entretien routier	152
4.1.1	Société : définitions et articulation à l'individu.....	152
4.1.2	Éthique économique et social et notion de vie bonne.....	153
4.1.3	Bien-être sociétal.....	154
4.1.3.1	Besoins individuels (Maslow 1943)	154
4.1.3.2	Économie du bien-être	154

4.1.3.3	Économie du bonheur: mesure et analyse.....	155
4.1.3.4	Économie du bien-être versus Économie du bonheur.....	157
4.1.3.5	Synthèse	158
4.1.4	Règles fondamentales de la société française	159
4.1.4.1	Déclaration des Droits de l'Homme et du Citoyen et Préambule de la constitution 159	
4.1.4.2	Charte de l'environnement	159
4.1.4.3	Enseignements	160
4.2	Impacts socioéconomiques de l'entretien routier	160
4.2.1	Individus et parties prenantes.....	161
4.2.1.1	Diagnostic unitaire : L'individu spatial et temporel	161
4.2.1.2	Associations et interactions des individus.....	163
4.2.2	Impacts par partie prenante.....	165
4.2.2.1	Usagers	165
4.2.2.2	Riverain.....	174
4.2.2.3	Nation	185
4.2.2.4	Environnement.....	189
5	Conclusion.....	196
6	Bibliographie	197
	Annexes	206

1 Introduction : représentations de l'objet étudié

La route est un objet complexe. Source d'accessibilité, d'emplois, de revenus publics et de développement économique, elle représente néanmoins une dépense d'investissement et d'exploitation en même temps qu'un poste de dépense des ménages. Elle impacte également fortement l'environnement à plusieurs titres tout au long de son cycle de vie : consommation de ressources fossiles (bitume, carburant) et minérales (granulats, ciment), d'eau et d'espace, contribution au changement climatique, perturbation des milieux naturels (acidification, eutrophisation), fragmentation des espaces naturels et impact paysager, émissions polluantes dans l'air, l'eau et les sols, risques de pollution accidentelle, production de déchets. Si ces impacts sont généralement documentés et quantifiés, qu'en est-il des conséquences spécifiques de l'entretien routier sur le bilan de ce système ? Le but de ce chapitre est de décrire de manière principalement qualitative les impacts d'un système de transport que l'on transforme : la maintenance routière est un ensemble d'opérations d'entretien des chaussées et des dépendances de l'infrastructure qui vient en modifier les performances à la fois écologiques, sociales, et économiques.

1.1 Des impacts hétéroclites

Tout d'abord, on doit différencier les effets concomitants de l'entretien – ceux qui se produisent pendant la phase de travaux – de ceux que l'on qualifiera de différés, liés aux impacts des travaux sur l'état de la chaussée et qui se produisent plus tard, par exemple quand celle-ci est utilisée. Ces derniers ont des effets à plus ou moins long terme (bruit généré par le contact pneu-chaussée concomitant à l'utilisation de la route Vs émissions de GES ayant un temps de rémanence dans l'atmosphère plus ou moins long, et donc un impact sur le climat à plus ou moins long terme), plus ou moins localement (à titre d'exemple, le bruit est plutôt local, le changement climatique est global). De plus, les conséquences des travaux d'entretien et de l'effet de cet entretien sur la chaussée sont souvent antinomiques. Ces effets sont à la fois nombreux, différents par nature, et pourtant souvent interdépendants : les exposer de manière à la fois simple, concise et fidèle n'en demeure que plus difficile, et nécessite à la fois un choix de posture théorique et une sélection des phénomènes les plus représentatifs et conséquents pour l'intérêt collectif.

1.2 Trois strates représentatives complémentaires

De ce fait, nous avons déterminé trois strates (Figure 23) qui permettront de cerner et définir le système de manière pluridisciplinaire afin de classifier les impacts de la maintenance, complexes par leur hétérogénéité spatiale, temporelle, et de nature entre autres, et par leur caractère systémique qui transparait particulièrement par le grand nombre de boucles de rétroaction dans les phénomènes mis en jeu, dont nous essaierons de mettre en évidence les principales par strates géophysique (Figure 24), écologique (Figure 29), puis socioéconomique (Figure 30). On peut considérer que les strates géophysiques et écologiques recouvrent les impacts à l'environnement selon une approche biocentrique, tandis que la strate socioéconomique adopte davantage un point de vue anthropocentrique, d'où un équilibre dans le développement de ces deux pans.

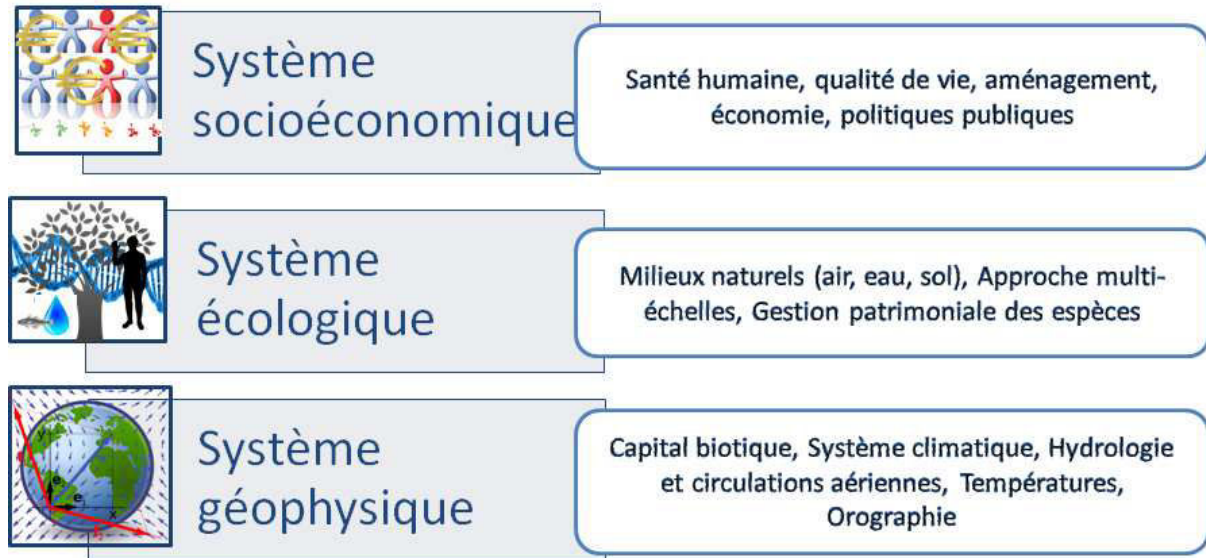


Figure 23 Strates de classification des enjeux de l'entretien routier

La description du système géophysique et des impacts de cet ordre générés par l'entretien routier se concentrera sur une représentation de la terre et de l'environnement local sous forme de stocks de matières et d'énergie dont l'état est décrit par des variables d'état physiques. Ce système est le réceptacle, le substrat d'espèces vivantes en interaction les unes avec les autres, affectées par l'état physique terrestre. Ces écosystèmes et les principales relations de cause à effet liées à l'entretien des infrastructures routières seront ensuite traités dans la partie sur le système écologique. Nous expliquerons les phénomènes biologiques mis en jeu, phénomènes qui affectent à leur tour le bien-être humain par le biais de la modification des services écosystémiques. Ce bien-être sera discuté en relation avec l'état des routes du point de vue strictement socioéconomique dans la dernière partie dédiée à cette représentation anthropocentrique, sans oublier de traiter les impacts sur cette sphère des modifications géophysiques de l'environnement humain.

2 Système géophysique terrestre

2.1 Représentation: approche et causalités

La géophysique est l'étude de l'origine et des variations spatiales et temporelles des caractéristiques physiques d'une planète. Elle peut concerner l'intérieur, l'extérieur, ou les couches limites d'une planète et inclut en particulier l'hydrologie, la météorologie, la climatologie, la géodésie, et la géophysique appliquée qui s'intéresse aux stocks de matières et d'énergie (gisements de minerais utilisés et d'énergies). Dans cette partie, nous choisirons une approche de l'environnement sous forme de stocks dont l'état est décrit par des variables physiques – niveau de bruit, topographie terrestre, variables thermodynamiques¹⁰⁶ (climatiques dans le cas de la distribution statistique des conditions de l'atmosphère terrestre dans un endroit donné pendant une période donnée), etc. Nous chercherons à donner une explication des modifications du système apportées par l'entretien des chaussées via des lois physiques qui régissent son comportement. Un schéma de causalité est proposé en Figure 24 afin de présenter les phénomènes les plus notables dans ce mode de représentation géophysique. La figure se lit ainsi : quand l'état des chaussées se dégrade, l'entretien et la consommation véhiculaire augmentent.

¹⁰⁶Thermodynamique au sens de science des grands systèmes en équilibre

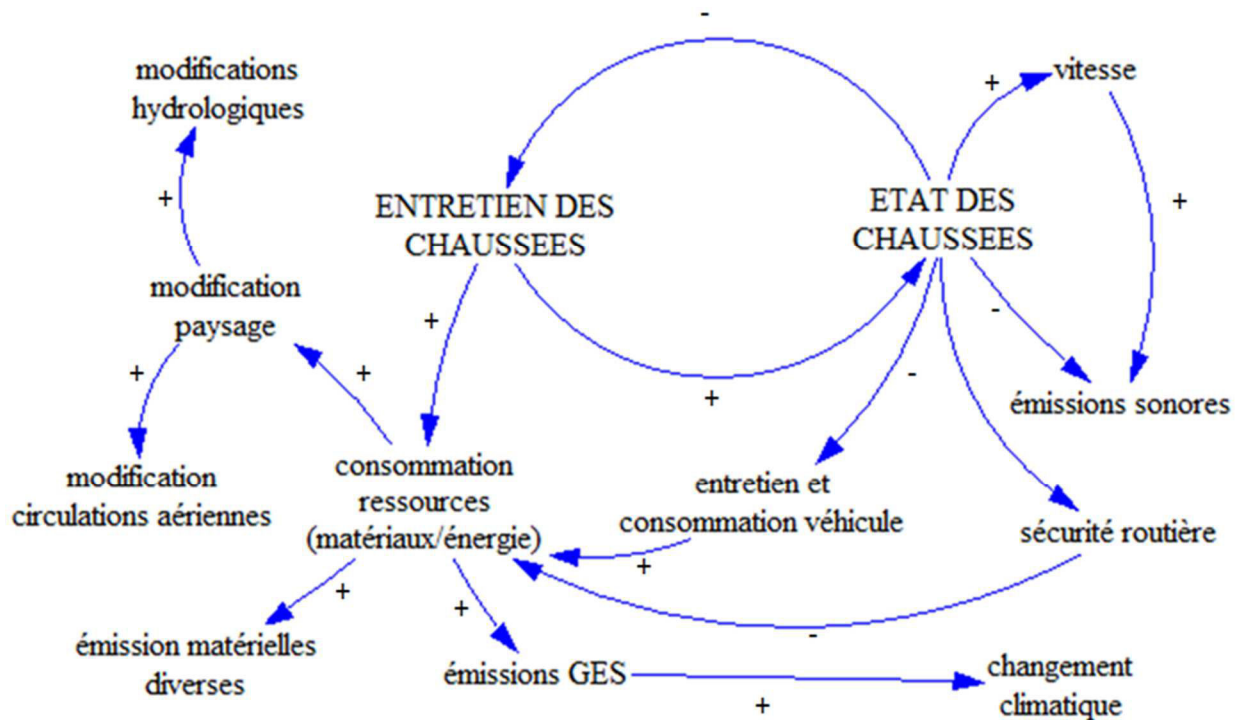


Figure 24 Principales boucles causales d'impacts géophysiques liés à l'entretien des routes

2.2 Capital abiotique

Les principaux phénomènes liés à l'entretien routier et agissant sur la consommation de ressources sont représentés sur la Figure 25 et détaillés ensuite.

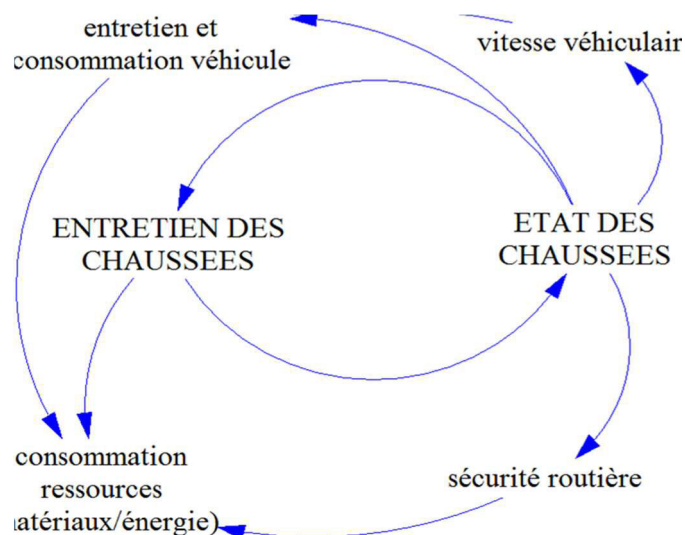


Figure 25 Boucles causales de l'entretien des routes résultant sur des consommations de ressources géophysiques

2.2.1 Dépenses

Une infrastructure routière, comme tout objet physique, se détériore au cours du temps, et nécessite un entretien pour son bon fonctionnement et sa préservation : c'est l'objet de la gestion patrimoniale. Une opération d'entretien des chaussées nécessite pour sa réalisation une dépense de diverses ressources. D'abord, elle consomme un capital naturel abiotique : matériaux et énergie nécessaires à la réalisation du chantier, soit directement pour les travaux comme les granulats utilisés dans la route, les matériaux et l'énergie utilisés pour construire et faire fonctionner les engins de chantier, soit

indirectement pour l'amortissement de toutes les fonctions supports comme les différentes structures nécessaires à la réalisation de l'opération : locaux de travailleurs, infrastructures de transformation de matériaux, etc. Ensuite, elle mobilise un capital humain, soit du travail, tout au long du projet, de la planification à la réalisation des travaux. Cette mobilisation est également reliée à des dépenses de capital naturel. Un capital peut être vu comme un stock, une somme de ressources qu'il faut gérer dans le temps si l'on veut maintenir un certain niveau d'activités consommatrices de ce capital : si la consommation de ce capital est plus rapide que son renouvellement, le stock diminue. Or, si le stock diminue, la capacité d'activités consommatrices diminue également.

L'entretien routier consomme des ressources abiotiques, et entre en concurrence avec toutes les autres activités consommatrices de ces mêmes ressources, dont l'énergie. Or, toute activité consomme des ressources énergétiques, qui peuvent aujourd'hui être considérées comme finies quelle que soit leur source¹⁰⁷. Une ressource ayant eu un usage subit des modifications d'état qui ne lui permettent que rarement une même utilisation par la suite. Par exemple, un granulats va s'user (polissage, microfissuration...), un liant hydrocarboné va vieillir (modification de composition chimique), etc. On pourra réutiliser les fraisats d'enrobés, mais pas au même niveau de performance que celui d'origine (en sous-couches, ou en couche de roulement mais à 20 ou 30%, rarement plus). De plus, il y a souvent des pertes de matières lors des transformations : une partie se disperse dans l'air, dans l'eau ou dans les sols. Cette matière existe toujours dans l'environnement, toutefois, non seulement elle n'est plus facilement accessible pour une utilisation par l'être humain, mais en plus elle peut venir perturber l'environnement.

Quelques chiffres sur les granulats : comme on l'a dit au chapitre 1, ce sont les morceaux de roche et le sable qui forment la matrice des matériaux routiers, auxquels on donne une cohésion en utilisant des liants routiers. Ils sont aussi utilisés dans les bétons de construction des bâtiments, etc. En France, on consomme environ 330 millions de tonnes de granulats par an (UNICEM et UNPG 2018), soit 5t/personne.an. On différencie 3 catégories de granulats. Les granulats alluvionnaires issus de (anciens) lits de cours d'eau ou fonds marins sont plutôt meubles, contrairement aux granulats de roches massives. Les granulats de recyclage et granulats artificiels sont par exemple fabriqués à partir de béton de démolition, de laitiers de hauts fourneaux¹⁰⁸, ou de mâchefers d'incinération. On compte une production d'enrobés en France d'environ 36Mt (USIRF 2012). Cette production est à la baisse, ce qui peut s'expliquer à la fois par le volume d'entretien routier à la baisse, et l'augmentation du taux de réintroduction d'agrégats d'enrobés recyclés en hausse de 12.7 à 62% entre 2003 et 2012, suite aux accords de convention d'engagement volontaire de l'industrie routière engagée après le Grenelle de l'Environnement. Les enrobés sont le principal matériau utilisé en resurfaçage. Aujourd'hui, les travaux neufs et l'entretien routier présentent le même chiffre d'affaire : on peut donc considérer que l'essentiel des enrobés consommés en France est utilisé en entretien, puisque la surface totale des enrobés réalisés sur chantiers neufs est nécessairement très faibles comparées à celles des chantiers d'entretien. Les enrobés étant constitués d'environ 95% de granulats en masse, nous considérerons que l'industrie de l'entretien routier consomme environ 35Mt de granulats tous les ans, soit presque 10% de la consommation annuelle nationale de granulats tous secteurs confondus. Ce secteur entre donc substantiellement en concurrence avec les autres, et contribue de manière notable à l'appauvrissement local des ressources en granulats, qui peut nécessiter d'aller chercher des granulats

¹⁰⁷Les énergies dites renouvelables s'appuient toutes sur des équipements physiques constitués de matières non renouvelables transformées avec un certain travail donc une certaine énergie

¹⁰⁸ <http://dspace.univ-tlemcen.dz/bitstream/112/623/1/Utilisation-de-granulats%20de-laitier-cristallise-comme-materiau-de-construction-en-technique-routiere.pdf>

plus loin. Or, le transport va présenter des effets négatifs autant du point de vue financier qu'environnemental comme nous l'avons illustré au chapitre précédent. Les pénuries locales en granulat génèrent ainsi une surconsommation en pétrole. Sans parler de l'usure structurelle accélérée de la chaussée (charges lourdes des camions de fret de granulats). Il n'est pas forcément pertinent de définir un seuil de stock national de granulat en-deçà duquel ne pas chuter, car on vient de l'illustrer, la localisation fine de la ressource va avoir une grande importance. De plus, la question peut même se poser moins en termes de stock réel qu'en stock énergétiquement et/ou financièrement exploitable. C'est une question qui se pose en exploitation pétrolière, de plus en plus profonde et dont le « rendement énergétique » est donc toujours plus faible. Le système à prendre en compte est donc assez large. On peut en tout cas avancer que la consommation de granulats excède déjà le raisonnable, dans la mesure où des pénuries existent déjà et créent des dynamiques néfastes à l'environnement. Les chaînes de causalité des politiques d'entretien routier sur le prélèvement de ressources non renouvelables sont présentées sur la Figure 26.

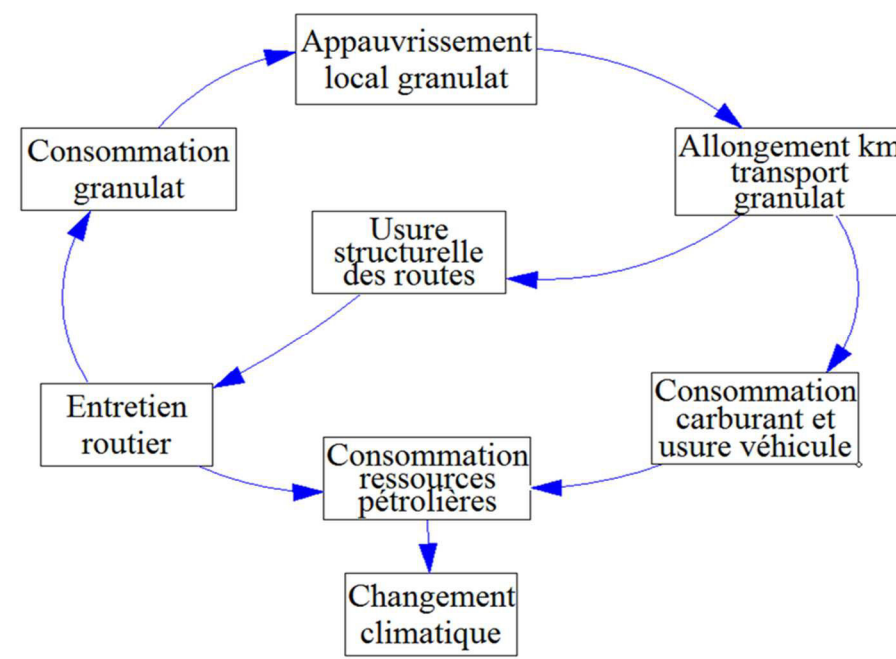


Figure 26 Chaîne d'impacts simplifiée des consommations directes de ressources par l'entretien routier

2.2.2 Recettes

L'opération d'entretien est réalisée dans le but d'améliorer l'état de la chaussée. Selon sa nature, elle peut améliorer la longévité patrimoniale comme le niveau de service (sécurité et confort des usagers). Dans le premier cas, augmenter la longévité de l'infrastructure permet de repousser sa reconstruction, ainsi l'opération génère en principe un effet positif¹⁰⁹ en termes de consommation de ressources abiotiques sur cycle de vie. Dans le second cas, le bon état de surface de la route permet de limiter les accidents, sources de consommation de ressources (dégradations de véhicules, chaîne de prise en charge de l'accident et des victimes, congestion éventuelle voire sur-accident), et possède également un effet sur la consommation en énergie de traction des véhicules, en pièces et main d'œuvre pour leur entretien, et dans une certaine mesure sur la vitesse praticable¹¹⁰ (particulièrement dans le cas de routes très dégradées, qui restent actuellement rares en France).

¹⁰⁹Par rapport à une option de référence où l'on n'entretient pas la route

¹¹⁰Tout conducteur aura déjà expérimenté le besoin de ralentir à la rencontre de nids de poule

Dans le cadre d'une gestion durable des stocks de matières et du patrimoine énergétique, il conviendrait à terme¹¹¹ que ce bilan « dépenses-recettes » soit au moins neutre si ce n'est positif (i.e. une unité d'un type de flux dépensée pour l'entretien permet d'économiser une unité ou plus en exploitation) si la durabilité individuelle de la gestion des routes veut être atteinte. Néanmoins, il convient évidemment de moduler cette règle générale, selon la criticité, ou rareté, des ressources consommées, si l'on se place en temps limité, ce qui est plus critiquable si l'on prend une position plus malthusienne, soit un univers où toute ressource est limitée.

2.3 Système climatique

La consommation de ressources abiotiques a pour conséquence une inhérente émission de GES résultant en une modification du climat. Ce sont les phénomènes géophysiques mis en jeu que nous tenterons de décrire dans cette section, et dont les chaînes de causes et conséquences sont représentées en Figure 27.

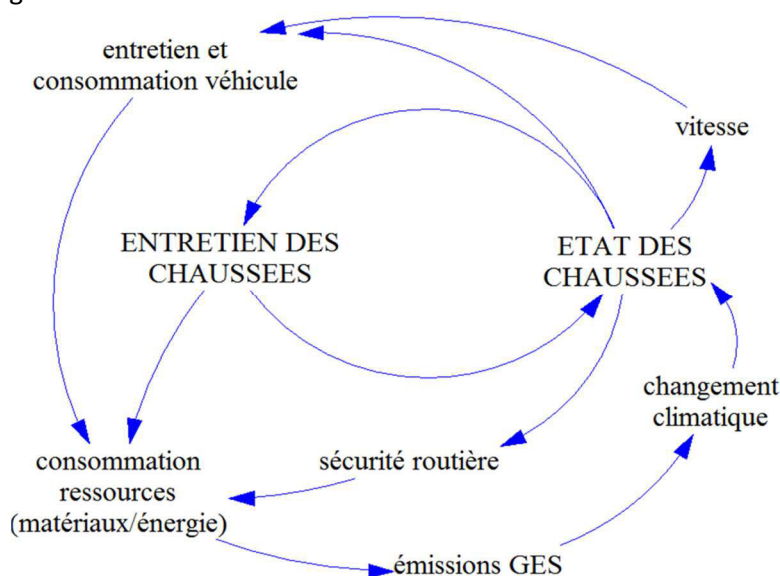


Figure 27 Principales boucles causales résultant en une modification du climat liée à l'entretien des routes

2.3.1 Effet de serre

L'effet de serre, processus naturel et nécessaire à la vie sur Terre, résulte de l'influence de l'atmosphère sur les différents flux thermiques contribuant aux températures au sol d'une planète. Sur notre planète, l'essentiel de l'énergie thermique reçue provient du rayonnement solaire. En l'absence d'atmosphère, la Terre rayonnerait idéalement comme un corps noir et aurait une température moyenne en surface de -18°C . L'atmosphère est composée de composants gazeux et non gazeux qui absorbent une partie des rayons infrarouges émis par la Terre et en réfléchissent d'autres, ce qui explique la température que nous lui connaissons.

La puissance de l'effet de serre varie de manière naturelle selon des mécanismes géophysiques globaux naturels de long terme. L'indicateur classique qui quantifie cette puissance est le forçage radiatif, défini comme la différence entre énergie radiative reçue et émise par un système climatique donné. À la suite de la révolution industrielle, une augmentation anormale du forçage radiatif de la Terre est apparue. Les contributions relatives des différentes causes du forçage radiatif entre 1750 et

¹¹¹Un des enjeux pourrait d'ailleurs être de définir ce terme, ou plutôt le seuil massique pour chaque matière qui ne doit pas être franchi afin de conserver un stock minimal nécessaire au bon fonctionnement sociétal, cette dernière notion étant elle-même dépendante des modes de vie, en mouvance perpétuelle

2005 sont représentées en Annexe 25, différenciées entre processus naturels et activités humaines. Les principaux gaz d'origine anthropique participant à l'effet de serre (augmentation et réduction) et leurs sources ont été identifiés par le GIEC (Stocker et al. 2013) et sont synthétisés dans le Tableau 11. Notons que la majeure partie des sources interviennent dans le cycle de vie des transports (identifiées en italique dans le tableau), que ce soit par le biais de l'exploitation, la construction et l'entretien, ou la fin de vie des infrastructures et véhicules.

Tableau 11 Principaux gaz d'origine anthropique participants à l'effet de serre et leurs sources (IPCC 2007)

GAZ DIRECT (*ET INDIRECTS)	SOURCES ANTHROPIQUES		EFFET SECONDAIRE
DIOXYDE DE CARBONE	CO ₂	<i>Transport (ressources fossiles)</i> Chauffage et climatisation des bâtiments <i>Industrie (ciment et autres produits)</i> Déforestation	
METHANE	CH ₄	Agriculture <i>Distribution de gaz naturel</i> Décharges	Production de vapeur d'eau (plus abondant des GES)
PROTOXYDE D'AZOTE	N ₂ O	<i>Consommation de ressources fossiles</i> Consommation d'engrais	
CHLOROFLUOROCARBURES¹¹²	CFC (-11, -12), ...	<i>Fluides frigorigènes (i.e. réfrigérant)</i>	Réduction de la couche d'ozone stratosphérique Formation d'ozone troposphérique
MONOXYDE DE CARBONE, OXYDES D'AZOTE¹¹³	CO, NO _x	<i>Transport</i>	Formation d'ozone troposphérique
AEROSOLS*		<i>Combustion de biomasse</i> <i>Combustion de ressources fossiles</i> <i>Exploitations minières de surface</i> <i>Certains procédés industriels (?)</i>	

Outre ces gaz, notons que la vapeur d'eau et l'hexafluorure de soufre issus de l'industrie ont également un effet de serre. En termes de contributeurs aux émissions anthropiques d'équivalents CO₂, en 2010 les CO₂ d'origine fossile était responsable de 65% du changement climatique, le CO₂FOLU¹¹⁴ à 11%, le CH₄ à 16%, le N₂O à 6% et les gaz fluorés (« F-gases » en anglais) à 2% environ, l'incertitude de cette dernière contribution étant très forte selon le GIEC (Edenhofer et al. 2014). Le 5^{ème} et dernier rapport du GIEC au moment de l'écriture de ce mémoire affirme que l'augmentation de la concentration des gaz à effet de serre pourrait entraîner des changements majeurs au niveau des températures, du niveau des mers, ou de la fonte des glaces. Sa conclusion est que les activités humaines, notamment l'usage des énergies fossiles, a conduit à une hausse exceptionnelle de la concentration des gaz à effet de serre, transformant le climat à un rythme jamais vu par le passé. Nous allons détailler ces changements.

2.3.2 Changement climatique : variations de stocks et d'états

Le système climatique est un système dynamique dont les variables d'état évoluent au cours du temps. En particulier, les scientifiques ont mis en évidence au XIX^{ème} siècle l'existence d'ères glaciaires

¹¹² Ces émissions sont en déclin suite à l'analyse de leur responsabilité dans la formation du trou dans la couche d'ozone au-dessus de l'Antarctique

¹¹³ Ces gaz ne sont pas appelés « GES » par l'IPCC (et à ce titre n'ont pas de PRG) mais sont des contributeurs indirects en tant que précurseurs de l'ozone troposphérique (responsabilité dans le trou de la couche d'ozone également)

¹¹⁴ CO₂ issu de la foresterie et de l'usage des sols

successives s'inscrivant dans des cycles glaciaires-interglaciaires liés aux cycles de Milanković¹¹⁵, lors desquels la température a pu varier sur une amplitude d'une dizaine de degrés lors des 450 derniers milliers d'années (J. R. Petit et al. 1999). Pour autant, les travaux du GIEC font état de plusieurs anomalies dans l'évolution des paramètres climatiques par rapport aux trajectoires naturelles attendues (Stocker et al. 2013).

En effet, les modèles climatiques ne prenant en compte que les influences naturelles telles que le volcanisme, la variabilité solaire, les paramètres de Milanković, etc. ne permettent d'expliquer les variations de température de la Terre que jusqu'en 1950. Depuis lors, les évolutions de température ne répondent plus des seules variations naturelles, et seuls les modèles qui tiennent compte des influences anthropiques réussissent à expliquer les variations des 65 dernières années : le dernier rapport du GIEC estime comme extrêmement probable (+ de 95% de chances) le lien entre activités humaines et accroissement des températures (Stocker et al. 2013).

À ce jour, les principales modifications géophysiques résultant d'un changement climatique d'origine anthropique sont une hausse des températures moyennes à la surface de la Terre – +0.85° entre 1880 et 2012, avec une hausse des températures des océans – 90% de l'énergie accumulée sur la planète entre 1971 et 2010 y serait contenue, soit +0.44° en 40 ans ; une diminution du stock de glace : la banquise en Arctique a diminué d'environ 10% entre 1979 et 2012 ; une augmentation moyenne du niveau de la mer de 19 cm en un peu plus d'un siècle (Stocker et al. 2013).

Le GIEC a réalisé des projections à court, moyen et très longs termes, selon plusieurs scénarii. D'après leurs travaux, d'ici à la fin du 21^{ème} siècle, l'augmentation du niveau des mers serait comprise entre 29 et 82 cm, les évènements climatiques extrêmes croitraient en intensité et fréquence, et seul le scénario le plus ambitieux (scénario RCP 2.6.) permettrait de maintenir une trajectoire d'augmentation de température inférieure à +2° à cet horizon (Stocker et al. 2013), sachant que les modifications de température ne seront pas uniformes entre régions.

2.3.3 Émissions de GES

L'augmentation des activités humaines, en particulier le recours à la mécanisation depuis l'ère industrielle, a eu pour conséquence une utilisation (consommation et transformation) toujours plus massive de ressources naturelles, et en particulier des combustibles fossiles – charbon, produits pétroliers, gaz naturel – qui présentent la caractéristique d'être très émissifs en gaz à effet de serre. Les temps de demi-vie de ces substances étant relativement longs, par exemple de l'ordre de 120 ans pour le CO₂ selon le GIEC, si le flux d'émission de la substance augmente, alors le stock de ces substances augmente dans l'atmosphère, ce qui génère un forçage radiatif par absorption et réflexion des rayons infra-rouges, donc une augmentation de l'effet de serre, et ainsi entre autres conséquences géophysiques déjà décrites, une augmentation moyenne des températures de l'océan et de la surface terrestre. Le bilan énergétique de la Terre devient donc positif, son stock d'énergie sous forme de chaleur augmente tandis que ses stocks sous forme de ressources fossiles diminuent.

2.4 Hydrologie et circulations aériennes

Nous décrivons ici les mécanismes des effets sur les circulations aériennes et l'hydrologie liés aux variations climatiques d'origine anthropique, qui présentent des rétroactions fortes entre elles via des

¹¹⁵La variation cyclique des paramètres de Milanković - excentricité, obliquité et précession de la Terre - est responsable de changements climatiques naturels dont le principal phénomène est les périodes glaciaires et interglaciaires dans le cadre de la théorie astronomique des paléoclimats

forces de frottements et de pression entre autres : il y a une recherche constante d'équilibres thermodynamiques plus ou moins locaux par processus de thermalisation.

2.4.1 Circulations aériennes

On appelle circulation atmosphérique le mouvement à l'échelle planétaire de la couche d'air entourant la Terre, redistribuant l'énergie thermique qui vient du Soleil, en conjonction avec la circulation océanique. Plusieurs forces s'exercent sur les particules d'air : force de Coriolis créant une déviation des masses d'air vers la droite dans l'hémisphère nord et vers la gauche dans l'hémisphère sud par rapport au référentiel terrestre, forces de pression et de friction, et force centrifuge. La circulation atmosphérique change continuellement, néanmoins, des prévisions statistiques mettent en évidence des tendances moyennes stables : cyclones tropicaux, circulation de l'air antihoraire autour d'une dépression et horaire autour d'un anticyclone. Il existe d'ailleurs trois zones de circulations de vents entre l'équateur et les pôles où l'on sait prédire les grandes tendances de circulations atmosphériques, et que nous allons décrire maintenant.

2.4.1.1 Cellule de Hadley

La Terre étant grossièrement sphérique, les rayons incidents provenant du soleil et touchant son sol présentent des angles variant énormément entre les plus faibles autour de l'équateur¹¹⁶ (selon les saisons) et les plus forts aux Pôles. La quantité d'énergie réémise dans l'atmosphère dépend bien sûr de l'albédo¹¹⁷, mais avant tout de la quantité reçue, qui est d'autant plus faible que l'angle des rayons incidents est important (donc aux pôles). Cela signifie donc qu'il existe, entre ces zones terrestres, un réchauffement atmosphérique différentiel très important. Des considérations thermodynamiques basiques permettent de comprendre que ce déséquilibre thermique va engendrer des déplacements de masses d'air, le système atmosphérique tendant naturellement vers un état d'équilibre : dans ce cas précis, cela a pour conséquence la création d'un type particulier de cellules de convection près de l'équateur, appelée cellule de Hadley. Sa zone d'influence court de l'équateur à 30 degrés nord et Sud : on y retrouve des vents réguliers soufflant du nord-est dans l'hémisphère nord et du sud-est dans celui du sud appelés les alizés.

2.4.1.2 Cellule de Ferrel et cellules polaires

Aux latitudes moyennes, des systèmes dépressionnaires transitoires sous une circulation d'altitude généralement d'ouest caractérisent la cellule de Ferrel. On y différencie le flux zonal, tendance de circulation de l'air d'ouest en est expliqué par le « ruban thermique », du flux méridional qui est caractérisé par un déplacement de l'air froid vers l'équateur et de l'air doux vers les Pôles. Enfin, des cellules polaires se retrouvent respectivement au nord et au sud des 60^{èmes} parallèles nord et sud avec une circulation de surface généralement d'est.

2.4.1.3 Impact de l'entretien

Les modifications des circulations atmosphériques dues au changement climatique, lui-même indirectement influencé en partie par l'entretien des routes, recensées par le GIEC à moyen terme sont (Stocker et al. 2013) : un probable déplacement de la branche descendante de la circulation de Hadley et des vents d'ouest des latitudes moyennes de l'hémisphère sud vers les pôles, une probable

¹¹⁶L'angle d'incidence y est proche de 0°, ce qui signifie que le rayon est quasi-perpendiculaire à la tangente à la surface terrestre, et le rayonnement intercepté est de 100%.

¹¹⁷Coefficient transcrivant le pouvoir réfléchissant ou réflectivité d'une surface.

modification de la largeur de la cellule de Hadley et des couloirs d'orages et de tornade¹¹⁸ dans l'hémisphère sud. Dans l'hémisphère nord, l'intervalle de confiance des projections est moyen.

2.4.2 Composition atmosphérique

Comme nous l'avons déjà dit précédemment (renvoi partie 1 – véhicules), les émissions d'échappement d'un véhicule sont liées à sa motorisation, ses équipements (e.g. filtres à particule) et sa consommation. La consommation d'un véhicule dépendant en partie de la surface de la route donc de son entretien, l'entretien routier a un certain impact sur les émissions relâchées par le transport routier dans l'atmosphère. Les éléments gazeux, liquides ou solides (e.g. particules de pneumatiques) vont se comporter différemment selon leur nature, et leur comportement va également être influencé par les variables d'état locales, liées au vent, à la température, etc. Des émissions sont également relâchées tout au long du processus aboutissant à l'entretien de l'infrastructure ainsi que pendant la construction, l'entretien et la fin de vie des véhicules routiers.

Le paramètre influençant le plus la qualité de l'air (donc sa composition jugée selon des critères de toxicité humaine) est probablement celui des émissions d'échappement. Toutefois, le changement climatique aura également des effets (plus faibles) sur cette composition, effet dont l'intervalle de confiance est moyen. Un réchauffement aura pour effet de diminuer le niveau de fond de l'ozone troposphérique¹¹⁹, mais une concentration élevée en méthane pourrait annuler cette diminution. Localement, de plus hautes températures de surface en région polluée impliquera une augmentation des pics d'ozone et de particules PM_{2.5} (prévision de « confiance moyenne » selon la classification de robustesse des résultats du GIEC) (Stocker et al. 2013).

2.4.3 Hydrologie

2.4.3.1 Généralités géophysiques

L'hydrologie relève des sciences de la terre s'intéressant au cycle de l'eau, c'est-à-dire aux échanges entre atmosphère, surface terrestre et sous-sol. Selon le GIEC, le cycle de l'eau consiste en tous les stocks d'eau sous toutes leurs formes, ainsi que leurs mouvements à travers le système climatique terrestre (Stocker et al. 2013). Le cycle de l'eau à l'échelle du globe se sépare en deux types de cycles : océanique et continental. Le bilan de ces deux cycles est équilibré par un échange annuel de quelques 40000 km³. Le bilan hydrique est théoriquement nul pour le système terrestre. Dans le bilan évaporation-précipitation, une très large partie (86%) de l'évaporation est due à l'océan, sa contribution étant légèrement plus faible (78%) pour les précipitations. Ce delta s'explique par l'influence des continents où il y a un excès de précipitations par rapport à l'évaporation : il en résulte un écoulement fluvial des continents vers les océans et mers. Dans les zones océaniques tropicales, l'évaporation prédomine, alors que les précipitations se concentrent davantage dans les zones océaniques et continentales équatoriales et au-dessus des chaînes de montagne des basses latitudes. Ainsi, selon Musy, « le cycle de l'eau est très influencé par le rapport des superficies continents-océans ou, à superficies égales, par la répartition des aires continentales en fonction de la latitude ou, à positions égales, par la distribution des altitudes » (Musy 2005).

2.4.3.2 Contribution de l'entretien routier au changement climatique

La consommation de ressources modifie le cycle de l'eau, de manière directe par le fait des modifications géologiques provoquées par l'extraction de granulats dans les carrières par exemple et

¹¹⁸« storm track » dans le texte

¹¹⁹« background surface O₃ » dans le texte

jouant sur le ruissellement ou l'écoulement ¹²⁰(topographie), l'infiltration (dépendant de la nature et de l'état du sol mis à nu : conductivité hydraulique, sorptivité¹²¹) et les zones de stockage et quantités stockées¹²² (Musy 2005), comme de manière indirecte en particulier du fait du *changement climatique* – modification de la disponibilité en eau, des débits des cours d'eau, de l'hygrométrie en général selon les saisons, des précipitations, de l'évapotranspiration (qui est liée au rayonnement, à l'hygrométrie et à la vitesse du vent), des crues et inondations, des étiages¹²³, de la qualité des eaux (via les modifications des inondations et des étiages) (Bauwens, Sohier, et Degré 2013) et de l'humidité en zone racinaire (Ducharne et al. 2003). Des modélisations ont été réalisées sur des bassins¹²⁴ français, celui de la Meuse (Bauwens, Sohier, et Degré 2013), de la Seine (Ducharne et al. 2003) ou de la Méditerranée par exemple, pour anticiper les effets hydrologiques probables du changement climatique. Au sein du bassin de la Seine, on attend une intensité des contrastes saisonniers. Dans les océans et les mers, la circulation thermohaline¹²⁵ pourrait être très perturbée : les courants froids et chauds pourraient beaucoup évoluer (par exemple les phénomènes de El Niño¹²⁶ et La Niña¹²⁷, liés à des perturbations de pressions atmosphériques), de même que la salinité de l'eau. El Niño pourrait par ailleurs contribuer à des anomalies hygrométriques.

À long terme, les précipitations vont globalement s'intensifier avec l'augmentation des températures (virtuellement certain), néanmoins si les précipitations augmenteront sur certaines régions du monde, elles diminueront sur d'autres, à la hausse dans les régions humides et à la baisse dans les régions sèches: cela accentuera encore les saisons sèches et les saisons humides, d'autant plus que les températures augmenteront. L'évaporation augmentera aussi, selon le même modèle que les précipitations (Stocker et al. 2013).

Le GIEC rappelle que les modifications du cycle de l'eau sont inextricablement connectées au cycle énergétique et aux circulations atmosphériques (Stocker et al. 2013). De ce fait, l'ampleur de ces modifications dépend nécessairement d'autres variables géophysiques.

2.4.4 Évènements climatiques extrêmes

On compte dans les évènements climatiques extrêmes les vagues de chaleur, pluies torrentielles, inondations, sécheresses extrêmes, tempêtes, cyclones tropicaux, tsunامي, etc. Ils sont souvent la résultante de modifications combinées de variables géophysiques.

Le dernier rapport du GIEC (Stocker et al. 2013) a souligné qu'à moyen terme, ces évènements devraient *probablement* augmenter en fréquence et en intensité particulièrement pour les évènements pluvieux extrêmes, avec des périodes de canicules et des zones d'inondation et de

¹²⁰ Transfert de l'eau à travers les couches superficielles du sol

¹²¹ Capacité d'un sol à absorber l'eau lorsque l'écoulement se produit uniquement sous l'action du gradient de pression

¹²² Notons ici que les eaux douces accessibles ne représentent que 0.0076% du stock d'eau terrestre, et les eaux du sol et souterraines 1.69% (Musy 2005))

¹²³ En hydrologie, l'étiage est la période de l'année où le niveau d'un cours d'eau atteint statistiquement son point le plus bas.

¹²⁴ Un bassin versant est l'unité géographique sur laquelle se base l'analyse du cycle hydrologique et de ses effets.

¹²⁵ Circulation permanente à grande échelle des courants marins, engendrée par des écarts de température et de salinité des masses d'eau

¹²⁶ Phénomène climatique se caractérisant par des températures anormalement élevées de l'eau dans la partie Est de l'océan Pacifique Sud, qui permet une pêche abondante

¹²⁷ Phénomène climatique qui provient d'une anomalie thermique des premières dizaines de mètres des eaux équatoriales de surface de l'océan Pacifique centre, où la température est anormalement basse

sécheresse qui devraient s'étaler (Stocker et al. 2013). L'intervalle de confiance est cependant faible en ce qui concerne les cyclones tropicaux, du fait d'une population statistique faible (Stocker et al. 2013).

2.5 Températures

Le GIEC montre déjà des anomalies de températures sur la surface du globe (voir le planisphère en Annexe 26). À moyen et long termes, les températures moyennes à la surface du globe vont continuer d'augmenter, avec une recrudescence des vagues de chaud et de froid, et une augmentation des températures différentielles selon les régions du monde. De plus, les rythmes peuvent être variables selon l'albédo local. L'océan se réchauffe globalement dans tous les scénarii du GIEC. Les circulations en Atlantique méridionale s'affaibliront très probablement au cours du 21ème siècle. Les « National centers for environmental information » (NOAA) étudient de près les manifestations du changement climatique, et un site spécialisé communique des cartes de suivi de l'état du climat (ncdc.noaa.gov). Une carte reproduite en Annexe 26 présente les anomalies de températures positives et négatives en janvier 2016 comparées à la période 1981-2010, et montre bien les différences spatiales du phénomène de modifications de températures.

2.6 Orographie

L'existence même d'infrastructures routières modifie fortement le relief. Pour autant, le simple entretien routier ne le modifie pas puisqu'une fois choisie, la ligne de route n'est que marginalement modifiée par ajout éventuel de couches d'enrobé plus épaisses que le matériau raboté en resurfaçage. En revanche, l'entretien consomme de l'énergie et des matériaux routiers qui sont extraits du sol ou de l'eau, via des structures dédiées (carrières, plateformes pétrolières, etc.) qui modifient paysage et relief (bâtiments ou extraction de ressources en volume apparent). La modification peut également venir d'autres aménagements spécifiques, ou du déboisement éventuellement nécessaire. Les structures nécessaires à la production de matériaux routiers sont également toutes les usines entrant dans le processus de préparation des matériaux : centrales d'enrobage, centrales à béton, stations de concassage de granulats, etc. À leur tour, ces modifications de relief peuvent modifier les ambiances sonores (bruit d'extraction et obstacles à la propagation des émissions sonores) et visuelles (modification du relief donc de la perception du paysage), les circulations aériennes et donc la composition atmosphérique locale.

2.7 Environnement sonore

2.7.1 Base de données de l'ex-LRPC de Strasbourg

Des tests de mesures acoustiques ont été effectués selon la procédure de mesure du « véhicule isolé » VI par l'ex-LRPC Strasbourg pour les VL et PL (trains routiers TR). Les mesures sur VL ont été effectuées sur 255 planches à une vitesse de 90 km/h, celles sur TR sur 149 planches à une vitesse de 80 km/h. Les tests aboutissent globalement au même ordre de classement des revêtements pour les 2 types de véhicules. Les revêtements les plus performants sont ceux à faible granularité ($D = 0/6$) ou ceux dont la porosité absorbe l'énergie sonore tels les enrobés drainants (Doisy 2007). Les moins performants sont les enduits. On note une différence de plus de 10 dB(A) entre ces deux extrêmes pour les VL (voir Annexe 45), et de 7 dB(A) pour les PL (Annexe 46), ce qui signifie physiquement que les revêtements les plus bruyants génèrent une énergie sonore de 5 à 9 fois plus importante que les plus silencieux (formule en $10\log(E)$). Au-dessus de 50 km/h, c'est le bruit de contact pneu-chaussée qui est prépondérant pour une automobile, et ce bruit dépend de la vitesse : entre 90 et 130 km/h le bruit de contact chaussée-pneu augmente de plus de 5 dB(A) pour un VL ((Lelong et Michelet 2001), voir Annexe 44).

2.7.2 Évolution des propriétés acoustiques des couches de roulement (Béregier et al. 2001)

Les chaussées sont soumises à l'agression et à l'usure du trafic, et leurs performances évoluent (souvent en diminuant) au cours du temps : l'adhérence diminue, l'uni se dégrade, la fatigue apparaît. Les performances acoustiques varient dans le temps également.

Dans le cas des revêtements poreux, le gain acoustique dû à l'absorption s'atténue avec le temps, notamment à cause des pollutions environnementales (poussières, végétaux, etc.) qui combles les pores : il y a colmatage (Voir l'évolution des coefficients d'absorption selon les fréquences, en fonction du niveau de colmatage en Annexe 27 (Hamet 2003)). La chute des performances acoustiques¹²⁸ est rapide, de l'ordre de +1 dB(A) par an en début de vie, et en particulier dans les aigus selon Gautier (2006). Une autre étude sur un échantillon de 6 revêtements drainants (0/8) a montré une augmentation de 2 à 3 dB(A) en 1 à 6 ans des niveaux sonores sur autoroutes allemandes, à partir de niveaux de bruit beaucoup plus importants que ceux constatés en France : de 76.5 à 82.5 dB(A) (Doisy 2007). Le décolmatage est naturel sur les infrastructures à vitesse et trafics élevés telles les liaisons autoroutières, ou peut être réalisé de façon mécanique (aspiration ou injection d'eau sous pression) sur les autres chaussées. Ces procédés sont cependant relativement peu efficaces et coûteux (Gautier 2006).

Pour les revêtements en BBTM, une étude initiée à l'époque par l'ex-LRPC de Strasbourg fin 2006 a montré sur un échantillon restreint de planches BBTM (0/6) que le bruit généré augmentait de 3 dB(A) entre 1 et 7 ans d'âge (Doisy 2007).

Dans le cas des revêtements fermés, la mise à plat et le polissage des granulats de surface limitent la production d'énergie sonore. Les caractéristiques acoustiques semblent relativement stables temporellement, notamment pour les revêtements fermés à faible granularité. Néanmoins il y a une certaine variabilité selon les planches de BB (Doisy 2007). La dispersion des niveaux sonores des différents revêtements tend à se réduire avec le vieillissement : la gamme des valeurs mesurées est plus restreinte à 2 ans qu'à 6 mois.

2.8 Synthèse

Le schéma de la Figure 28 synthétise et illustre les liens entre les différents éléments que l'on a détaillés précédemment, relatifs à l'impact qualitatif de l'entretien sur les mécanismes de changements climatiques.

¹²⁸ Le colmatage peut aussi, en milieu urbain, provoquer des gênes olfactives, comme cela se serait produit dans le 20^{ème} arrondissement de Paris à cause d'un enrobé drainant

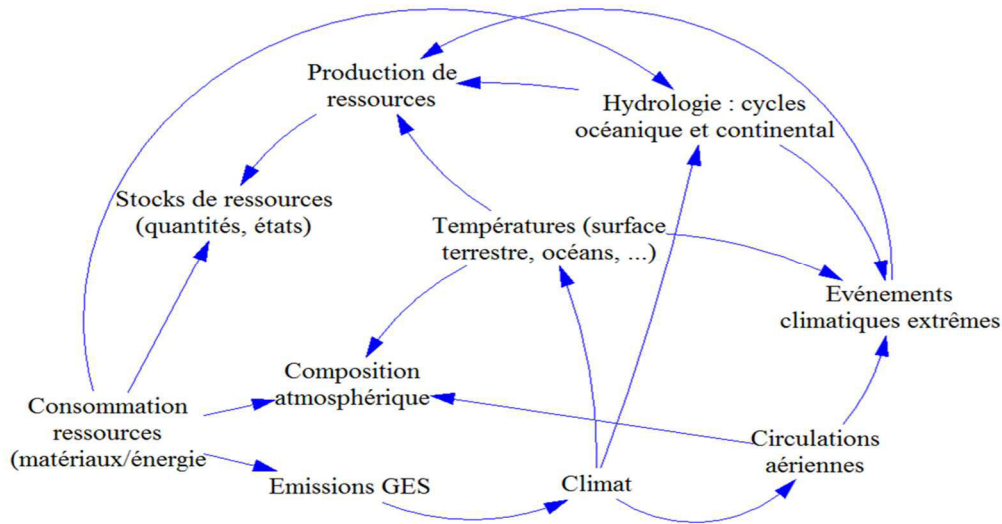


Figure 28 Chaîne d'impacts qualitatifs de l'entretien routier sur le système géophysique

3 Système écologique

Au sens scientifique du terme, l'écologie désigne l'étude des relations entre les organismes vivants – (humains,) animaux, végétaux, fonge formant la biocénose – et le milieu organique ou inorganique dans lequel ils vivent appelé le biotope. Une biocénose sur un biotope forme un écosystème L'adjectif « écologique » se différencie ainsi de l'adjectif « environnemental », ce dernier faisant référence à l'ensemble des éléments entourant un individu humain ou animal, et de manière élargie à leur état.

3.1 Ancrage théorique : l'écologie routière (Fourès et Pech 2015)

La strate « système écologique » s'intéresse à l'environnement en tant que support de vie d'espèces¹²⁹ – que l'on peut considérer du point de vue anthropocentrique comme un ensemble de ressources biotiques. Nous souhaitons aborder ici les leviers d'action que l'entretien routier peut représenter sur la dimension physico-chimique du vivant, de manière spatialisée.

La discipline de l'écologie routière, développée Outre-Atlantique (Forman et Alexander 1998), vise à anticiper les impacts relatifs à un projet routier sur la sphère écologique dans le but de les éviter, minimiser, ou compenser. Cette discipline s'intéresse globalement à la modélisation des impacts engendrés sur la biodiversité à toutes les étapes de vie d'une infrastructure routière, sur la base de retours d'expérience. Toutefois, elle s'intéresse davantage aux impacts d'une construction neuve ou à l'exploitation hors entretien : conséquences de la création d'une route et importance particulière des coupures écologiques résultant en une fragmentation délétère des habitats, collisions de la faune avec les véhicules, impacts des émissions locales. Ces coupures ne sont liées qu'indirectement à l'entretien, du fait des infrastructures elles-mêmes nécessaires à l'utilisation des ressources pour l'entretien, qui sont extraites, transportées et transformées dans des bâtiments et par des infrastructures de transport. La fragmentation des habitats est également générée par la phase d'exploitation globalement entre 1 et 150 ans après la mise en service, le plus souvent entre 10 et 50 ans. De nombreuses synthèses abordent les impacts des infrastructures de transport sur les milieux naturels et la biodiversité en

¹²⁹Une espèce, selon Mayr (1942) est une population ou un ensemble de population dont les individus peuvent effectivement ou potentiellement se reproduire entre eux et engendrer une descendance viable et féconde, dans des conditions naturelles

Europe, en Amérique du Nord, en Inde et en Chine (Forman et Alexander 1998; Trombulak et Frissell 2000; Seiler 2001; Coffin 2007). L'étude de Tardieu et al. (2013) aborde les impacts induits (pollution de l'atmosphère, réchauffement climatique...) sur la biodiversité. D'autres études s'intéressent encore à l'impact sur la fragmentation des habitats naturels (i.e. chaînes d'impacts (Lundberg et Moberg 2003; Fletcher et al. 2007)), à la définition des relations intra-parcelles (prédation, etc.) et inter-parcelles (déplacements) (Laita, Kotiaho, et Mönkkönen 2011) ou aux impacts cumulés dus à la propagation et au recouvrement par vagues successives de polluants autour des routes. Ces études s'intéressent également à la spatialisation des impacts, la plupart des impacts s'étendent rarement au-delà de 1000m¹³⁰, mis à part au niveau des cours d'eau où la portée des impacts peut croître largement.

Commençons par parcourir l'ensemble des impacts écologiques liés au système de transport routier par milieu, avant de spécifier les impacts écologiques de l'entretien routier par échelle, et d'expliquer les enjeux autour de la biodiversité.

3.2 Processus environnementaux affectés par le transport routier par milieu naturel

Le Réseau scientifique et Technique français a commencé à étudier les impacts de la route sur son environnement proche – l'air, les eaux, les sols et les végétaux – dans les années 1980 selon deux approches : la recherche scientifique et la gestion opérationnelle. Branchu et al. (2013) proposent une liste des principales productions scientifiques et opérationnelles sur le sujet. De la même manière, on considérera les impacts écologiques spécifiquement liés à l'entretien routier selon le milieu récepteur, ou milieu qu'ils touchent, sachant qu'un même effet peut affecter un seul comme tous les récepteurs. Notons que quatre types de pollution d'origine routière peuvent être différenciés : la pollution chronique (i.e. provenant du fonctionnement courant de la route), la pollution saisonnière (i.e. particulièrement aux fondants routiers en hivers et aux produits phytosanitaires au printemps), la pollution accidentelle, et la pollution en phase chantier.

Ces effets perturbent les organismes vivants qui peuvent se retrouver dans un environnement hostile à leur développement. De plus, si certaines espèces sont plus sensibles que d'autres, cela peut entraîner des déséquilibres (exemple : si une population de prédateurs décroît car elle est affectée par des changements de milieu, la population de ses proies va avoir tendance à augmenter) : il y a en effet risque de disparition d'espèces vulnérables et prolifération des plus résilientes (Rodrigue, Comtois, et Slack 2013).

Nous listons ci-dessous les processus mis en jeu dans la modification environnementale des milieux (Rodrigue, Comtois, et Slack 2013).

3.2.1 Atmosphère

On a déjà dit que l'entretien modifiait la composition de l'atmosphère. Les processus en jeu dans l'air sont la diffusion à large échelle de polluants locaux, la croissance forte et rapide de la concentration de polluants du fait de conditions locales (exemple du smog), les réactions photochimiques dues aux rayons ultra-violet, par exemple sur l'ozone et le dioxyde de soufre ou d'ozone, les pluies acides, et les effets cumulatifs et de synergie des polluants.

¹³⁰ Au-delà de 200m d'éloignement à une route en milieu urbain, on peut par exemple considérer que l'on est en pollution atmosphérique de fond selon C. Seigneur, chercheur en pollution atmosphérique au CEREA, laboratoire de l'ENPC

Le changement climatique a pour sa part une responsabilité dans plusieurs des processus listés ci-dessus, mais aussi des effets plus larges comme on l'a vu précédemment (modification des températures, des circulations aériennes, etc.), effets qui engendrent de nouveau des modifications des processus de la liste.

3.2.2 Hydrosphère

L'hydrosphère se compose de tous les hydrosystèmes de la planète, soit tous les milieux aquatiques en interaction les uns aux autres : eau courante, eau stagnante, systèmes semi-aquatiques, terrestres, superficiels comme souterrains et de leurs interactions. Le fonctionnement hydraulique et biologique de l'hydrosystème peut être perturbé par les actions de l'homme. Dans les milieux aquatiques et le cycle de l'eau, les effets environnementaux liés à l'entretien routier concernent la diffusion de polluants à l'état colloïdal ou dissous, l'acidification et la perte du potentiel d'équilibre de pH des eaux surfaciques et souterraines, l'augmentation de la solubilité de divers métaux du fait de l'acidification, la contamination des eaux surfaciques et souterraines par les nitrates, et la modification des systèmes hydriques.

3.2.3 Lithosphère

Dans la lithosphère, couche externe de la croûte terrestre constituée de plaques mobiles, les phénomènes suivants se produisent : dépôts acides, libération d'ions métalliques toxiques du fait de l'acidification, pertes de nutriments, notamment en calcium et magnésium, inhibition de la minéralisation de l'azote, modification des processus de décomposition organique : changements de profondeur des processus, inhibition, pertes d'espèces faunistiques et floristiques terrestres, contamination de plantes par l'absorption de métaux lourds, consommation d'espaces naturels, et extraction de matériaux provoquant la raréfaction des ressources, énergétiques ou non.

3.2.4 Enjeux principaux dans les écosphères

Un écosphère est un écosystème dans lequel plusieurs niveaux interagissent les uns avec les autres : la matière, l'énergie et les êtres vivants. Les principaux impacts écologiques liés à l'entretien routier sont le changement climatique, l'altération de la qualité de l'air, de l'eau et du sol, et les pressions engendrées par ces impacts sur la biodiversité.

Dans le milieu aquatique, les risques sont l'altération plus ou moins imprévisible des écosystèmes, la disparition d'espèces vulnérables et la prolifération des plus résilientes, la réduction de la décomposition bactériale des matières organiques par nitrification, la diminution des nutriments disponibles pour les espèces aquatiques ainsi que des troubles de la reproduction. La pollution des sols par le transport routier, dépendant de l'entretien de ses infrastructures, génèrent des dommages à la végétation, qui à leur tour modifient le cycle de l'eau, et les ressources d'eau souterraine, l'érosion des sols, la capacité de purification de l'air par l'écosphère, les rendements agricoles. Il y a donc des effets en boucle de rétroaction qui peuvent amplifier la dégradation des milieux.

3.3 Approche multi-échelle des impacts de l'entretien routier

Ces listes d'enjeux permettent de différencier les principaux impacts du transport routier sur les milieux naturels. Nous souhaitons maintenant spécifier plus précisément les impacts qui pourraient être modulés par l'entretien routier, à différentes échelles.

3.3.1 Différentes échelles en interaction

Les espèces touchées par l'entretien routier, qu'elles soient végétales ou animales, sont fortement ancrées dans l'espace puisqu'elles sont intégrées dans un ensemble d'écosystèmes tributaires des

conditions géophysiques (climatiques entre autres). En effet, en écologie, un *biotope* est un type de lieu de vie défini par des caractéristiques physiques et chimiques – décrites précédemment dans le système géophysique, relativement uniformes. Le biotope est le milieu récepteur de la *biocénose*. La combinaison d'un biotope et d'une biocénose constitue un écosystème, soit un ensemble d'organismes vivant dans un milieu récepteur, en interaction les uns avec les autres. À une échelle macroscopique, un biome, également appelé macro-écosystème, aire biotique, écozone ou écorégion, est un ensemble d'écosystèmes caractéristiques d'une aire biogéographique donnée.

Les différentes échelles auxquelles se mettent en place les écosystèmes sont interconnectées et dépendantes de nombreuses conditions locales et de « chaînes » de conditions, dont certains paramètres d'état dépendent des modifications géophysiques affectées par l'entretien routier.

Nous nous attacherons maintenant à expliquer les phénomènes liés à l'entretien des routes qui modifient le système biologique et écologique, représentés sommairement sur la Figure 29.

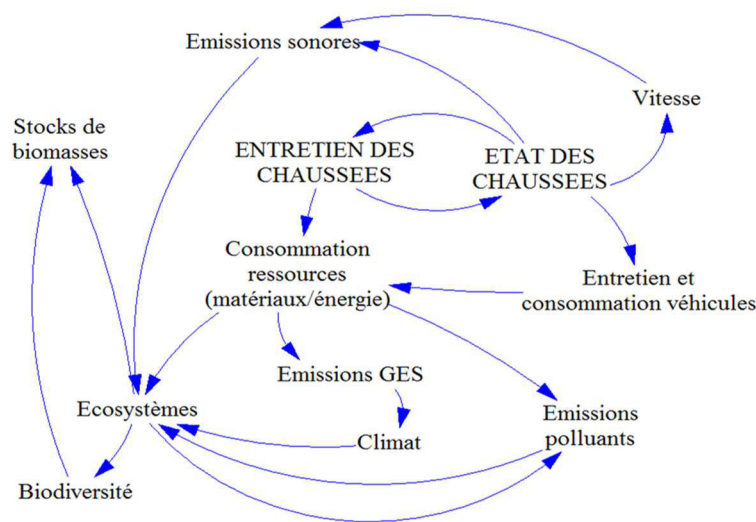


Figure 29 Principales boucles causales d'impacts écologiques liés à l'entretien des routes

3.3.2 Effets aux niveaux micro-local à local

L'entretien routier influe sur les écosystèmes micro-locaux et locaux¹³¹ des infrastructures à cause de deux phénomènes principaux. Nous ne traiterons que du cas du resurfaçage, bien que la viabilité hivernale et l'entretien des dépendances vertes soient également très importants.

D'abord, les produits et dépôts routiers lessivés par les précipitations se retrouvent dans les eaux de ruissellement. Ces produits sont issus des opérations d'entretien constructif, de la signalisation horizontale, (peintures, résines) des véhicules empruntant la route, et des opérations de viabilité hivernale. D'un côté, les opérations d'entretien constructif peuvent libérer des composants provenant des liants hydrocarbonés utilisés dans les nouvelles couches de surface, des liants hydrauliques ou coproduits tels que les mâchefers d'incinération d'ordures ménagères et les laitiers¹³² dans le cas de d'entretien lourd, ainsi que des solvants d'émulsions pour les ECF (traités sur place),... De l'autre, les véhicules empruntant la route vont émettre des particules abrasées en plus ou moins grande quantité selon la rugosité de surface routière et la qualité des pièces abrasées, à savoir principalement les freins et les pneumatiques. Ils vont également émettre des gaz d'échappement issus des moteurs à

¹³¹ En ordre de grandeur, on considérera cette échelle à quelques dizaines à centaines de mètres autour de l'infrastructure, voire quelques kilomètres dans certains cas (pollution des eaux, diffusion atmosphérique)

¹³²Coproduit issu de la sidérurgie (fabrication de l'acier/fonte en hauts fourneaux)

combustion et qui se déposent à la surface de la route et de ses environs. Un bon entretien pouvant réduire l'usure et la consommation des véhicules, ses effets négatifs à la construction sont à contrebalancer avec la pollution qui peut être évitée localement côté trafic si la route est en bon état : moins d'usure de véhicules donc moins d'émissions abrasives, moins de consommation de carburant donc proportionnellement moins d'émissions de substances nocives.

Tous ces produits vont polluer le milieu micro-local, et peuvent également, au niveau local, se retrouver dans les eaux superficielles et souterraines si les systèmes de gestion des eaux ne sont pas efficaces. L'augmentation de la concentration des métaux lourds entraîne leur accumulation dans la chaîne alimentaire, chaque espèce ayant sa propre sensibilité à chaque substance. Le mercure présente par exemple une toxicité aiguë (i.e. à court terme) pour les invertébrés et les poissons (Sétra 2011). Les effets de la toxicité chronique (i.e. à long terme) doivent également être pris en compte.

On pourra ensuite signaler l'impact du bruit sur la faune. Comme vu en 2.7, le bruit de contact pneu-chaussée dépend de l'uni, la mégatexture et la macrotexture, soit du type de matériau utilisé en couche de roulement, de sa mise en œuvre, mais également de l'état de surface de la couche. Or, de nombreux animaux comme les arthropodes et les vertébrés utilisent les sons pour communiquer entre eux : il s'agit de la majorité des orthoptères, de certains hyménoptères, diptères, et hémiptères, notamment les cigales, coléoptères et papillons, de même que certains diplopodes et arachnides, des mammifères, oiseaux et amphibiens. Selon les espèces, les gammes de fréquence de perception et seuils d'audition varient : 20 Hz à 50 kHz (voire 150 kHz pour les chiroptères) pour un seuil voisin de 0 dB chez les mammifères.

3.3.3 Effets au niveau local étendu

Nous entendons par niveau local étendu les impacts écologiques qui ont lieu lors du cycle de vie des objets du transport routier en dehors des abords de la route : les impacts écologiques ayant lieu autour des sites d'extractions de matériaux et d'énergie nécessaires à la chaîne de production du système routier, de leur transport (pas que routier), de leurs transformations... ce sont typiquement ces impacts que l'on peut quantifier grâce à l'ACV, mélangés aux impacts micro-locaux et locaux, ainsi qu'aux impacts globaux.

3.3.4 Effets au niveau global

Au niveau global, l'entretien routier va principalement moduler la contribution du système routier complet au changement climatique. Les effets du changement climatique ayant un impact sur les écosystèmes sont l'augmentation de température, l'augmentation de CO₂ dans l'atmosphère, le déséquilibre hydrique (sécheresses et inondations renforcées dans les zones concernées), l'acidification marine, l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des événements extrêmes, et la montée du niveau de la mer.

3.3.4.1 Augmentation de température

Une augmentation de température implique un raccourcissement du cycle des plantes. En effet, contrairement à l'être humain, une plante n'est pas capable de réguler sa température interne. Or, plus sa température interne est importante, plus elle croît rapidement : une plante annuelle va donc atteindre sa maturité d'autant plus vite qu'il fait plus chaud. Or, pour les récoltes, le résultat est un rendement moindre : un blé dont le cycle est plus rapide produit moins¹³³. En France, les vendanges ont lieu 15 jours plus tôt qu'il y a 40 ans¹³⁴. La vigne ayant une durée de vie de 50 ans, on peut

¹³³ <https://phys.org/news/2018-01-climate-growth.html>

¹³⁴ <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/impacts-du-changement-climatique-agriculture-et-foret>

difficilement adapter le cépage à un climat changeant sur le long terme. Dans le cas d'une plante annuelle comme le maïs en revanche, on peut faire une sélection génétique afin de conserver les dates de récoltes.

L'augmentation de température peut également impliquer un cycle de développement faunique plus rapide : dans le cas d'espèces pathogènes, cela peut amplifier les désastres qu'elles causent (Bell et al. 2015). Par exemple, au lieu d'avoir deux cycles de développement et donc d'attaque de pucerons par an, on va en avoir trois. Il faudra donc répondre aux attaques en multipliant les traitements chimiques, au risque d'obtenir une production diminuée.

Enfin, certains experts pensent que cette modification de températures augmente le risque de diffuser certaines maladies du sud vers le nord (Elad et Pertot 2014) : paludisme, maladies affectant le maïs, champignons. Il faudra soit adapter les espèces cultivées aux maladies, soit les déplacer géographiquement.

3.3.4.2 Déséquilibre hydrique

En France, le pourtour méditerranéen va être particulièrement touché par la sécheresse : il est prévu qu'il atteigne le climat actuel de Tunis en 2050¹³⁵. À l'inverse, les Hauts de France comme la Normandie devraient connaître une pluviométrie plus importante. Selon les zones, le stress hydrique éprouvé par la végétation sera donc plus fort ou moins important qu'actuellement. Certaines espèces s'adapteront tandis que d'autres, comme cela pourrait être le cas du hêtre, seront vouées à disparaître. Il est d'autant plus difficile encore une fois pour les espèces de s'adapter ou pour l'homme d'adapter les espèces cultivées que le cycle de croissance est long (exemple précédent de la vigne). En foresterie, les cycles sylvicoles sont d'environ 50 ans pour les pins¹³⁶ jusqu'à la centaine d'années selon la gestion et les essences¹³⁷, tandis que les cycles dits « sylvigénétiques » des forêts naturelles sont de l'ordre de 300 à 500 ans¹³⁸ : il est donc difficile d'adapter les espèces. En agronomie, on peut adapter les espèces chaque année.

3.3.4.3 Acidification marine

Le changement climatique a également un impact sur le pH de l'eau de mer particulièrement. Or, cela a un effet sur les organismes foraminifères. Comme le plancton constitue la seule nourriture de certaines espèces de poissons, les populations déclineront. À leur tour, les espèces se nourrissant de ces derniers mourront de faim et disparaîtront, en suivant la chaîne alimentaire. Les chercheurs s'accordent à dire que d'ici 50 ans, l'acidification des océans aura inévitablement altéré la croissance, la reproduction et la survie de certains organismes de la faune et de la flore aquatiques. De plus, d'ici 20 à 50 ans, l'acidification pourrait rendre les eaux des régions froides corrosives pour le calcaire aragonite, substance nécessaire à de multiples organismes pour fabriquer leurs squelettes externes (Stocker et al. 2013). L'aragonite est par exemple nécessaire à la constitution des coquilles des ptéropodes, qui sont des escargots planctoniques à la base de l'alimentation du zooplancton, de la baleine, et d'espèces de poissons alimentaires comme le saumon.

3.3.4.4 Montée du niveau de la mer (Paskoff 1998)

D'un point de vue écologique, l'élévation du niveau des océans conduirait à l'augmentation de la salinité des sols des zones côtières. D'abord, l'infiltration de l'eau de mer dans les nappes phréatiques

¹³⁵ <http://www.meteofrance.fr/climat-passe-et-futur/le-climat-futur-en-france>

¹³⁶ <http://www.mediaforest.net/p85-exploitation-et-gestion-durable.html>

¹³⁷ <http://www.prosilva.fr/html/presentation/sylviculture.htm>

¹³⁸ <http://foretdordogne.fr/la-foret-perigourdine/ecologie-forestiere/dynamique-forestiere/>

des zones côtières pourraient ensuite rendre ces eaux impropres à la consommation et à l'irrigation, du fait de l'impact du sel sur les végétaux. Ensuite, la submersion perpétuelle de zones basses comme les plaines deltaïques, les bords de lagunes, les marais maritimes et les récifs coralliens chamboulerait évidemment les écosystèmes locaux (certains phénomènes identiques aux zones contaminées aux fondants routiers utilisés en viabilité hivernale des routes). Enfin, cela provoquerait également une érosion des falaises et des plages, accroissant la turbidité des eaux alentours néfastes aux coraux, milieux importants pour la reproduction de nombreuses espèces.

3.3.4.5 Événements extrêmes

Les événements extrêmes auront des impacts sur les écosystèmes en termes d'habitat. On peut donner l'exemple de l'augmentation des incendies qui a déjà commencé en plusieurs coins du globe¹³⁹, et qui réduiront les surfaces forestières et les écosystèmes qui y sont rattachés.

3.3.4.6 Augmentation de la concentration en CO₂ atmosphérique

Le dioxyde de carbone est le carburant de la photosynthèse. Selon des études qui s'étendent sur le siècle dernier, l'enrichissement actuel de l'atmosphère en CO₂ qui génère le changement climatique aurait par ailleurs un effet boostant sur la production de biomasse, toutes choses égales par ailleurs (Araus et Slafer 2011). Les études sont très nombreuses, et portent souvent sur l'étude d'une seule espèce. À titre d'exemple, les rendements de blé peuvent s'accroître de 31% avec une concentration de 700ppm de CO₂ comparée à une situation à 350 ppm (Lopes et Foyer 2011). Aussi, certaines recherches s'intéressent à la façon de maximiser les bénéfices dus à l'enrichissement de l'atmosphère en CO₂, comme Yang et Peng dans le cas de la riziculture. Les effets du stress hydrique seraient également atténués par une augmentation du CO₂ dans l'atmosphère.

Néanmoins, cette augmentation de CO₂ atmosphérique provoquerait également des changements dans la composition des cultures, du fait de l'impact sur le métabolisme de l'azote et des interactions azote-carbone : la part de protéines des cultures, en particulier de céréales, pourrait décroître (analyse de 228 expérimentations indépendantes montrant ce résultat sur l'orge, le blé, le riz, le soja et les pommes de terre (Taub, Miller, et Allen 2008), ainsi que la consommation d'azote contenue dans les sols. Ces effets seraient complexes et encore mal compris (Lopes et Foyer 2011). Toujours sur l'exemple du blé, l'élévation en CO₂ atmosphérique provoquerait une diminution nette de la concentration en éléments essentiels mis à part le phosphore et le fer dans les feuilles, tandis que les grains verraient leurs taux d'azote, de calcium, de sulfure et de fer décroître (Fangmeier, De Temmerman, et al. 1999). Le 5^{ème} rapport du GIEC se penche d'ailleurs sur la compréhension du cycle de l'azote sous augmentation de concentration de CO₂ atmosphérique.

Les effets de l'enrichissement en CO₂ de l'atmosphère sur les cultures sont complexes, et le sujet d'études contemporaines. Selon Lopes et Foyer (2011), le consensus actuel serait que l'approvisionnement mondial en nourriture devrait être faiblement affecté par ce phénomène.

3.4 Biodiversité et gestion patrimoniale des espèces

La biodiversité, comme sa composition étymologique le suggère, est la diversité des espèces vivantes. On peut l'observer à divers niveaux d'organisation (et diverses échelles) : la diversité génique, la diversité des espèces fongiques, animales et végétales, et la diversité des écosystèmes.

¹³⁹ <http://www.leparisien.fr/societe/temperatures-exceptionnelles-incendies-secheresse-l-ete-de-tous-les-dangers-02-09-2018-7873305.php>

3.4.1 Biodiversité

3.4.1.1 Composantes

La biodiversité est l'ensemble d'entités biologiques très différentes, qui se compose de :

- Une certaine richesse : on dénombre les entités biologiques
- Une relative abondance
- Une composition
- Une gamme de caractéristiques fonctionnelles
- Une distribution spatiale
- Une diversité verticale (du fait de la chaîne alimentaire qui structure les relations entre entités biologiques)

3.4.1.2 Nombre d'espèces

Aujourd'hui, on dispose d'évaluations aussi approximatives que variées du nombre d'espèces terrestres, et de nombreuses espèces sont toujours découvertes, notamment en Amérique du sud, dans la forêt amazonienne. En 1988, Wilson et Keddy estimait à 1.4 millions le nombre d'espèces vivantes connues (Wilson et Keddy 1988). 600 000 espèces terrestres tropicales sont connues, et certains auteurs estiment qu'il pourrait en exister 3 millions. Enfin, certains écologues avancent la fourchette de 5 à 10 millions d'espèces vivantes, quand d'autres l'évalue autour de 30 millions. Aujourd'hui, les espèces décrites s'élèveraient à 750 000 insectes, 250 000 végétaux, et 30 000 oiseaux entre autres.

3.4.2 Évolutions écologiques

Ces dernières années ont été le siège d'évolutions très importantes des milieux écologiques, sous l'action humaine. L'accroissement rapide et intense de la demande en ressources naturelles a résulté en une perte substantielle et en large partie irréversible de la diversité du vivant sur la Terre, avec un risque fort à terme de changements non linéaires dans les fonctionnements écosystémiques. S'il est impossible d'avoir une vision globale précise de la biodiversité terrestre, une approche consiste à pointer quelques catégories d'espèces. C'est le cas de l'IUCN (International Union for Conservation of Nature) qui répertorie quant à elle 85 604 espèces au sein de sa liste rouge des espèces (espèces éteintes, menacées, ou (potentiellement) préoccupantes), dont 24 307 sont considérées comme menacées : 42% des amphibiens, 13% des oiseaux, 25% des mammifères, 30% des requins et raies, 33% des coraux constructeurs de récifs et 34% des conifères¹⁴⁰. L'IUCN publie également depuis 2014 une liste rouge des écosystèmes.

Selon le Programme d'évaluation des écosystèmes pour le millénaire, les principales causes de perte de biodiversité sont (Millennium Ecosystem Assessment 2005) les changements d'utilisation des terres (notamment la conversion à l'agriculture), l'utilisation et l'exploitation non durables des ressources naturelles (ressources halieutiques et forêts), les espèces exotiques envahissantes, le changement climatique mondial, et la pollution (concentrations d'éléments nutritifs dans les sols, par exemple). Au cours des 50 dernières années, les changements occurrents ont été plus importants que ceux jamais connus par notre planète sur une telle période temporelle (Millennium Ecosystem Assessment 2005). De 1950 à 1980, la surface d'espaces naturels convertie en surface cultivée a dépassé celle convertie de 1700 à 1850 : les surfaces cultivées représentent maintenant 25% des terres. 20% des barrières de corail ont disparu et 20% supplémentaires sont passablement dégradées, tandis que la mangrove a

¹⁴⁰ <http://www.iucnredlist.org/>

reculé de 35% dans les zones monitorées (50% des mangroves) (Millennium Ecosystem Assessment 2005).

En termes quantitatifs, les parts de responsabilité de pertes d'abondance moyenne des espèces à horizon 2030 dans les pays de l'OCDE pourraient être les suivantes (Organisation for Economic Co-operation and Development Staff 2008) : 52% de pertes liées à l'agriculture, 25% liées au développement des infrastructures(*), 10% liées au changement climatique(*), 7% liées aux activités forestières et enfin 5% liées au morcellement des terres(*) (pourcentages calculés à partir du tableau Excel lié au Graphique 9.2, p223). Dans ce panel de causes, la maintenance routière intervient partiellement – directement ou indirectement – dans les phénomènes marqués d'une étoile (*). Un entretien adapté à une durabilité des infrastructures routières permettrait en effet : de réduire le développement de nouvelles infrastructures, de limiter le morcellement des terres (fragmentation des habitats) et de trouver le bon niveau d'entretien pour un système routier le moins impactant possible du point de vue du climat.

En France, si le recul de la biodiversité prévu n'atteint pas les niveaux de ceux prévus d'ici à 2030 en Asie et en Afrique, elle reste tout de même non négligeable. Au 10^{ème} rang des pays hébergeant le plus grand nombre d'espèces menacées se trouve la France, avec 1143 espèces menacées en métropole ou outre-mer. Par exemple, on observe dans le pays une baisse de l'abondance des populations de chauve-souris. Mais ces baisses des populations d'espèces ne semblent pas inéluctables. En effet, la baisse constatée jusqu'aux années 90, a été suivie d'une remontée après la mise en place de certaines mesures pour les espèces menacées. Par exemple, la directive Oiseaux (Directive 79/409/CEE du Conseil du 2 avril 1979¹⁴¹) concerne la protection de 74 espèces d'oiseaux sauvages (oiseaux, œufs et nids).

Une gestion stratégique de l'entretien routier pourrait donc permettre d'améliorer la performance écologique du système routier, ou d'arbitrer entre les différents impacts. Toutefois, on pourrait se poser la question de l'intérêt d'améliorer ces performances dans le cas où cela n'irait pas, par exemple, dans le sens d'une maintenance directement moins coûteuse financièrement pour le gestionnaire. En termes de biodiversité, le respect des écosystèmes peut être motivé par deux types d'enjeux : des enjeux « moraux », « éthiques », ou encore « non utilitaires » ; des enjeux utilitaires, donc in fine socioéconomiques, liés aux services écosystémiques.

3.4.3 Préservation de la biodiversité

La nécessité de préserver la nature – donc in fine la biodiversité qui est à la fois une partie de la nature et son régulateur vivant – s'explique différemment selon les deux représentations dominantes à propos de la relation homme – nature qui est au centre de l'éthique environnementale (Prades 1995) : biocentrisme ou anthropocentrisme. Il s'agit de positions relatives à l'éthique, donc non consensuelles. En effet, l'éthique est une discipline philosophique réfléchissant aux finalités, aux valeurs de l'existence, aux conditions d'une vie heureuse, à la notion de "bien" ou des questions de mœurs ou de morale.

3.4.3.1 Biocentrisme

Le biocentrisme ou Deep Ecology est un courant de pensée qui s'est développé au XIX^{ème} siècle (Naess 2008) : les organismes de la biosphère, dont l'humain, sont profondément interdépendants car ils font partie d'un champs global, et tous possèdent un droit égal à vivre et se développer. L'Homme fait

¹⁴¹ <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/HTML/?uri=CELEX:31979L0409>

partie de la nature, et à ce titre doit collaborer avec les autres espèces pour un développement harmonieux.

Ces enjeux moraux sont au cœur de l'ouvrage de Michel Serres intitulé *le Contrat Naturel* (2009) et publié pour la première fois en 1989 : quelles sont les limites de la planète terre ? Quels sont les devoirs des civilisations modernes envers elle ? Y a-t-il une fin de la nature prévisible ? Serres retrace les relations de l'Homme à la nature, identifiant un premier tournant au XVIII^e siècle avec les Lumières mettant en marche le progrès et une domestication toujours plus intense et massive de la nature. Au lieu de vivre en symbiose avec le vivant qui lui fournit matériaux, énergie, et nourriture, l'Homme s'est engagé dans une bataille contre la nature : « Notre rapport fondamental avec les objets se résume dans la guerre et la propriété. [...] Nous ne nous battons plus entre nous, nations dites développées, nous nous retournons, tous ensemble, contre le monde. [...] Non réglée, la maîtrise pure se retourne contre soi. [...] Nous ne pouvons exister sans [la Terre] ».

Michel Serres propose dans son ouvrage d'établir un devoir de "limitation minimale et collective de l'action parasitaire" qu'a l'Homme sur la Terre, en s'en nourrissant dans un tel excès qu'il met en péril sa subsistance. Pour cela, il développe l'idée d'un nouveau contrat social et naturel, où les objets de la nature deviennent sujets de droit, et où chaque collectivité reconnaît vivre et travailler « dans le même monde global que toutes les autres ».

La vision morale de Serres s'est avérée tout à fait précurseur puisque dès 2006, des assemblées constituantes ont eu lieu, d'abord en Bolivie, puis en Équateur où en 2011 le premier procès de rivière contre les communautés humaines avait lieu dans l'État de Loja. Les entités de la nature – forêts, rivières, montagnes, animaux, micro-organismes, ... – semblent devenir peu à peu de véritables «sujets» : de droit, sociaux, et politiques. Cela fait également écho à la lente prise de conscience de la souffrance animale, bien que dans les débats actuels les milieux animaliers concernés n'aient plus rien de naturel car ils concernent dans ces débats sociaux principalement les lieux d'élevage qui relèvent davantage du site industriel que de la ferme ou même la nature, ainsi que les abattoirs.

Néanmoins, on peut voir cette vision morale de la nature comme sujet de droit comme motivée par la dépendance de l'Homme – à court et moyen termes de son bien-être et à long terme de sa survie – à la nature. Les enjeux sont donc in fine d'ordre utilitaire, ce que nous aborderons ensuite.

3.4.3.2 *Anthropocentrisme et enjeux utilitaires*

La vision anthropocentrique sépare l'humain de la nature : l'humain est le maître incontesté ou le gardien de la planète, il est donc de son devoir de respecter la planète (Prades 1995), ne serait-ce que pour sa propre subsistance et son bien-être. Or, nous en sommes à la 6^{ème} vague d'extinction des espèces.

A/ Services écosystémiques

Le Millennium Ecosystem Assessment (2005) a développé la théorie des « services écosystémiques », qui justifie jusqu'à monétairement l'intérêt de conserver le patrimoine écosystémique. Relevant selon certains d'une révolution de considération au sein des sociétés occidentales, au lieu de considérer la nature comme sphère à dompter et maîtriser, la biodiversité est reconnue comme nécessaire au bon fonctionnement de nos sociétés. Ce serait donc une vision socialisée du fonctionnement naturel. Les fonctions vitales assurées par les écosystèmes sont la production d'oxygène de l'air, l'épuration naturelle des eaux, la production de biomasse, la pollinisation, la production d'humus et l'entretien des sols, la séquestration naturelle de carbone dans le bois, les sols, les mers, et le sous-sol, et enfin le recyclage des nutriments et de la nécromasse par la faune, la fonge et les bactéries. On classe souvent

ces fonctions dans 4 catégories : les fonctions d’approvisionnement, les fonctions régulatrices, les fonctions culturelles et les fonctions supports.

B/ Co-dépendances et boucles de rétroactions

Les écosystèmes sont des réseaux interdépendants d’organismes vivants co-évoluant dans un environnement entièrement dépendant du bon fonctionnement de ces organismes : l’écosystème est stable si ses caractéristiques sont stables, en termes géophysique (2) et écologique, du point de vue des populations faunistiques, floristiques et autres. Chaque écosystème est plus ou moins résilient face à la modification d’un paramètre de son système.

C/ Exemple de la régulation du changement climatique

Il semble important de commencer par la boucle de rétroaction : les stratégies d’entretien des routes ont un impact sur le changement climatique via l’équilibre dépenses carbones en entretien Vs dépenses carbones par le trafic, ces deux dépenses étant dépendantes entre elles. Des écosystèmes en bon état impliquent un certain stockage de CO₂. Déstabiliser cet équilibre via une hausse des températures pourrait avoir un effet d’amplification si les écosystèmes venaient à en perdre leur pouvoir de régulation en concentration de CO₂.

D/ Écosystèmes et bien-être

Nous ne détaillerons pas le reste de la liste des services écosystémiques donnée précédemment dans cette section dévolue à la strate écologique, mais dans la strate socioéconomique présentée ensuite, et qui aborde les impacts de l’entretien routier d’un point de vue anthropocentrique (voir 4).

3.4.4 Synthèse

Il est relativement difficile de prévoir l’ampleur des conséquences de modification des écosystèmes. Selon un principe de précaution, on pourrait considérer qu’il faut conserver l’équilibre actuel des écosystèmes, et donc conserver des populations constantes d’individus de chaque type d’organismes vivants, qu’il soit faunistique, floristique, fongique, bactériologique, ou humain. Chaque espèce pourrait donc également être vue comme un patrimoine ou un stock à gérer.

Néanmoins, cette approche est limitée par le fait que toutes les espèces existantes sont loin d’être connues, et que la connaissance de la population des espèces recensée est limitée. En effet, on découvre de nouvelles espèces tous les jours, et en termes de population, les espèces les plus connues seraient les plus charismatiques : une hypothèse à cela serait qu’il est plus facile d’obtenir des financements sur les animaux « beaux » que ceux considérés comme « laids » ou « méchants » (Fleming et Bateman 2016).

4 Système socioéconomique

Après présentation de la systémique de l’entretien selon une vision géophysique puis une vision écologique, cette strate socioéconomique vient mettre l’intérêt de l’Homme au cœur de notre problématique d’évaluation de l’entretien routier, dans le but de sélectionner les types de performances à inclure dans une méthode d’évaluation intégrée.

Tous les impacts précédemment listés en parties 2 et 3 ont nécessairement des effets sur le milieu humain à tout point de vue, allant de l’organisation économique de la société – comment se nourrir malgré des modifications des écosystèmes dues aux changements climatiques et aux pollutions diverses, où trouver les matériaux nécessaires aux activités humaines, etc. – à la santé de l’homme et même plus globalement à son bien-être, en considérant ses conditions de vie (événements climatiques extrêmes, capacité de mobilité, alimentation, etc.). De plus, l’entretien routier influence la qualité du

transport routier. Ce mode représentant environ 90% du transport de personnes et de marchandises en France. L'entretien des infrastructures nécessaires au fonctionnement du système routier a donc un impact sur la qualité de vie humaine, dans l'expérience individuelle comme du tout sociétal, les deux étant évidemment imbriqués. L'imbrication concerne également le fonctionnement économique de la société. Enfin, par son levier d'action sur les consommations et émissions issues des transports routiers, nous avons vu que la maintenance va impacter les ressources alimentaires humaines via la pollution des milieux naturels et le changement climatique, ainsi que le potentiel de la nature comme source de loisirs et espace touristique. Elle implique également la réduction de l'espace vital et des ressources génétiques, l'altération des chaînes alimentaires, et la consommation de ressources alternatives afin de s'adapter à ces changements. Nous représentons de façon synthétique ces liens de causalité sur la Figure 30.

Après une discussion autour des notions de société, d'individus et une proposition de modélisation de notre système social, nous développerons davantage la question du bonheur humain à travers plusieurs ancrages théoriques dans le but de faire ressortir les facteurs les plus importants du bien-être, avant d'en détailler les mécanismes de modification impliqués par le niveau d'entretien des routes.

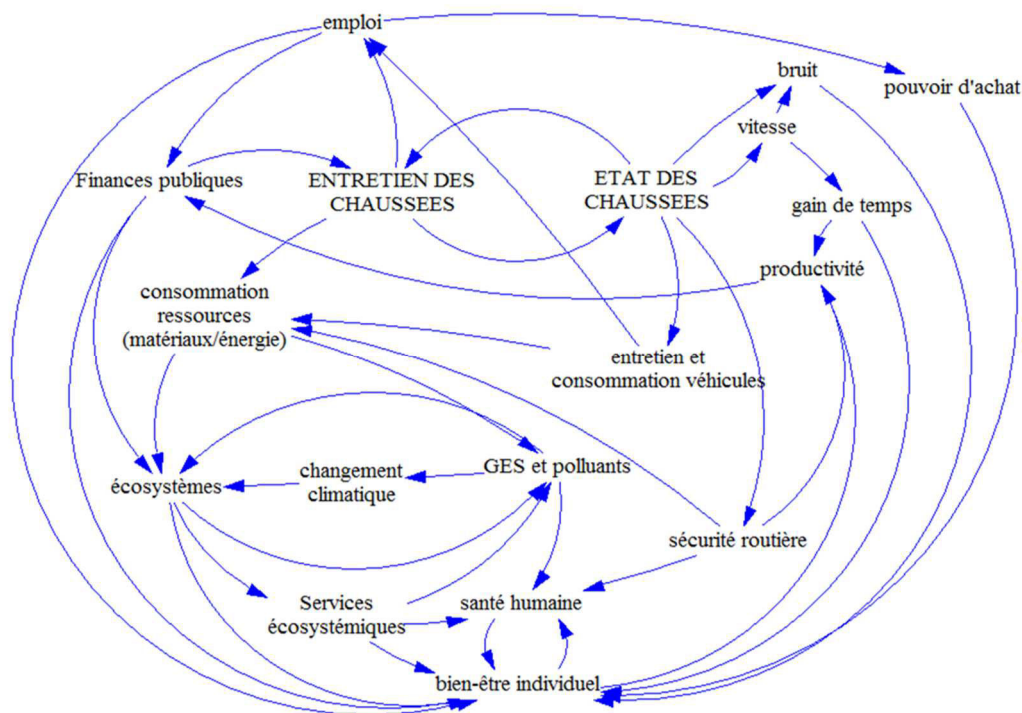


Figure 30 Principales boucles causales d'impacts socio-économiques liés à l'entretien des routes

4.1 Penser le système socioéconomique de l'entretien routier

4.1.1 Société : définitions et articulation à l'individu

Une société – à notre époque il en existe plusieurs, et à plusieurs échelles : planète, pays, ville et autres – peut être définie du point de vue macroscopique comme un ensemble d'êtres humains vivant en groupe organisé, comme tout groupe social formé de personnes qui se réunissent pour une activité ou des intérêts communs ; du point de vue individuel la société est le milieu humain dans lequel quelqu'un vit. On peut donc le voir comme le substrat qui donne des règles de conduite et de pensée, des idéaux, aux individus qui la compose, par les valeurs qu'elle prône, l'individu y adhérant plus ou moins. La plupart des humains appartiennent à une société, que l'on peut voir comme le tissu social qui tient,

met en cohérence, les individus entre eux. C'est donc en majorité ancré dans la société que l'individu va évoluer, se réaliser, et chercher son bien-être et son bonheur.

Mais il y a rétroaction entre individu et société, entre contenu et contenant : la société comporte des règles et valeurs héritées, transformées par le temps, qui façonnent les individus. Mais les individus réagissent à ces règles, et peuvent les façonner à leur tour. On peut voir les individus comme récepteurs du bien-être à travers les activités qu'ils mènent au sein de la société, la société fournissant certaines conditions de vie à l'individu.

Nous cherchons ici à décrire le référentiel sociopolitique sur lequel nous allons asseoir notre méthode d'évaluation de l'entretien routier. « Sociopolitique » fait référence à la société dans ses rapports avec la politique, que l'on ne doit donc pas entendre au sens populaire, mais comme relatif à l'État, à la société organisée, le mot « polis », rappelons-le, signifiant « cité » en grec ancien, politique voulant ainsi dire « qui concerne le citoyen ». Elle inclut donc toutes les composantes économiques de la vie en société.

Comme nous l'avons fait avec la question des besoins, nous proposons d'étudier l'organisation politique et sociale à deux échelles. À l'échelle de l'individu d'abord, en partant de la décomposition de son cycle de vie et en analysant son utilisation du temps – dans le but de cerner les activités importantes et spécifiquement la place du système routier. Puis à une échelle plus macroscopique – davantage économique – du fonctionnement de la société et de l'impact de l'entretien routier

4.1.2 Éthique économique et social et notion de vie bonne

La question de ce qui est enviable, désirable, souhaitable pour l'Homme est d'ordre philosophique et métaphysique, au sens où elle aborde à la fois le rôle de l'homme dans l'univers, et l'organisation/le fonctionnement/l'état souhaité pour l'ensemble des hommes dans le tout social. Soit sa condition, mais aussi son action, puisque la société est construite et structurée de façon à répondre aux besoins de l'homme et qu'il est attendu de l'homme qu'il se comporte de façon à répondre aux règles de cette société. La réponse n'est donc ni simple ni consensuelle. Un but individuel à la fois populaire, intemporel et universel est la « vie bonne », soit l'atteinte du bien-être voire du bonheur, le bien-être ayant une connotation d'aisance matérielle permettant une existence agréable tout en signifiant un « état agréable résultant de la satisfaction des besoins du corps et du calme de l'esprit » (Larousse), le bonheur étant quant à lui « l'état de complète satisfaction » avec une connotation circonstancielle. Les penseurs de la société mettent souvent en avant un « Idéal d'une société libre et égale inhérente aux sociétés démocratiques », qui s'ancre dans la discipline de l'éthique économique et sociale (Arnsperger et Van Parijs 2007). Si les conceptions de la vie bonne sont variées, Arnsperger et Van Parijs (2007) proposent une classification en quatre catégories de la pensée de cette éthique économique et sociale pour l'optimisation de l'épanouissement des individus de la société : l'utilitarisme, le libertarisme, le marxisme et l'égalitarisme libéral. Les Libertariens considèrent 3 principes fondamentaux de la société juste : la propriété de soi, la juste circulation (i.e. transferts volontaires) et l'appropriation originelle (Arnsperger et Van Parijs 2007). Le projet éthique marxiste vise à abolir l'aliénation de l'homme par l'homme, la finalité humaine étant d'abord de subvenir à ses besoins puis l'accomplissement de soi (Arnsperger et Van Parijs 2007). Utilitarisme et égalitarisme libéral se rejoignent sur un principe fondamental de maximisation des gains (i.e. bien-être), pour le premier appelé utilité globale des individus, pour le second étendue d'accès aux libertés fondamentales (Arnsperger et Van Parijs 2007). Toutefois, l'égalitarisme libéral selon Rawls ajoute deux contraintes : différenciation (i.e. égal respect à l'égard de toutes les conceptions de la vie bonne), et principe de « maximin » selon lequel, à gains maximaux égaux entre plusieurs systèmes de fonctionnement, on choisit les règles selon lesquelles le gain de la classe d'individus les plus défavorisés est le plus haut (Rawls 1999). Dans ces quatre approches, il y a consensus sur la notion de société bonne ou juste : celle qui satisfait au mieux les besoins de l'ensemble des hommes, soit « l'utilité

publique ». Le dissensus apparaît dans la définition des besoins humains. Aussi, l'utilité publique « n'est jamais donnée d'emblée ; elle doit être découverte, plutôt construite, en se démarquant souvent de l'écheveau complexe des intérêts particuliers » (Desportes et Picon 1997, p45). C'est cette notion d'utilité publique que nous souhaitons développer maintenant.

4.1.3 Bien-être sociétal

4.1.3.1 Besoins individuels (Maslow 1943)

Abraham Maslow, psychologue américain, a étudié les moteurs de la motivation humaine et est connu pour son concept de hiérarchie des cinq niveaux de besoins¹⁴² individuels sous forme de pyramide : une échelle dont on gravit les barreaux (i.e. besoins) les uns après les autres pour atteindre la satisfaction totale. Il existe plusieurs segmentations de ces 5 types de besoins, nous n'en présentons qu'une. Au pied de la pyramide : les besoins physiologiques, ou besoins primaires, qui correspondent à des exigences naturelles. L'être humain, pour sa survie, doit satisfaire des besoins vitaux qui sont se nourrir, dormir, mais aussi pouvoir maintenir son corps à une température normale (vêtements, abri/logement...). Ne pas remplir ces besoins entraîne des souffrances physiques. Une fois que ces besoins de base sont remplis, l'humain va tenter de remplir un autre type de besoins : ses besoins psychologiques, sociaux et de réalisation, ou besoins secondaires, pour la plupart relatifs à une société donnée dans un contexte temporel donné. Au premier rang, l'homme va chercher à assurer sa sécurité vis-à-vis des agressions extérieures (naturelles ou anthropiques). Ce besoin rempli, il va se tourner vers des aspirations dites « supérieures ». Le premier cité est le besoin d'appartenance à un groupe, que ce groupe soit la famille, la tribu, le groupe d'ami ou autres. Les sciences sociales identifient souvent 5 types de réseaux de sociabilité : familial, amical, professionnel, de voisinage, et associatif (Iacub 2016). Ensuite arrive le besoin d'estime de soi, puis enfin le besoin d'accomplissement ou de réalisation de soi, aussi appelé transcendance.

Cette vision de la pyramide de Maslow est la plus véhiculée, bien qu'elle s'affranchisse du caractère dynamique des besoins dans la construction de la personnalité que Maslow a bien perçu et développé dans sa théorie.

Remplir ces 5 types de besoins serait donc une condition nécessaire au bonheur de l'individu. Les besoins étant illimités en nombre et en partie générés par la société et le marketing, on ne peut que remettre en question la possibilité d'accéder à un état de contentement individuel stable. Pour autant, on peut tendre vers un état global optimal de bien-être (resp. de bonheur), le tout étant considéré à défaut de l'individu. C'est la théorie de l'économie du bien-être (resp. du bonheur).

4.1.3.2 Économie du bien-être

L'économie du bien-être est une branche des sciences économiques qui prend sa source dans les travaux d'Adam Smith – le livre V de la Recherche sur la nature et les causes de la richesse des nations (Smith 1776) propose une réflexion sur ce que l'État (le « souverain ») doit faire pour améliorer le bien-être collectif – et d'A. Marshall (1890)). Arthur Cecil Pigou, professeur de Keynes, développera la théorie plus avant, et peut être considéré comme le père moderne de cette théorie, avec son ouvrage « the Economics of welfare » (Pigou 1932). Il existe deux théorèmes de l'économie du bien-être¹⁴³, qui

¹⁴² Un besoin est un sentiment de manque physique ou psychique – il est donc subjectif - accompagné du désir ou de la nécessité de le faire disparaître. L'individu a des besoins illimités en nombre - la plupart étant créés par le développement économique et technique – et limités en volume (=notion de satiété).

¹⁴³ Théorème n°1 : Tout équilibre général en concurrence pure et parfaite est un optimum de Pareto. Théorème n°2 : tout optimum de Pareto peut être obtenu comme équilibre walrasien après réallocation des dotations initiales. En substance, cela signifierait que (T1) la concurrence pure et parfaite (si besoin organisée par l'Etat) suffit à obtenir un optimum de Pareto mais que (T2) il suffit de modifier les allocations initiales des agents pour

sont les résultats fondamentaux de la théorie de l'équilibre général formulée par Arrow et Debreu. Sous réserve d'un nombre d'hypothèses de l'équilibre général rarement vérifiées dans la réalité (concurrence pure et parfaite, homogénéité et continuité des fonctions de production et des fonctions de demande, ...), ils permettent de calculer un optimum d'allocation des ressources (optimum de Pareto) afin de maximiser le bien-être collectif. Néanmoins, cette approche soulève la question délicate de la répartition entre les membres de la collectivité. Les outils développés dans cette économie sont censés guider la décision publique de manière rationnelle et optimale.

L'économie du bien-être est héritière de l'utilitarisme : qualifiée de philosophie économique, philosophie politique, ou d'éthique sociale, c'est une doctrine du XVIII^{ème} siècle qui prescrit de maximiser le bien-être collectif, i.e. la somme ou la moyenne de bien-être de l'ensemble des individus. La définition du principe d'utilité donnée par Bentham (1781), l'un des pères de l'utilitarisme, est suivante : « Par principe d'utilité, on entend le principe selon lequel toute action, quelle qu'elle soit, doit être approuvée ou désavouée en fonction de sa tendance à augmenter ou à réduire le bonheur des parties affectées par l'action. [...] On désigne par utilité la tendance de quelque chose à engendrer bien-être, avantages, joie, biens ou bonheur. » L'utilitarisme recherche donc « le plus grand bonheur du plus grand nombre », à la différence que le bonheur est réduit au bien-être objectif dans cette branche de l'économie. Elle est d'ailleurs critiquée par l'économie comportementale qui montre que l'agent économique n'est ni omniscient ni nécessairement rationnel : les individus prennent des décisions qui ne maximisent pas leur bien-être.

4.1.3.3 Économie du bonheur: mesure et analyse

A/ Théorie et méthodes

Branche récente de l'économie, basée sur la psychologie hédonique mais initiée par une étude menée à l'Université du Michigan sur les attitudes des consommateurs à partir d'enquêtes sur les opinions dans les années 1950 (Davoine 2009), l'économie du bonheur se distingue de l'économie du bien-être par le fait de ne pas fonder ses analyses du bien-être comme état objectif, c'est-à-dire dépendant simplement de la santé, l'éducation, les loisirs, etc., mais sur la dimension cognitive du bonheur (satisfaction de la vie) et sa dimension émotionnelle (émotions positives et négatives) : le bonheur est alors considéré comme état conscient subjectif. On pourrait donc définir le bonheur comme bien-être subjectif, bien qu'aucune définition ne soit réellement consensuelle.

Trois principales méthodes, basées sur des questionnaires, permettent d'évaluer le degré de bonheur d'un individu: la méthode de reconstruction de la journée (Day Reconstructing Method = DRM), la méthode d'échantillonnage des expériences (Experience Sampling Method = ESM), et les échelles d'auto-évaluation.

Les composantes individuelles du bonheur sont alors analysées, sur la base de ces données subjectives. Cela permet de faire ressortir deux types de déterminants du bonheur. D'abord, les déterminants déclarés par les enquêtés : ceux sont eux qui estiment que tel ou tel facteur est important pour le bonheur. Il y a donc une certaine subjectivité dans leur déclaration. Ensuite, les déterminants observés : en fonction de l'estimation (subjective) du bonheur de l'enquêté, l'analyste va croiser ces déclarations et des facteurs observés (catégories socio-professionnelles, revenus, éducation, âge, sexe, etc.) pour faire ressortir des corrélations entre bonheur ressenti et paramètres testés

B/ Mesures du bonheur (Royannez 2015)

De nombreuses études ont été réalisées dans le but de comprendre et de mesurer le bonheur. En 1981, le World Value Survey a été lancé dans plus de 100 pays (>400 000 personnes interrogées) afin

obtenir n'importe quel optimum de Pareto déterminé (incitation à la planification sociale des allocations initiales plutôt qu'au jeu sur la machine économique).

de comprendre les critères de bonheur et leur évolution temporelle. Entre 2010 et 2014, cette enquête pluriannuelle a concerné 85 000 personnes dans 59 pays. Une base de données, la base de données mondiale du bonheur (World Database of Happiness¹⁴⁴), a été développée en utilisant 3 000 enquêtes de 148 pays. Son exploitation a résulté en 1700 études dont les résultats corroborent les tendances dégagées dans le World Value Survey. Nous montrons les résultats agrégés par année pour la France en Figure 31. La tendance n'est pas linéaire. Cependant, la moyenne semble globalement croître entre 1973 et 2015. Il est amusant de noter que si les notes sur 4 suivent globalement les tendances des notes sur 10, elles surestiment néanmoins la satisfaction comparée à celle déclarée sur 10 : en effet, les notes sur 4 (courbe rouge) ramenées sur 10 (courbe bleue) sont supérieures aux notes sur 10 (courbe verte). En 2006, la première carte du bonheur mondial (world map of happiness) voit le jour, basée sur 80 000 individus de 178 pays, et sur des données de L'UNESCO, la CIA, la New Economics Foundation, l'OMS, et la base de données mondiale du bonheur. Les trois variables principalement considérées sont la santé, la richesse et l'éducation.

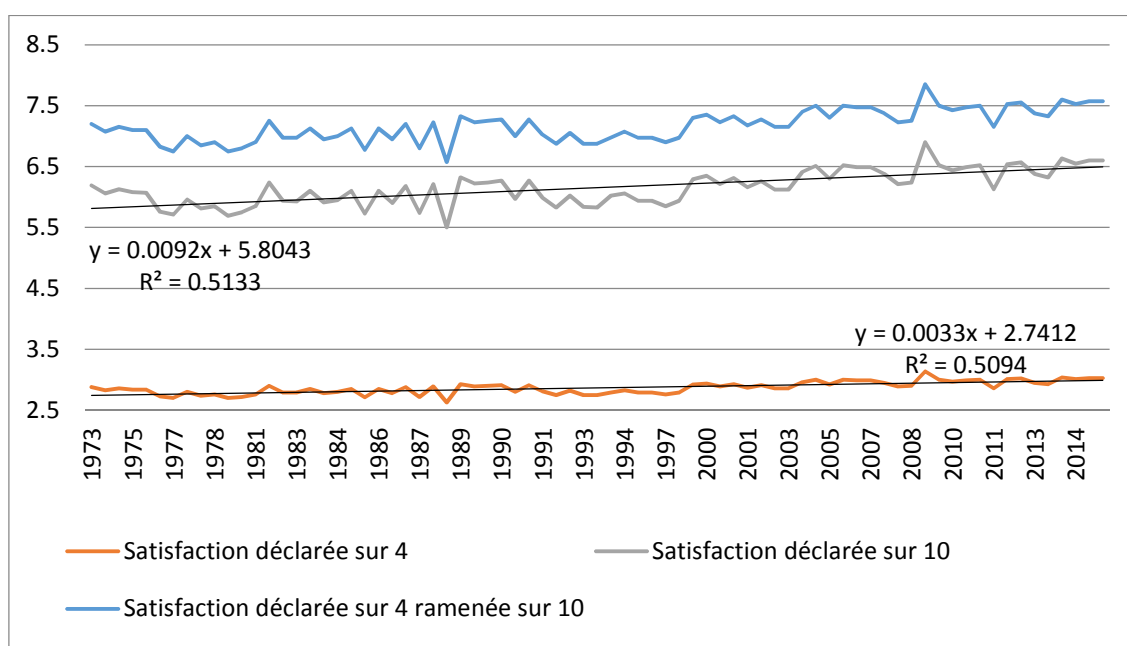


Figure 31 Satisfaction déclarée en France au cours du temps (données: world database of happiness)

Des indicateurs alternatifs au classique PIB ont ainsi fait leur apparition, comme le Bonheur National Brut, l'Indice de Bonheur Mondial, ou encore l'Indice de Développement Humain.

C/ Déterminants du bonheur

i/ Composantes déclarées

Selon l'étude de White (007)) qui a travaillé sur un indice de satisfaction de vie, les facteurs principaux qui ressortent des enquêtes sont la santé (corrélation de 0.7), la richesse (0.6) et l'éducation « basique » (0.6) définie aux USA comme l'éducation citoyenne en quelque sorte.

Les maladies mentales – incluant la dépression– ressortent comme un des facteurs principaux de mal-être, expliquant plus de 30% des écarts de ressenti.

L'impact des événements négatifs et positifs de la vie expliquerait également 25% des différences du bonheur ressenti selon Headey et Wearing (1992)). Si 10% de ces différences est indépendante de la personnalité de l'enquêté, ces chercheurs ont tout de même montré que la personnalité influencerait sur

¹⁴⁴ <https://worlddatabaseofhappiness.eur.nl/>

le parcours individuel : les événements favorables seraient ainsi plus fréquents chez les personnes extraverties et éduquées, tandis que les événements indésirables se produiraient davantage chez les individus « souffrant de névroses ». Seuls 35% de ces événements seraient dus au hasard.

D'après l'Eurobaromètre¹⁴⁵, 72 % des européens déclarent que l'état de l'environnement naturel influence leur qualité de vie.

ii/ Composantes observées

Les principaux résultats de cette économie sont que, si bonheur et revenu sont globalement légèrement positivement corrélés dans les pays riches¹⁴⁶, la corrélation décroît avec le revenu pour, dans certaines études, devenir corrélation négative (courbe en forme de cloche, i.e. curvilinéaire) : le revenu, corrigée de l'impact du statut social, ne serait d'ailleurs pas corrélé au bonheur (Eriksson, Rice, et Goodin 2007). Certains expliquent ces résultats par la comparaison sociale et l'adaptation : premièrement, par tendance endogame, les cercles de sociabilité d'un individu correspondent souvent à sa catégorie socio-professionnelle. Un individu aura globalement toujours envie de se pourvoir du mieux de ce qui existe dans son entourage : c'est la richesse relative à l'entourage qui importe et non pas la richesse réelle. Ensuite, si le confort augmente avec le revenu, l'individu s'adapte au confort et nécessite donc toujours davantage de confort. De la même manière, un individu peut s'habituer à un niveau de vie plus faible que celui connu auparavant et voir naturellement ses critères de satisfaction se réduire. Ce double effet, cette « adaptation hédoniste » relative aux revenus, est le paradoxe d'Easterlin (1974). L'adaptation hédoniste peut également être étudiée par rapport à l'augmentation de la satisfaction de vie lorsque les individus se marient, sa réduction lors d'une diminution de niveau de santé, etc. Une question qui fait débat chez les économistes est, pour chaque facteur de la satisfaction, de savoir s'il y a adaptation totale ou pas aux meilleurs ou moins bonnes conditions, résultant dans le premier cas en une sensation de bonheur égale sur le long terme quelles que soient les conditions de vie. Ce serait davantage le cas pour les facteurs pécuniaires que non pécuniaires (Easterlin 2003).

Des liens sociaux de qualité – temps passé en famille, avec des amis chers, un investissement communautaire – serait une composante importante du bonheur. Toutefois, la personnalité serait primordiale dans la sensation de bonheur, selon le degré d'optimisme, d'empathie, ou encore d'estime de soi (Royannez 2015).

4.1.3.4 Économie du bien-être versus Économie du bonheur

L'avantage de l'économie du bonheur serait donc de remettre l'humain au cœur des choix d'action sociale. En effet, les facteurs socioéconomiques expliqueraient moins de 20 % de la variance de bien-être subjectif entre personnes (Ng 2003) voire moins de 10% (Schwarz et Strack 1999). Néanmoins, plusieurs biais viennent complexifier le virage vers le normatif de l'économie du bonheur, principalement l'endogénéité¹⁴⁷ (question de « la poule ou l'œuf » : est-ce qu'un faible salaire rend malheureux ou est-ce que le fait d'être malheureux rend plus difficile de réussir sa vie professionnelle et d'obtenir un salaire élevé ?), désirabilité sociale (on évite de dire que l'on est malheureux ou insatisfait), hétérogénéité des fonctions d'utilité ou modes d'expression verbale différents, effet de présentation (i.e. ordre des questions posées), etc. L'économétrie semblerait permettre de corriger ces biais, pour faire ressortir des valeurs de paramètres économiques, sociaux et institutionnels, qui améliorent le bien-être subjectif. Toutefois, certains économistes du bonheur avancent simplement

¹⁴⁵ Depuis 1973, la commission européenne mène des enquêtes afin de déterminer la perception des Européens sur l'UE

¹⁴⁶ Dans les pays en développement, la corrélation bonheur-revenu est en revanche forte

¹⁴⁷ Dans un modèle statistique, l'endogénéité d'un paramètre ou d'une variable est la corrélation entre ce paramètre ou cette variable et le résidu

qu'il n'existe pas de paramètres universels et atemporels, et qu'ainsi les seuls résultats généraux valables en économie du bonheur proviennent des méta-analyses (agrégation de nombreuses études individuelles) (Veenhoven 2009). De plus, les individus ne sont pas rationnels car ils ne possèdent pas l'omniscience. Aussi, l'économie du bonheur suscite la question de la pertinence de l'analyse des facteurs déclarés de bonheur. Ensuite, le confort matériel et l'absence de maux peut passer au second plan des priorités de l'individu, et les choix peuvent se porter d'abord vers un développement personnel évolutif (stimulation, nouveauté, défis) (Scitovsky 1992)... Dans ce cas, on peut se demander comment utiliser cette science pour mettre à jour les meilleurs critères des fonctions d'utilité individuelles, dans le but final de les maximiser. D'ailleurs, certains économistes du bonheur appuient l'intuition libérale d'une société individualiste où les individus seraient globalement plus épanouis qu'au sein d'un État providence, basés sur des études de corrélation (Veenhoven 1999, 2000). Évidemment, ce résultat n'est pas consensuel.

Pour autant, il est possible d'utiliser les résultats de ce type d'enquêtes pour monétariser les conséquences d'un projet sur le bonheur humain ou social (Figure 32): ce sont les valeurs de référence calculées à partir de préférences déclarées (questionnaires) ou révélées (économétrie). Elles pourraient donc avoir une portée normative bénéfique à l'homme par une sélection plus fine des facteurs d'utilité et des valeurs de références associés à ces facteurs et utilisés en Analyse Coût-Bénéfice (ACB), malgré les difficultés précédemment évoquées.

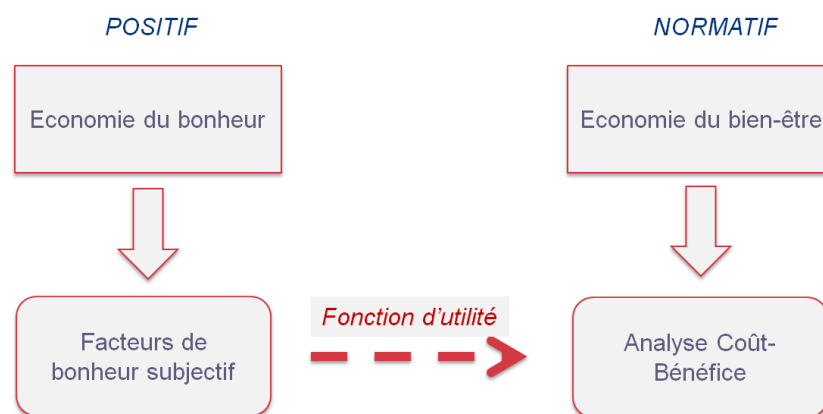


Figure 32 Articulation et caractéristiques incontournables des deux théories des sciences économiques : bien-être et bonheur

4.1.3.5 Synthèse

On pourra définir le bien-être d'un individu comme l'état de satisfaction des besoins primaires de l'individu. Par différence, le bonheur d'un individu correspond à son bien-être subjectif, qui est donc le contentement des besoins primaires et supérieurs de l'homme, donc son contentement complet.

Un objectif social classique est une société où les individus sont le plus globalement satisfaits. L'économie du bien-être aborde le sujet en maximisant le bien-être objectif global des individus. L'économie du bonheur, davantage positive que normative, s'attache à analyser les composantes observées ou déclarées de la satisfaction déclarée des individus. Les approches sont donc globalement orthogonales entre individu et société, entre approche analytique et systémique, bien que l'on puisse penser théoriquement possible d'utiliser l'approche positive pour nourrir l'approche normative (Figure 32).

En substance, on retiendra de cette étude bibliographique quelques facteurs récurrents de satisfaction qui peuvent être liés à l'entretien routier. L'économie est un déterminant du bonheur. En particulier, il faudrait dépasser un seuil de revenu donné pour être heureux (Easterlin 2003). Néanmoins, ce seuil

passé, le temps libre (plus encore quand il est partagé¹⁴⁸ (Young et Lim 2014)), et encore davantage le contrôle sur ce temps, est substantivement significatif dans le bonheur de l'individu, bien davantage que les revenus (Eriksson, Rice, et Goodin 2007). Attention tout de même : bien que le chômage résulte en davantage de temps libre que ce qu'ont les actifs, il pourrait être le plus grand destructeur de bonheur du fait de l'anxiété relative à la recherche d'emploi, la moindre reconnaissance sociale et la perte de revenu (Young et Lim 2014). La santé (et le « non-handicap » physique comme mental) peut également être un facteur important, selon les travaux d'Easterlin par exemple (2003). Les liens sociaux de qualité sont un facteur de satisfaction que l'on retrouve régulièrement dans la littérature, qu'il s'agisse de la famille ou des amis : cela rejoint le facteur de temps libre partagé. L'éducation est également importante – et même doublement si l'on considère qu'elle permet de réaliser de meilleurs choix pour son propre bonheur – de même que les conditions de travail (Easterlin 2003).

Notons que ces facteurs coïncident en partie avec les règles et objectifs fondamentaux de la société française détaillés dans les textes de la Constitution Française que nous allons détailler maintenant, notamment sur les points suivants : santé, sécurité matérielle (i.e. seuil de ressources), emploi, loisirs et repos.

4.1.4 Règles fondamentales de la société française

La Constitution française fait référence aux textes fondateurs de l'unité nationale, qui en énonce les principes fondamentaux à travers 4 corpus : la Constitution du 4 octobre 1958¹⁴⁹, la Déclaration des Droits de l'Homme et du Citoyen (DDHC) de 1789¹⁵⁰, le Préambule de la constitution du 27 octobre 1946¹⁵¹ et la Charte de l'environnement de 2004¹⁵². Ces quatre textes ont la fonction théorique d'unir les individus par un ensemble de principes de fonctionnement, de droits et de devoirs au sein de la société française : ils ont une valeur constitutionnelle, dans le double sens de valeur légale et de rassemblement. Nous reviendrons sur ces 3 derniers textes, qui contiennent à notre sens des éléments permettant de définir indirectement les critères de performance des politiques d'entretien routier.

4.1.4.1 Déclaration des Droits de l'Homme et du Citoyen et Préambule de la constitution

L'introduction de la DDHC conclut sur l'importance du *bonheur de tous*, et son article premier insiste sur l'objectif fondamental de l'utilité commune. L'article 2 rappelle également les droits naturels de l'Homme, dont celui à la *sûreté*. L'article 13 prévoit une contribution aux dépenses administratives et policières de la nation équitable selon les moyens de chacun. Le préambule de la constitution quant à lui proclame les principes politiques, économiques et sociaux de la République. Parmi eux, l'égalité des droits entre hommes et femmes, le droit à travailler et à obtenir un *emploi*, des conditions convenables de développement (individu et famille) et d'existence, la protection de la *santé*, de la *sécurité matérielle*, du *repos* et des *loisirs* notamment pour l'enfant, la mère et les vieux travailleurs, l'accès de l'enfant et l'adulte à l'instruction, la formation et la culture.

4.1.4.2 Charte de l'environnement

Enfin, la Charte de l'environnement déclare dans son préambule que le peuple français considère que « les ressources et les équilibres naturels ont conditionné l'émergence de l'humanité », que « l'avenir

¹⁴⁸ Young et Lim (2014) expliquent ainsi que le bonheur fluctue au cours de la semaine - au plus bas le lundi, il augmente graduellement jusqu'au pic du week-end – y compris pour les chômeurs car le temps libre n'a pas la même valeur s'il est partagé.

¹⁴⁹ <https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=LEGITEXT000006071194>

¹⁵⁰ <https://www.legifrance.gouv.fr/Droit-francais/Constitution/Declaration-des-Droits-de-l-Homme-et-du-Citoyen-de-1789>

¹⁵¹ <https://www.legifrance.gouv.fr/Droit-francais/Constitution/Preambule-de-la-Constitution-du-27-octobre-1946>

¹⁵² <https://www.legifrance.gouv.fr/Droit-francais/Constitution/Charte-de-l-environnement-de-2004>

et l'existence même de l'humanité sont indissociables de son milieu naturel », et que « l'environnement est le patrimoine commun des êtres humains ». Elle reconnaît aussi les conséquences croissantes de l'action de l'Homme sur ses propres conditions de vie et son évolution et in fine le lien entre biodiversité, épanouissement personnel et progrès. La préservation de l'environnement est posée comme l'un des intérêts fondamentaux de la Nation au titre notamment du développement durable dont la définition du rapport Brundtland est rappelée.

L'article 1 rappelle le droit à un environnement permettant une bonne santé, facteur du bien-être que l'on retrouve également dans le préambule de la constitution comme déjà dit. Toute personne a le devoir de respecter et d'améliorer l'environnement (article 2), ou a minima de limiter les atteintes qu'elle y porte (article 3) et de contribuer à les dédommager (article 4). Le principe de précaution est rappelé (article 5), de même que le devoir des politiques publiques de promouvoir le développement durable (article 6), d'informer (article 7) et d'éduquer (article 8).

4.1.4.3 Enseignements

Ces textes rappellent plusieurs notions importantes quant aux objectifs sociaux et à leurs moyens de se réaliser. En essence et pour citer Antoinette Rouvroy¹⁵³ « la politique ou la société est une transcendance des intérêts individuels au profit d'un projet collectif ». Selon ces textes, le projet collectif vise un objectif fondamental d'épanouissement personnel, de bonheur pour tous ou d'utilité commune, que l'on peut entendre comme un certain niveau de bien-être et une visée équitable. Les facteurs socioéconomiques de bonheur soulignés qui sont en relation – nous l'expliquerons plus tard – avec les stratégies d'entretien routier sont : la santé, la sûreté et la sécurité, l'emploi, les loisirs, le repos, les ressources et l'environnement naturel. Les pouvoirs publics, financés par la contribution des individus selon leurs moyens, assument les pouvoirs régaliens y compris ceux liés à la préservation des ressources naturelles, au maintien des écosystèmes de la Charte de l'environnement de 2004.

4.2 Impacts socioéconomiques de l'entretien routier

Détailler les impacts socioéconomiques de l'entretien routier pose une réelle difficulté de présentation. Tout d'abord, sérier les impacts sociaux des impacts économiques n'est pas évident tant ces deux « piliers » du développement durable sont interconnectés par le fait d'une organisation des individus en société. De plus, les acteurs ou parties prenantes impactés socioéconomiquement par le niveau d'entretien des routes sont nombreux, souvent connectés entre eux, émetteurs ou récepteurs d'impacts, et les individus qui composent les groupes impactés portent dans la plupart des cas plusieurs casquettes, comme nous l'avons déjà vu avec les parties prenantes les plus directement impactés par l'entretien (voir Figure 35). Cette analyse révèle finalement 5 parties prenantes : les usagers qu'ils soient ménages, entreprises privées ou publiques ; les riverains qui subissent les nuisances locales liées à la route (bruit, pollution) ; la Nation – garante des économies collectives – dont les finances publiques sont affectées par l'emploi/le chômage, les collectes fiscales, et le coût d'entretien des infrastructures de manière directe (routes non concédées) ou indirecte (routes concédées) ; le gestionnaire routier, s'il est privé ; et enfin l'environnement, puisque sa dégradation génère des conséquences économiques en-dehors de celles abordées dans la gêne aux riverains.

Après avoir discuté de l'articulation entre individu, collectif, et parties prenantes, nous détaillerons dans un second temps les impacts socioéconomiques de l'entretien routier selon les quatre parties prenantes identifiées ci-dessus.

¹⁵³ « Le numérique fait-il de nous un numéro ? », 1/3/17, France Culture, Table ronde enregistrée à la Sorbonne dans le cadre du forum « L'année vue par les sciences » le 25 février 2016.

4.2.1 Individus et parties prenantes

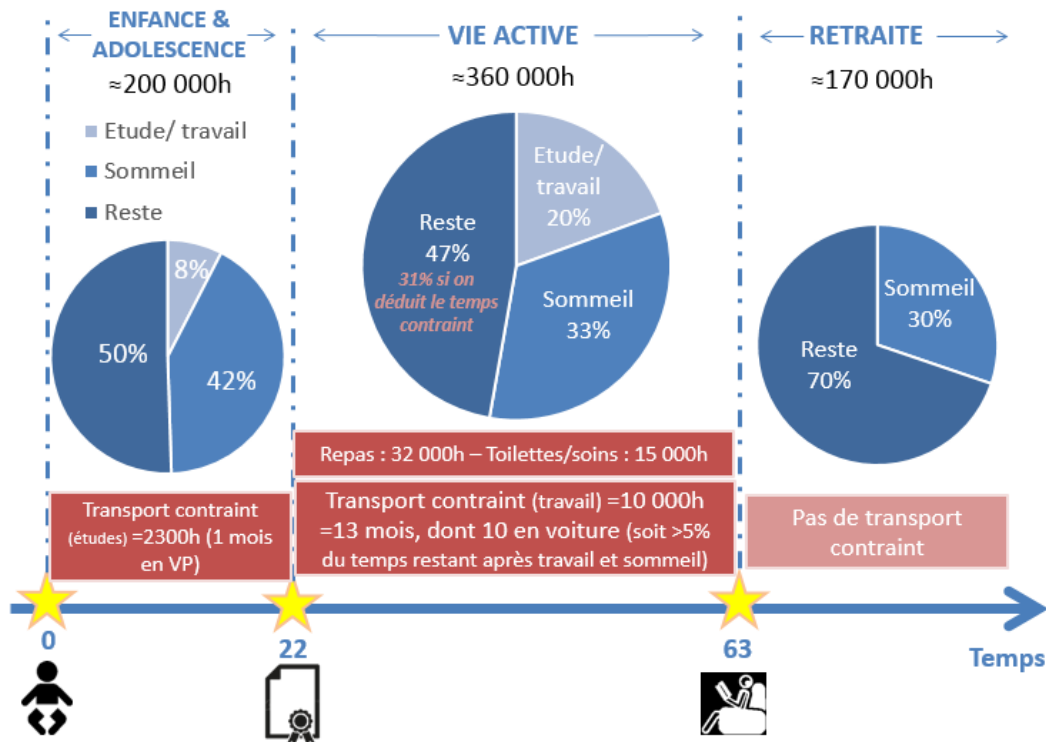
Après avoir décrit le rapport de l'individu au temps et à l'espace, nous nous intéresserons à ses appartenances collectives et aux constitutions des parties prenantes de l'entretien routier.

4.2.1.1 Diagnostic unitaire : L'individu spatial et temporel

A/ L'individu temporel

Nous commençons par ancrer l'individu dans le temps. Pour connaître les occupations d'un Français, l'Enquête Emploi Du Temps¹⁵⁴ (EDT) accessible sur l'INSEE n'est pas suffisante car elle ne s'intéresse à l'individu qu'à partir de ses 15 ans, et elle propose des statistiques ciblées sur certains types d'individus, plutôt que d'évaluer un individu français moyen afin de retracer l'itinéraire temporel de vie moyen réalisé en France. Nous avons donc reconstruit cet itinéraire en nous basant sur de nombreuses sources indiquées dans la légende de la Figure 33 et détaillées en Annexe 28.

Sur une espérance de vie moyenne – 85.4 ans pour les femmes et 79.4 ans pour les hommes en France métropolitaine en 2016 selon le site web de l'INED, un individu va schématiquement, en moyenne, utiliser son temps de la manière indiquée en Figure 33. Les hypothèses de nos calculs sont détaillées en Annexe 28.



Ce schéma met bien en évidence l'importance de la qualité du mode de transport par VP : il représente un temps de transport contraint qui se monte à 6% du temps libre –après défalcation des temps de travail et de sommeil – de l'individu actif moyen. 20% du temps contraint sur la route se produit pendant l'enfance et l'adolescence, et 80% pendant la période de vie active. Ainsi, selon l'ENTD 2008, le temps passé par semaine par les actifs pour se déplacer en courtes distances dans le cadre de leur

¹⁵⁴ <https://www.insee.fr/fr/metadonnees/source/serie/s1224>

travail s'élève à 190 millions d'heures¹⁵⁵, contre 27 millions d'heures passées par les écoliers et étudiants sur les routes.

Sur les 240 000h passées éveillées durant la période de vie active des individus, on voit l'importance du travail qui compte pour près de 30%, en dehors des temps de transport contraint qui montent ce pourcentage à 1/3 du temps éveillé exactement. Sans compter le temps de déjeuner en semaine que l'on pourrait également rattacher au temps de travail, et qui représente environ 8 000h à raison de 45min par jour 5 jours par semaine pendant 41 ans. Enfin, les soins quotidiens qui précèdent une journée de travail sont peut-être plus poussés qu'en journée de repos pour certaines catégories professionnelles.

La Figure 34 compile les données séparées sur la Figure 33 par tranche de vie et montre les temps d'occupation éveillée d'un individu français moyen sur sa vie. Il convient de noter que le temps de sommeil (32% du temps total dont dispose un individu sur sa vie en moyenne) est retranché de ces calculs. Le travail (enseignement et occupation professionnelle) occupe quasiment un tiers du temps éveillé des individus (28%), tandis que les repas et les soins (hors temps sur les tranches de retraite et enfants avant 10 ans) occupent 20% du temps éveillé. 4% du temps éveillé est contraint en transport entre domicile et lieu de travail-étude. Enfin, quasiment la moitié du temps de vie éveillé est un temps dont l'individu dispose librement.

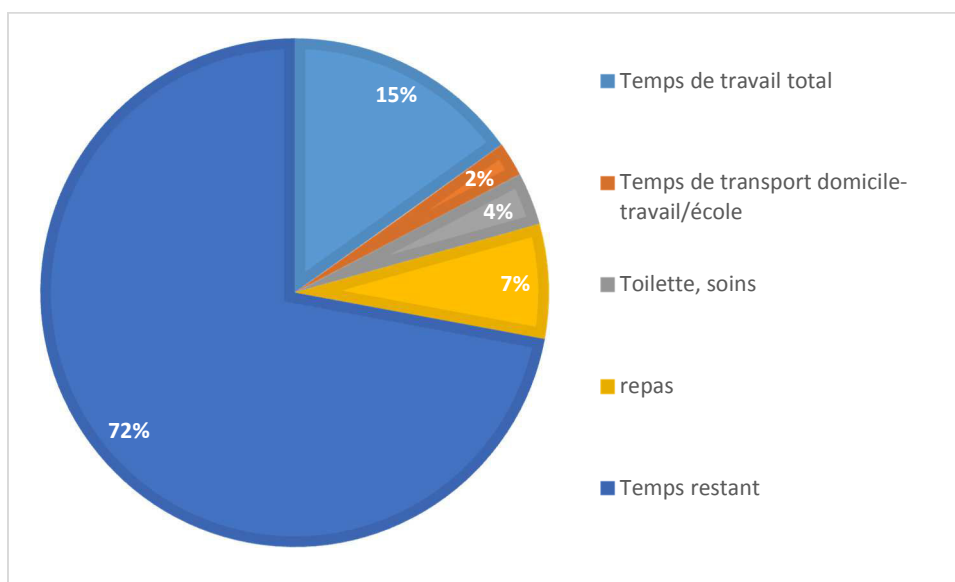


Figure 34 Part des activités sur le temps de vie éveillé d'un individu moyen

B/ L'individu spatial

Un individu va passer sa vie à réaliser des activités qui vont consommer son temps. De plus, ces activités sont spatialisées : elles se réalisent dans des lieux spécifiques, distants les uns des autres, entre lesquels il faut se déplacer. Nous avons déjà évoqué les temps de transport domicile-travail/étude, liés au temps passé en déplacement entre le lieu d'hébergement et le lieu de travail/étude, qui représentent environ 10 000 (EDT 2010) à 12 000h (ENTD 2008) sur la tranche de vie active des individus (22-62 ans). Les autres motifs de transport quant à eux représentent en moyenne

¹⁵⁵ À première vue, il semble y avoir une incohérence entre l'ENTD 2008 et l'EDT 2010. Dans la première, le temps moyen d'un aller du domicile vers le lieu de travail reste stable autour de 22-23min, avec 70% des personnes réalisant un AR ou moins et 30% deux AR ou plus, ce qui si l'on estime à 2.2 AR/j et 23 min/AR revient à environ 12 000 h/tranche d'activité. En revanche, les actifs déclarent dans l'EDT 2010 des temps de déplacement inférieurs, notamment pour les femmes. Nous approximerons à 40 min/j (lissés sur 7 jours), ce qui représente environ 10 000 h sur la tranche active de la vie.

53min par jour pour les individus de plus de 15 ans, plutôt un peu moins pour les personnes qui travaillent (entre 38 et 55min), et davantage pour les chômeurs, femmes au foyer et retraités, les extrêmes étant 38min/j pour les hommes indépendants et 1h16/j pour les chômeurs femmes. En dehors du domicile et des lieux de travail/étude, l'individu va fréquenter les lieux relatifs aux activités citées au-dessus : loisir et vacances, lieux de consommation courante, de services (santé, sport, et autres), d'association et d'autres socialisations, de culture...

4.2.1.2 Associations et interactions des individus

A/ Cellule sociale et acteurs socioéconomiques

On peut schématiser la structure socio-politique actuelle comme une articulation d'acteurs – l'individu étant souvent polyvalent, ou plutôt « polyacteur » – qui interagissent et créent le fonctionnement du système. Le cœur de la société est donc le lien social, lien que l'on peut entendre dans un sens positif de cohésion des individus qui agissent selon des règles communes vers un idéal plus ou moins commun.

Notre structure s'appuie sur un héritage politique, juridique et économique plus ou moins ancien. Certains sociologues (Iacub 2016) considèrent ainsi que notre société est encore fortement influencée par les Codes napoléoniens (début du XIXe siècle) qui avaient fixé les codes civils, commerciaux, d'instructions criminelles et pénales ; bien que ces codes aient pour la plupart été remplacés entre 1959 (Code de procédure pénale) et 2007 (part réglementaire du Code de commerce). La cellule sociale de base demeure donc encore le couple (mais par extension le ménage), responsable de la reproduction et en partie de l'éducation des enfants pour la pérennité de l'espèce.

Les individus de ces ménages sont institutionnalisés, i.e. incorporés aux normes sociales, via les unités dans lesquelles ils travaillent et qui régissent le fonctionnement socio-économique de l'ensemble des individus : les sociétés non financières et financières, les administrations publiques, les institutions à buts non lucratifs au service des ménages. Ces unités, auxquelles s'ajoutent les ménages et un secteur « reste du monde », sont les catégories d'agents classifiés dans les comptes de la Nation et qui permettent d'enregistrer les flux relatifs à l'activité économique nationale en France.

B/ Parties prenantes principales de l'entretien routier

Par la différence à l'acteur qui est celui qui joue un rôle important dans une décision ou ses résultats, présumant une contribution active dans cette affaire, nous aborderons les impacts socioéconomiques de l'entretien routier par le biais de ses parties prenantes principales, i.e. un concept élargi par rapport à l'acteur puisque la partie prenante peut être activement et passivement concernée par une décision.

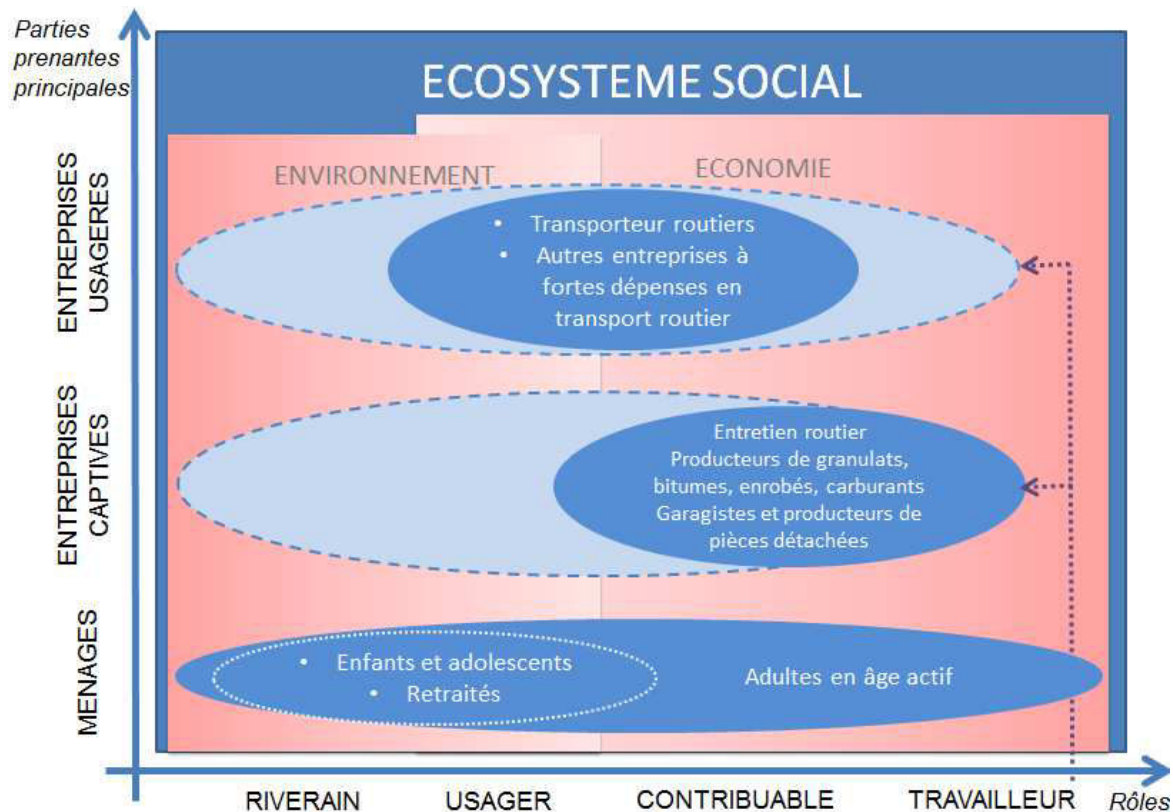


Figure 35 Parties prenantes principales de l'entretien des routes et leurs rôles (en bleu foncé : rôle le plus déterminant)

C/ Les ménages

Le système socioéconomique doit être au service des besoins des individus, et non l'inverse, d'où notre intérêt primaire pour l'individu, et son organisation en ménage. Le ménage est une partie prenante kaléidoscopique : il peut être usager de la route entretenue, riverain de la route ou des infrastructures du système de production de l'entretien routier (sur toute la supply chain des consommations du génie civil routier et des véhicules), travailleur dans le secteur des transports routiers, ou encore contribuable. Il peut ainsi être impacté de plusieurs façons par le niveau d'entretien routier : un entretien plus (ou moins) fréquent des routes peut à ce titre présenter certains aspects positifs et d'autres négatifs. Nous étudions qualitativement ces aspects plus loin.

D/ Des sociétés non financières et financières

i/ Identification des secteurs et produits concernés

L'entretien des chaussées routières nécessite d'abord des matériaux, principalement des matières premières – granulats et pétrole pour le bitume – et des matériaux secondaires – polymères, adjuvants, mais également enrobés qui nécessitent de l'énergie pour la production (électricité et autres). Ensuite, elle nécessite la mise en œuvre de ces matériaux par des machines, donc principalement du carburant pour les faire fonctionner, mais également des métaux et de l'énergie pour leur fabrication, et de la main d'œuvre, capital humain qui intervient évidemment dans la production des autres produits également.

De l'autre côté, le niveau d'entretien peut d'abord avoir un impact sur la consommation en énergie des véhicules : aujourd'hui principalement essence et diesel, peut-être de plus en plus de sources d'énergies alternatives, comme l'électricité par exemple. Il influence également l'usure des véhicules : pièces d'usure (pneus, freins, autres) et entretien en garage. Enfin, il impacte les entreprises usagères

de la route : sont concernés les transporteurs¹⁵⁶ routiers (fret, transport de voyageur), mais aussi toute société dont ce type de transport représente une part importante des dépenses (représentants de commerce, services de transport à la demande tels qu'ambulances, taxis, VTC et autres).

Tous ces secteurs sont composés de sociétés non financières.

ii/ Sociétés financières

Les sociétés financières sont également concernées, mais indirectement, par l'entretien routier. Qu'il s'agisse de banques, de fonds de pensions, de sociétés d'assurances ou autres, ces sociétés financières traitent avec les types de sociétés non financières directement ou indirectement concernées listées ci-dessus, de même qu'avec les sociétés concessionnaires d'autoroutes.

iii/ Proposition de classification sectorielle

Parmi les entreprises concernées par ces activités, nous distinguerons les secteurs dont le volume d'activité dépend fortement des politiques de fréquence d'entretien routier que l'on choisira d'appeler « secteur captif », les entreprises dont l'usage de la route est primordiale dans le modèle d'affaire que l'on regroupera sous le nom de « secteur usager », et celles qui nous semblent secondaires que l'on appellera « secteur marginal ». Nous détaillons ces secteurs par la suite.

Nous choisissons le terme de « secteur captif » et « entreprises captives » en référence à l'expression « marché captif » qui désigne un ensemble de consommateurs n'ayant pas ou peu d'alternatives d'achats d'un produit ou service considéré. Dans notre cas, les entreprises des secteurs dits captifs présentent des volumes d'activités dépendants de manière non négligeable à la fréquence d'entretien de la route.

E/ Environnement

Les effets écologiques et plus largement environnementaux (i.e. ne touchant pas que les écosystèmes mais aussi plus directement l'homme) dont nous avons déjà parlé en 2 – Système géophysique terrestre et 3 – Système écologique, présentent également des effets socioéconomiques. En effet, tout effet touchant l'environnement humain va affecter les modes de vie. Certains effets environnementaux touchent directement l'humain (e.g. pollution de l'air), quand d'autres effets sont indirects (e.g. changement climatique). Nous décrirons en quelle mesure les impacts écologiques et environnementaux impactent l'humain dans la partie 4.2 – Impacts socioéconomiques de l'entretien routier.

4.2.2 Impacts par partie prenante

4.2.2.1 Usagers

L'usager est affecté à plusieurs égards par le niveau d'entretien des routes. En effet, l'état de l'infrastructure a un effet direct sur la qualité de l'offre de mobilité, que l'on peut estimer par exemple par un calcul de coût du temps généralisé. En mobilité routière, certains facteurs de qualité de service sont directement calculés par rapport à des caractéristiques d'état surfacique de la chaussée, et dépendent donc directement de la fréquence de resurfaçage, mais aussi de la qualité de conception de la couche de roulement et de mise en œuvre. Finalement, les coûts aux usagers de la route sont nombreux, et embrassent des dépenses liées aux véhicules, des coûts de temps passés, de sécurité, de confort, et enfin d'environnement. Nous aborderons tous ces sujets à l'exception des impacts

¹⁵⁶ Un transporteur est une personne ou une société qui garantit l'acheminement dans un lieu donné des personnes, des produits ou des marchandises, à l'aide de véhicules, de navire, de train, d'avion ou de matériels spécifiques

environnementaux dont les impacts – pollutions sonore et des milieux (air, eau, sol) – nous semblent majoritaires pour les riverains et qui seront donc traités dans la partie qui leur est dévolue (4.2.2.2 – Riverain), des impacts sur le confort et sur la sécurité. Ces derniers impacts ont été évacués de notre problématique par manque de connaissances systématiques sur le sujet, bien que des valeurs tutélaires relatives aux accidents soient proposés pour les calculs coûts-bénéfices français (voir Annexe 38). Particulièrement, les problèmes de sécurité routière sont fondamentalement multifactoriels et probablement assez peu liés à l'entretien des routes aujourd'hui en France.

A/ Coûts véhiculaires

L'entretien routier va impacter l'économie de l'utilisateur. Nous donnons ici quelques jalons quantitatifs en plus d'une approche qualitative.

i/ Coût de possession

Coûts de possession des Voitures Particulières

En économie, on appelle coût de possession (Total Cost of Ownership ou TCO en anglais) l'ensemble des frais se rapportant à la détention des stocks. Dans le cas d'un véhicule routier, ce coût inclut donc le prix d'achat du véhicule, les frais financiers éventuels (crédit, coût d'opportunité, location), la valeur prévisible de revente, la consommation du véhicule, les coûts d'entretiens et les coûts d'assurance. On l'appelle aussi « coût d'exploitation » ou « coût d'usage ».

Le transport, et particulièrement l'automobile, est un poste de dépense important des ménages français : environ 10% rien que pour la voiture (Visse 2013) – répartis à plus de 2/3 en dépenses d'utilisation de la voiture et un petit tiers en achat du dit véhicule (MEDDE 2014b) (voir aussi Annexe 30) – pour une quinzaine de pourcents pour tout le transport (MEDDE 2014b). Rappelons que 9/10^{ème} du transport de passager s'effectue par la route, dont la majeure partie en VP.

Nous n'avons pas trouvé de coût kilométrique VP moyen pour le parc roulant français. L'argus propose chaque année une liste de PRK de véhicules, mais de véhicules relativement récents qui ne sont pas représentatifs du parc. Ces PRK sont tous compris en 2017 dans la gamme 0.48-4.95 €/km. Nous avons donc décidé de faire le calcul par nous-même. Calculer un coût de possession moyen par kilomètre des VP français n'est pas évident et peut se faire par plusieurs méthodes. Nous en présentons trois, ainsi que des résultats associés.

Il est possible de consulter les barèmes kilométriques par classe de distance parcourue¹⁵⁷ et puissance fiscale des véhicules, et, à l'aide de la composition du parc en puissance proposée par la CCFA¹⁵⁸ calculer un PRK pondéré : ce calcul donne, avec le barème kilométrique 2017 et la structure du parc 2012, un PRK de 0.45 €/km. Néanmoins, parc et barème sont anachroniques, et le résultat est largement approché (Postes inclus dans les barèmes, moyenne des coûts sur distances parcourus moyennes et classe de puissance unique de 1 à 5 chevaux fiscaux).

La deuxième option, adoptée par un bureau d'étude français (ADETEC Déplacements 2012) consiste à utiliser les statistiques de coûts individuels moyens de la voiture en France diffusés par l'INSEE (4350 €/an), probablement de diviser ce coût par un kilométrage moyen (non spécifié dans le rapport) et de ventiler ce coût kilométrique par poste de dépense (INSEE) : 32% de carburant et lubrifiant, 26% de décote, 21% de pièces et accessoires, 14% d'entretien et réparations, 4% d'assurance et 3% de péages

¹⁵⁷ <https://impots.dispofi.fr/bareme-kilometrique/bareme-2017>

¹⁵⁸ <http://www.fiches-auto.fr/articles-auto/l-auto-en-chiffres/s-1208-repartition-du-parc-auto-par-puissance.php>

et stationnement en 2012. Les analystes avancent ainsi un coût moyen de l'automobile française de 0.34 €/km et des coûts par poste pour 2012.

La méthode de cette dernière option n'étant pas bien expliquée dans le rapport, nous avons décidé de vérifier ces coûts en utilisant des coûts nationaux : la dépense nationale des ménages pour l'automobile – 124 milliards €2010 en 2013¹⁵⁹ – est divisée par les 733.8 milliards de voyageurs.kilomètres effectués en VP françaises en 2013 (CGDD 2015) multiplié par le taux d'occupation pondéré des VP qui était égal à 1.58 en 2013 (CGDD 2016b). Cela nous fournit un PRK de 0.27 €/km en 2013. Ensuite, nous ventilons ce coût selon les parts de dépenses annoncées par l'INSEE pour 2013. Nous synthétisons l'ensemble des coûts obtenus dans le Tableau 12. Le PRK calculé est plus faible de 20% que celui calculé par l'ADETEC pour 2012, le coût kilométrique d'entretien calculé est plus faible de 40%, et le coût en carburant calculé est plus faible de presque 30%. Cependant, la méthode ADETEC n'étant pas bien explicitée, nous considérons nos chiffres comme plus fiables.

Tableau 12 Prix de Revient Kilométrique et coût kilométrique par poste pour une VP française moyenne

PRK	0.2670	€/km
Carburant	0.0801	€/km
Acquisition	0.0748	€/km
Entretien (pneu et R&M)	0.0721	€/km
<i>Pièces détachées</i>	0.0441	€/km
<i>Services d'entretien</i>	0.0254	€/km
<i>Contrôle technique</i>	0.0021	€/km

Afin de croiser nos chiffres, nous les avons comparés avec les coûts de VP d'entreprises (OVE 2017). Néanmoins, les caractéristiques du VP du parc roulant moyen et du VP d'entreprise sont bien différentes (âge, kilométrage annuel, structure du parc), et cela entraîne des distorsions de coûts comme de ventilation par poste. Nous présentons tout de même ces chiffres dans le Tableau 13. Notons que le coût kilométrique total du VP d'entreprise pour 2016 est égal à celui avancé par l'Adetec pour 2012.

Tableau 13 quelques caractéristiques et coûts kilométriques des VP moyens et VP d'entreprises

Caractéristiques	VP moyen	VP entreprise (2016)
Distance parcourue (km/an.veh)	12 700	20 000
Consommation (L/100km)	7	?
Coût carburant (€/km)	0.080	0.039
Coût pneumatique (€/km)	0.018	0.010
Coût R&M (€/km)	0.054	0.031
Coût total (€/km)	0.267	0.340

Encore dans un souci de croiser les valeurs obtenues dans nos calculs, nous avons exploité des données de coûts d'entretien du site [entretien-auto.com](http://www.entretien-auto.com)¹⁶⁰ qui répertorie les coûts d'entretien de 10 513 automobiles représentant 2 787 modèles, sur 80 201 factures. Nous n'avons pas vérifié la qualité de l'échantillonnage de cette base. En calculant une moyenne des coûts d'entretien moyens au kilomètre pondérée par la population de chaque modèle, on obtient un coût moyen de 0.025 €/km. Ces coûts incluent 511 types d'altérations élémentaires. Il correspond tout à fait au coût que nous avons calculé en services d'entretien, mais pas du tout au coût global de l'entretien.

Au sein du poste de dépense automobile des ménages (hors décote), la part des composantes des coûts a évolué lors des 50 dernières années (Annexe 29). Alors qu'en 1960, la composante majoritaire

¹⁵⁹ INSEE 2014 : <https://www.insee.fr/fr/statistiques/1281339#titre-bloc-12>

¹⁶⁰ https://www.entretien-auto.com/statistiques_membres.php

était le carburant (40%) suivi par l'acquisition (30%), l'entretien (23%) et le reste (5%), en 2013, les parts relatives aux trois premiers postes ont convergé autour de 27%, avec une part croissante des autres dépenses (15%). Ces autres dépenses regroupent les coûts de péages, de stationnement, et d'assurance.

Selon l'INSEE (2014), en 2013, la seule dépense des ménages pour l'entretien de leurs véhicules s'élève à 33 milliards. Ce chiffre augmente d'environ 3% chaque année, la cause serait « une spécialisation accrue de la main-d'œuvre et [de] la complexité des réparations liée à l'électronique embarquée ». Selon l'Observatoire du Véhicule d'Entreprise, les coûts seraient dépendants de la conception du véhicule, de la qualité de ses composants, et de son âge (OVE 2017). Toujours selon l'INSEE, les ménages auraient acquis en volume moins de pièces détachées (-2.3%/an) telles que les batteries (-6.1%/an), mais davantage de pneumatiques (+1.9%/an). Les services d'entretien baissent en volume (-4%/an) probablement du fait du renouvellement du parc encouragé par la prime à la casse, mais augmentent au niveau de la facture au forfait, comme le montre également l'Annexe 31. Il est étonnant de voir que malgré une augmentation très forte des prix des carburants – +95% entre 1982 et 2012 – les dépenses en carburants et lubrifiants des ménages tendent globalement à baisser dans leur budget global : de 2.9% en 1990 à 2.6% en 2010 (Annexe 32). Il faudrait tout de même regarder plus finement ces parts de dépenses notamment du fait de la crise de 2008. Après le carburant, c'est le prix des réparations (+77%) et de l'entretien (+50%) suivi du prix des pièces détachées et accessoires (+39%) qui ont le plus augmenté entre 1982 et 2012, au-dessus de l'inflation globale observées sur cette période (26%), tandis que l'évolution des prix des automobiles neuves (+14%), des occasions (+10%) et des assurances automobile (+8%) est restée en-deçà de l'inflation.

Coûts de possession des VUL

Les 5.8 millions de VUL sont possédés à 60% par des professionnels et à 40% par des particuliers. Les coûts kilométriques sont différents selon la catégorie d'utilisateurs considérée, car les professionnels possèdent des VUL plus récents qui parcourent davantage de distance annuelle. En effet, quand les VUL de professionnels parcourent 18 200 km par an, les VUL de particuliers en parcourent 10 000, et l'âge moyen des premiers est de 6.6 ans quand celui des seconds est de 19.4 ans. D'où un PRK probablement plus faible pour les premiers que pour les seconds, du fait de l'amortissement plus rapide des coûts fixes avec l'augmentation de la distance parcourue, de l'augmentation des frais d'entretien avec l'âge, et des économies d'échelles potentiellement réalisées par les compagnies à gestion de flottes importantes, à contrebalancer tout de même avec dépréciation plus rapide du véhicule dans ses premières années.

Les VUL restent assez peu étudiés en France. Faute d'autres données, nous présenterons d'abord les coûts kilométriques des VUL d'entreprises. La méthode de calcul de ces coûts est la suivante : le PRK est issu de l'OVE 2017, qui informe également de la structure moyenne de ce coût, dont un poste « assurance-R&M-pneumatique ». Nous utilisons ensuite un prorata relatif à l'utilisation des VP en entreprises entre assurance, R&M et pneumatiques (OVE 2017), à défaut de connaître la répartition de ces coûts pour les VUL. Nous aboutissons aux coûts du Tableau 14. Le kilométrage annuel moyen indiqué est celui toute classe de VUL confondue en France, de même que la consommation moyenne (CGDD 2012).

Tableau 14 Caractéristiques et coût d'utilisation des VUL professionnels en France

Kilométrage (km/an.veh)	Consommation (L/100km)	Coût Énergie (€/km)	Coût pneu (€/km)	Coût R&M (€/km)	Coût total (€/km)
14 900	8	0.0460	0.00930	0.0277	0.254

Nous avons vu dans notre étude des coûts des VP que les VP des particuliers coûtaient plus ou moins cher selon les postes que ceux des flottes d'entreprises : +103% en carburant, +76% en R&M (pneus et autres), mais -21% au global. Nous considérerons que ces ratios s'appliquent également aux VUL. En considérant un prorata de flotte française à 60% entreprise et 40% particulier, nous obtenons alors les coûts véhiculaires du Tableau 15.

Tableau 15 Caractéristiques et coût d'utilisation des différents VUL en France

CARACTERISTIQUES	CARBURANT (€/KM)	PNEUS (€/KM)	R&M (€/KM)	COUT TOTAL (€/KM)
VUL PRO	0.046	0.009	0.028	0.254
VUL PARTICULIER	0.094	0.008	0.049	0.199
FLOTTE MOYENNE	0.065	0.009	0.036	0.232

Coûts de possession Poids Lourds

Le Centre National Routier (CNR) publie des indices pour trois catégories de PL : les PL 40T en longue distance, en régional, et les plus petits PL (3.5 à 19t) en transport régional appelés « régional porteurs ». Ces indices représentent l'évolution des coûts du transport routier de marchandises diverses. Nous avons tracé les évolutions d'une sélection d'indices depuis leur création en 2000 et jusqu'à 2016 en Annexe 33. Les grandes tendances sont les suivantes : Un indice gazole particulièrement volatil (en rouge), de 70 cents en 2000 à 1.06€ en 2017 (CNR 2017) ; Les autres indices augmentent plus linéairement, notamment les indices de maintenance (orange) : augmentation constante jusqu'à 2011 où elle se réduit fortement, jusqu'à 2013 où l'indice commence à décroître doucement ; croissance linéaire de 1.3% (coefficient de corrélation $R^2=0.94$) ; et d'infrastructure (beige) : saut d'augmentation notable lors de la crise de 2008 et reprise d'une croissance constante en 2010 ; croissance linéaire de 1.1% (coefficient de corrélation $R^2=0.96$) ; des indices globaux (en verts) en longue distance (LD) comme en régional (REG), en gros chargeurs (40t) comme en petits porteurs volatiles du fait de l'importance des dépenses de carburant dans l'indice global, ce que l'on voit si l'on regarde les variations des indices hors gazole (en bleus et gris) qui sont plutôt linéaires (pente de l'ordre de +0.7%, $R^2=0.89$).

Les coûts d'exploitation des PLF se décomposent en coûts d'exploitation du véhicule et coûts de personnel de conduite. Les premiers incluent des coûts fixes (achat du véhicule, taxe à l'essieu, assurance, coûts de structure, etc.) et des coûts variables (selon intensité d'exploitation kilométrique : carburant, entretien, coûts d'infrastructure). Les seconds se composent du salaire, des cotisations, et des indemnités de déplacement.

En France en 2017, ces coûts globaux étaient de l'ordre de 0.482 €/km ou 162.44 €/j en PL 40t LD, 0.48 €/km et 166.02 €/j en PL 40T REG, et 0.349 €/km et 186.05 €/j en régional porteurs. Le Tableau 16 présente quelques caractéristiques techniques, de personnel et de coûts du transport de marchandise du pavillon français.

Tableau 16 Caractéristiques et coûts d'exploitation des PL en France (données CNR, février 2017)

Caractéristiques	PL 40t LD	PL 40T REG	Régional Porteurs
Distance parcourue (km/an.veh)	113 280	90 600	74 000
Exploitation (j/an)	229	236	220
Vitesse moyenne (km/h)	67	60	59
Taux de parcours en charge (%)	87	82	80
Capacité de chargement (t)	25.7	25.6	11
Taux de chargement en charge (%)	89	85	95
Attente chargement- déchargement (h)	3	2.34	2
Durée de conservation du véhicule moteur (an)	6.3 (tracteur) 11.4 (remorque)	7.1 (tracteur) 12.6 (remorque)	6.2
Consommation moyenne (L/100km)	32.0	32.7	25.0
Coût carburant (€/km)	0.29	0.30	0.23
Coût pneumatique (€/km)	0.028	0.03	0.024
Coût R&M (€/km)	0.076	0.089	0.095
Coût terme conducteur (€/j)	22.86 (14.17 hors charges)	19.61 (13.69)	18.22 (14.4)
Coût détention véhicule (€/j)	51.42 (tracteur) 13.39 (remorque)	50.29 (tracteur) 14.02 (remorque)	53.37

Nous avons étudié la répartition du coût total d'exploitation des PL 40t longue distance (respectivement régional/régional porteur i.e. 3.5 à 19t) selon les statistiques du CNR¹⁶¹ de 2016 (Annexe 34). Ils se composent de 29% (32%/41%) de coûts de conducteur : rémunérations + cotisations employeurs. 23% (21%/16%) sont liés au gazole professionnel : coût du carburant, hors Taxe sur la Valeur Ajoutée (TVA), tenant compte des différents modes d'approvisionnement (pompe et cuve) et du remboursement partiel de la Taxe Intérieure de Consommation sur les Produits Énergétiques (TICPE). Ils comptent également 14% (16%/14%) de charges de structures : charges de structure + autres coûts indirects de gestion. 12% (14%/22%) des coûts sont liés à l'amortissement (appelé coût matériel, i.e. coûts de détention de matériel roulant (renouvellement + financement). 8% (8%/8%) sont attribués à la maintenance : 2.2% en pneumatiques + 6.1% en réparation et maintenance (R&M). 7% (3%/0%) sont dédiés aux frais de déplacement. 7% (5%/0%) servent à financer l'utilisation des infrastructures : taxe à l'essieu + péages. Les coûts de conducteur sont les plus importants quel que soit le type de fret considéré, suivi par les coûts carburant et de structure. L'amortissement est d'autant plus important que le véhicule roule peu à l'année (cf. Tableau 16). Les coûts de maintenance ont des parts identiques quel que soit le type de fret, bien qu'au kilomètre ils soient différents (cf. Tableau 16).

Synthèse des caractéristiques et coûts kilométriques par grands types de véhicules

Nous venons d'analyser les coûts de possession, leurs structures et leurs évolutions, pour trois types de véhicules routiers : VP, VUL, et PL. Le Tableau 17 synthétise ces caractéristiques et ces coûts moyens par types.

¹⁶¹ <http://www.cnr.fr/fr/Indices-Statistiques/Longue-distance-40T#haut>

Tableau 17 caractéristiques et coûts kilométriques par grands types de véhicules

Caractéristiques	VP (2013 : INSEE, CGDD)	PL régional porteur	PL 40t LD	PL 40T REG
D (km/an.veh)	12 700	74 000	113 280	90 600
Consommation (L/100km)	7	25	32	32.7
Coût carburant (€/km)	0.080	0.23	0.29	0.3
Coût pneumatique (€/km)	0.018	0.024	0.028	0.03
Coût R&M (€/km)	0.054	0.095	0.076	0.089
Coût total (€/km)	0.267	0.334	0.463	0.46

ii. **Impact de l'état de surface sur ces coûts**

S'il n'est pas évident que la longévité kilométrique globale d'un véhicule soit affectée par l'état de la route, cela pourrait néanmoins être le cas sur des infrastructures trop dégradées par rapport aux niveaux prévus en conception du véhicule, par exemple dans les pays en développement.

Il a été montré que le besoin de remplacement des pièces d'usure (pneumatiques, freins) ainsi que la consommation des fluides (carburant ou autre énergie de traction, huile moteur) étaient liées à l'état de surface de la route. Une route dégradée peut aussi provoquer des bris de marchandises en transport de fret, comme cela a été montré par plusieurs études (par exemple, modèle de Zaabar et Chatti (2012)), toutefois nous ne détaillerons pas davantage cet impact.

Carburant

Selon une étude de Zaabar et Chatti (2012), une augmentation d'IRI de 1 m/km augmente la consommation des VL de 2% quelle que soit la vitesse, et celle des PL de 1% à 96 km/h et 2% à 56 km/h (voir graphique en Annexe 35). En revanche, la PMP (en anglais MPD = Mean Profile Depth) et le type de chaussée se sont révélés comme n'ayant aucun effet sur les VL. Ils en ont en revanche pour les PL. En effet, une augmentation de la PMP d'1mm augmente la consommation de 1.5% à 88 km/h et 2% à 56 km/h. De plus, des tests américains ont révélé des consommations des PL supérieures de 4% sur chaussées aux liants hydrocarbonés comparées aux chaussées en BAC à 56 km/h en été. En revanche, à plus grandes vitesses, le différentiel relatif au type de chaussée a été considéré comme statistiquement non significatif par les auteurs : nous ne considérerons donc pas cette différence puisque les vitesses interurbaines sont supérieures à ce seuil.

Notons que, dans les hypothèses de Zaabar et Chatti (2010), les effets aux différentes longueurs d'onde sont considérés indépendants, donc cumulatifs.

En 2013, la circulation routière sur le réseau français représentait 567 Mds de v.km, dont 15% sur RNC, 19% sur RNc et 66% sur RD et RC. 420 Mds de v.km est réalisé en VL, 27 Mds en PLF et 3.6 Mds en autres PL (bus et autocars). Aujourd'hui, il est difficile d'avoir une idée des niveaux d'IRI des réseaux routiers français car ce n'est pas un indicateur utilisé en France. On relève des textures à différents niveaux, à l'exception de la mégatexture (Bitelli et al. 2012). Cependant, le niveau d'IRI des autoroutes serait très bon (environ de 1.2), et le RD présenterait peut-être une moyenne d'IRI de 3 (en se basant sur des données du projet MIRANDA dont nous reparlerons). Nous proposons de réaliser une rapide estimation en considérant (Pinet et D'Aubreby 2015) les seuls RD et RC, ayant un niveau d'IRI de 3 qu'il serait possible d'abaisser à 1.5 en moyenne avec un entretien fréquent, 66% de 420Mds v.km consommant 7 L/100km, 66% de 30 Mds v.km consommant 30 L/100km, et une réduction de consommation entre un IRI de 3 et un IRI de 1.5 de 3% pour les VL et 1.5% pour les PL. Selon ces

hypothèses, une économie potentielle annuelle en carburant de 580 millions de litres pour les VL et 15 millions pour les PL, soit presque 600 000 m³ de fuel, dans le cas où l'état de surface du réseau serait globalement représenté par celui d'un RD. Dans la mesure où deux tiers des v.km sont réalisés en France sur le RD et RC (ce dernier potentiellement en moins bon état que le RD), et le reste sur RA et RNnc, l'effet pourrait même être plus important. Cet effet positif devra néanmoins être comparé aux dépenses engendrées par une fréquence de resurfacement accrue du million de kilomètres de RC et RD. Par comparaison, selon planetoscope¹⁶², la consommation française en pétrole se monterait à 115 Mds de litres par an. Cette économie de carburant, estimée à 0.5% de la consommation nationale, ne serait donc pas en mesure de changer substantiellement le volume de consommation française tous secteurs confondus si l'on maintient des niveaux d'IRI corrects. En revanche, on pourra calculer plus spécifiquement les pertes ou gains relatifs à des changements drastiques de stratégies d'entretien (coupe forte des budgets ou au contraire injection de fonds importante), en dehors de l'effet sur la durée de vie résiduelle qui est, rappelons-le, hors périmètre.

Entretien véhiculaire

Les modèles génériques de la Banque Mondiale décrivent un lien entre IRI et consommation de pneumatiques d'une part, coût de réparation et de maintenance d'autre part.

Simple régressions entre IRI et coûts, ils ont été calés dans les conditions américaines. Les courbes principales d'évolution de coûts en fonction de l'IRI sont présentées en Annexe 36. Elles montrent que la sensibilité à l'IRI dépend à la fois de la vitesse et du type de véhicule. L'IRI n'a pas d'effet sur les coûts d'entretien et de maintenance en deçà de 3 m/km. Au-delà, sur la plage d'IRI de 3 à 6 m/km, les coûts augmentent rapidement, d'autant plus pour les véhicules sportifs (SUV ?) et les camions légers – environ +20% à IRI de 4, +70% à IRI de 5, et +130% à IRI de 6 – que pour les PL articulés et les VL (VP et VUL) – respectivement environ +20%, 40% et 70%.

L'usure pneumatique va dépendre de l'interaction physique entre gomme et chaussée, donc à la fois de l'état de surface aux petites longueurs d'onde (microtexture particulièrement, et macrotecture) et d'autres facteurs que l'on a explicités dans le chapitre 1. La combinaison des facteurs implique qu'il faille un modèle calé avec des mesures de terrain, correspondant à la fois à la réalité des réseaux étudiés et éventuellement à la nature du pneumatique et des conducteurs du pays.

Zaabar et Chatti (2010) ont montré que l'usure pneumatique est une fonction croissante de l'IRI, mais également de la vitesse. Plus la vitesse est importante, plus l'effet de l'IRI sera donc important. Ce modèle dépend de la température et de la pente (respectivement 17°C et 0% sur l'Annexe 37). Une diminution d'IRI d'1m/km aura pour effet de diminuer l'usure pneumatique d'1% pour les VP (Annexe 37).

Les dépenses en transport routier représentent une dizaine de pourcents du budget des ménages en France, et environ 4500€ par ménage dont 32% de dépenses carburant et 14% d'entretien-réparation, soit presque 50% des coûts de possession. Côté transporteurs, sur la base du coût de possession total au kilomètre, soit de l'ordre de 0.35€/km (PL 40t Régional) à 0.48 €/km (longue distance), les coûts en carburant, en pneumatiques et en entretien se montent de 24 à 31% des coûts totaux (incluant coût du conducteur, d'amortissement du véhicule, de structure, etc.). Un état de surface de la route simplement dégradé (par exemple +1 m/km d'IRI), ou encore pire mauvais (IRI > 5 m/km), peut faire varier ces coûts de 1 à 130% selon la catégorie des coûts considérés. L'état de la route peut donc avoir un effet non négligeable sur les dépenses des usagers de la route en termes de consommation carburant (jusqu'à 10% selon les modèles), de dépenses en entretien et changement des pneumatiques.

¹⁶² <http://www.planetoscope.com/petrole/1480-consommation-de-petrole-en-france.html>

B/ Consommation de temps

i/ Variation des temps de parcours

Échelle individuelle : approche microscopique

Le temps passé dans un véhicule routier pour réaliser un trajet donné dépend de la vitesse pratiquée par le conducteur. Il dépend donc de la vitesse maximale qu'il est confortable et/ou sécuritaire (selon le conducteur) de pratiquer, et qui peut être inférieure aux limites de vitesse légales, impliquant une augmentation du temps passé sur la route. Cette vitesse dépend du conducteur (pratiques, perception du risque, etc.), des conditions climatiques (pluie, brouillard, neige...), et de visibilité, mais également de l'état de la route, facteur que l'on n'a pas l'habitude de considérer en France dans les conditions routières actuelles. En effet, trop de dégradations surfaciques (orniérage ou nids de poule particulièrement) impliquent de réduire la vitesse de conduite pour des questions de maniabilité, de sécurité et de confort. Cela implique donc une perte de temps pour chaque individu empruntant la route dégradée, forçant le conducteur à réduire sa vitesse moyenne de déplacement.

HDM-4 propose un sous-modèle de vitesse pour les modes routiers motorisés, et un autre pour les modes non motorisés. Les facteurs liés à l'entretien routier pouvant limiter la vitesse des modes motorisés sont la résistance au roulement, la PMP et l'IRI¹⁶³. Pour les modes non motorisés, le modèle de vitesse tient compte de 3 types de limitation. La vitesse maximale dépend de la plus petite des trois limitations. Ces trois limitations sont respectivement la « vitesse désirée », la « vitesse de rugosité », et la « vitesse de pente »¹⁶⁴.

En dehors de cette étude, d'autres études avancent des éléments sur les liens entre perte de vitesse et IRI. Wilde et al. (2001) proposent un facteur d'ajustement S^{165} à multiplier à la vitesse. Yu et Lu (2014) avancent une décroissance linéaire de 0.84 km/h pour une augmentation d'1 m/km de l'IRI. Néanmoins, Santos (2015) suggère que l'utilisation des systèmes de régulation de vitesse automatique pourrait annihiler en majeure partie ces effets, d'autant qu'ils tendent à se généraliser, ce qui pourrait justifier de ne pas tenir compte de cet effet.

Capacité : approche macroscopique

Comme on l'a expliqué au chapitre 1, la capacité d'une infrastructure est égale au débit maximal qu'elle peut écouler, dépendant lui-même de divers facteurs dont la vitesse des véhicules. Si l'on dégrade la vitesse maximale praticable sur une infrastructure, on augmente le temps passé par les usagers sur l'infrastructure, tout en augmentant l'écoulement de véhicule, donc l'utilité fonctionnelle quantitative. Jusqu'à atteinte de la capacité, il y a donc deux effets antinomiques et concomitants pour l'usager : augmentation de l'offre et réduction de la vitesse praticable (i.e. le flux converge vers la vitesse des véhicules les plus lents). Si la demande excède l'offre (quand on dépasse la capacité), les usagers doivent soit reporter leur déplacement, soit trouver un itinéraire de substitution, le plus souvent en perdant du temps. De plus, le niveau de service dépend du pourcentage de la capacité qui est atteint : si le nombre de véhicule dépasse 100% de la capacité, il y a congestion, et perte de temps accrue. On peut ensuite aller plus loin et évoquer l'impact de la fréquentation sur les investissements de transport dans le cas de politiques de transport « bottom up », bien que les politiques top down soient peut-être

¹⁶³ $CR_2 = Kcr_2 * (CR_{CR2_a0} + CR_{CR2_a1} * TD_{av} + CR_{CR2_a2} * RI_{av})$, avec Kcr_2 le facteur de résistance au roulement, TD_{av} la moyenne de la PMP, et RI_{av} la moyenne de l'IRI

¹⁶⁴ Traductions françaises discutables

¹⁶⁵ $S = 4.3065 \exp[(0.52 - 0.26IRI)^{0.0928}]$

à privilégier si l'on veut modifier les comportements : quand on réduit la qualité de service du routier en ville, en piétonnant des voies (exemple : quais de Seine), ou en réduisant les voies de circulation (exemple : passage de 2x2 voies à 2x1 voies sur les boulevards des Maréchaux à Paris afin d'insérer un tramway). Chandra (2004) avance une perte de capacité, pour les autoroutes, d'environ 150 UVP/h.voie par incrément unitaire d'IRI.

Lorsque l'on souhaite évaluer les impacts de l'entretien routier, une question immédiate est l'impact de la phase chantier, du fait de la forte gêne ressentie par les usagers ou les riverains, ou du moins le fort mécontentement témoigné. En effet, l'entretien de la voirie nécessite soit une réduction de capacité – réduction de voie avec éventuel alternat – soit fermeture complète avec mise en place d'un itinéraire alternatif (déviation). Il existe deux approches pour simuler cette gêne : macroscopique et microscopique. Souvent, les travaux sont réalisés de manière à minimiser cette gêne, par exemple en réalisant les travaux la nuit si possible.

ii/ Temps passé pour les consommations véhiculaires

Compte tenu du fait que l'état de surface de la chaussée influe sur l'intensité de consommations véhiculaires en énergie de traction, pneumatiques et suspensions, ces consommations influencent à leur tour le temps passé par les usagers de la route pour réaliser l'entretien des véhicules ou faire le plein de carburant. Indirectement, ces actions nécessitent de se rendre à la pompe à essence ou au garage, ce qui génère du trafic sur les routes d'accès à ces lieux, et augmente potentiellement une congestion en ajoutant des véhicules sur la route. Cette considération semble tout à fait originale et nous n'avons pas trouvé de ressources bibliographiques traitant de cette question.

iii/ Monétarisation

Les coûts en temps passé sont monétarisés par type d'usager en fonction de leur valeur du temps propre. En France, la méthode d'évaluation socio-économique utilisée par le MEDDE pour l'évaluation des projets d'investissement de transport a retenu des valeurs du temps qui dépendent du motif de déplacement¹⁶⁶, de l'urbanisation (urbain/interurbain), et du mode de transport¹⁶⁷ que l'on rappelle en Annexe 39 (Quinet et al. 2013). Pour le transport de marchandises, on va différencier plusieurs valeurs du temps pour les transporteurs, selon le type de marchandises : marchandises à forte valeur ajoutée (> 35 000 €/t), marchandises courantes (entre 6 000 et 35 000 €/t) et marchandises à faible valeur ajoutée : < 6 000 €/t (vrac, granulats). Ces valeurs du temps proposées par la commission Quinet sont rappelées en Annexe 40.

4.2.2.2 Riverain

Un riverain est un individu qui habite, et par extension qui se situe, près d'un site ou d'une infrastructure. Le riverain ici fait donc référence à la personne voisine de l'infrastructure routière ou des infrastructures du système de production impacté par l'entretien routier. Sa proximité en fait le récepteur d'un certain nombre d'émissions locales, telles qu'émissions polluantes et sonores générées par le trafic et les activités de production. On différenciera le riverain (à proximité de tout site de production du système d'entretien routier) du riverain routier, sous catégorie de la première et qui se localise près de l'infrastructure routière.

¹⁶⁶ Elles augmentent avec les contraintes pesant sur le motif de déplacement (= plus élevées pour les motifs professionnels que pour les motifs loisir)

¹⁶⁷ Question de confort et de mise à profit du temps par exemple en ferroviaire

A/ Pollution

La pollution est la présence ou l'introduction dans l'environnement de substances à effets nuisibles ou toxiques. Le système routier émet des polluants dans l'environnement. L'entretien des routes va impacter les émissions polluantes du système de transport routier à deux niveaux. D'abord, l'opération de resurfaçage des chaussées génère des émissions sur tout son cycle de vie : extraction des matières premières et transformations en usines, par exemple en centrale d'enrobage, transport et mise en œuvre (affecte davantage les ouvriers de chantier que les riverains par exposition directe), fin de vie (problème particulier d'amiante dans les anciens matériaux routiers). Ensuite, l'intensité de resurfaçage va impliquer plus ou moins de consommation des véhicules (voir 4.2.1). Or les émissions d'un véhicule dépendent de sa consommation (et de ses niveaux d'émissions). Ces émissions ont des effets sur la santé des riverains qui y sont exposés. Nous détaillons ici les principaux polluants et leurs effets sur l'homme.

Plusieurs types de polluants sont connus pour leur nocivité. Quatre sont surveillés et cartographiés dans les grandes villes, et d'autres sont réglementés à la source par des normes d'émissions : normes Euro des véhicules, normes d'émissions de l'industrie.

Quatre polluants gazeux sont sous surveillance dans les agglomérations de plus de 100 000 habitants du fait de leur impact sur la santé humaine par exposition : les particules, le dioxyde d'azote, l'ozone et le dioxyde de soufre. Lorsque les seuils de concentration sont dépassés, les Associations Agréées de la Surveillance de la Qualité de l'Air (AASQA) alertent les autorités et le public.

i/ Microparticules

Les microparticules sont des particules solides ou liquides en suspension de moins de 10 μm de diamètre, portées par l'eau ou par l'air, et formées de mélanges complexes de molécules qui tendent à s'agréger au cours du temps.

Elles sont différenciées par leur taille. Les particules comprises entre 2.5 et 10 microns sont appelées particules grossières. Les particules de moins de 2.5 microns sont nommées particules fines et incluent les particules ultrafines de diamètre inférieur à 0.1 μm ($\text{PM}_{0.1}$). Selon l'AFSSET (2009)¹⁶⁸, les principales composantes des PM (pour Particulate Matters en anglais) sont le sulfate et le nitrate d'ammonium, le carbone élémentaire ou carbone suie (dépôts noirs sur les bâtiments en milieu urbain), le carbone organique, les composés minéraux et sels (silicates d'aluminium, carbonate de calcium, ...), les métaux ainsi que les composés d'origine biogène (pollens, spores,...) (voir Annexe 41).

La source des PM dépend de l'environnement et de la saison. En milieu urbain, c'est le *trafic* et particulièrement le trafic routier (bien que l'on ait parlé récemment de la pollution des stations de métro par les particules d'abrasion de frein, de rail et de caténaire) qui constitue le principal émetteur, comptant pour environ 50% des émissions. Au total, elle représente 16% des $\text{PM}_{2.5}$ en 2015 sur le territoire métropolitain (Figure 36). Les particules diesel sont d'ailleurs la principale composante des PM du trafic, et classées cancérigènes avérés (groupe 1) par le CIRC depuis juin 2012.

¹⁶⁸ Étude de la pollution « ambiante », soit extérieure et non pas intérieure.

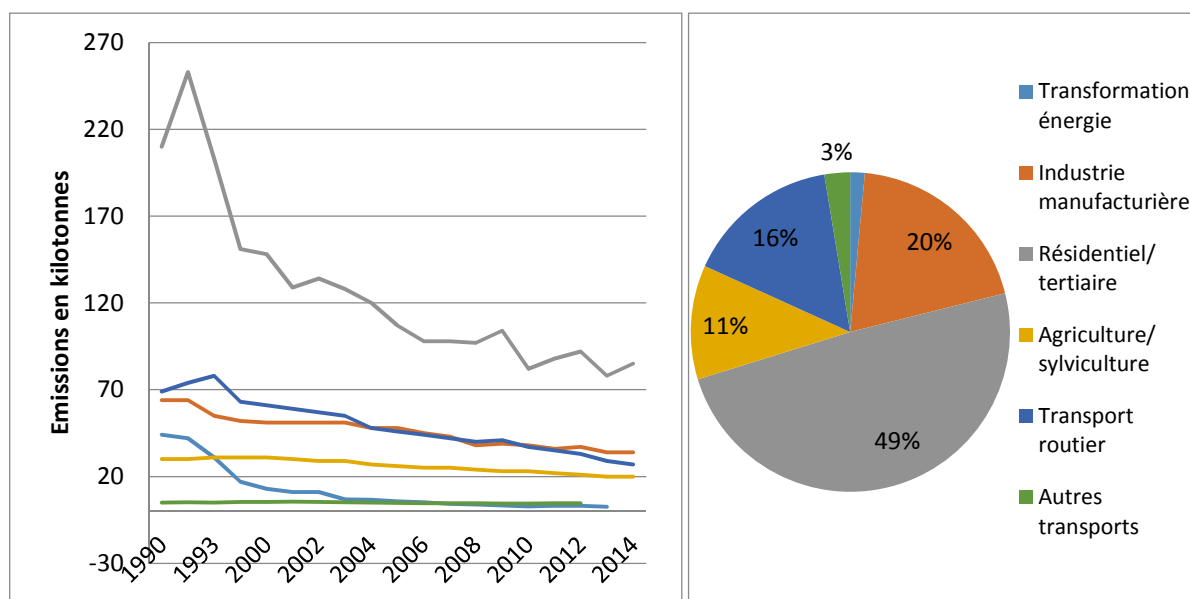


Figure 36 Émissions de PM_{2,5} en France Métropolitaine de 1990 à 2015 (à gauche) et sources d'émissions en 2014 (à droite) (données SECTEN, CITEPA 2016a)

Au niveau national, elles sont principalement émises (Figure 36) par les bâtiments résidentiels et tertiaires (49%) et l'industrie manufacturière (20%). En hiver, les PM_{2,5} émanent du chauffage et du trafic routier. Au printemps, elles résultent de réactions chimiques entre gaz précurseurs – composés volatils et oxydes d'azote.

Il est intéressant de noter qu'entre le transport routier et le secteur entier de l'industrie manufacturière (dont automobile et pneumatiques, ainsi qu'industrie routière), le bilan se monte à 36% des émissions. Cela suggère que le système de transport routier, selon une approche « cycle de vie » plutôt que purement émissions d'exploitations (celles responsables de 16% des émissions), a une part plus importante sur la pollution aux particules fines.

En France, le « Plan particule » lancé en 2010 visait à réduire de 30% les PM_{2,5} dans l'air d'ici 2015. Entre 2010 et 2014, les émissions nationales avaient diminué de 7.5%, et celles du transport de 27% (Figure 36), soit une tendance insuffisante à l'échelle nationale mais en revanche très positive au niveau des agglomérations métropolitaines où l'exposition est la plus forte.

Après s'être principalement intéressés aux PM₁₀, particules de moins de 10 µm de diamètre, ce sont aujourd'hui les «PM_{2,5}» (de moins de 2.5 µm, dont le Carbone Suie (BC pour Black Carbon)) voire les PM_{0,1} qui sont aujourd'hui principalement surveillés pour leur effet sanitaire particulièrement néfaste, car elles peuvent pénétrer l'arbre pulmonaire au plus profond des alvéoles, et ainsi atteindre tous les organes du corps en rejoignant la circulation sanguine, causant une inflammation chronique pouvant générer maladies cardio-vasculaires, cancers, etc. Les PM_{2,5} ont d'ailleurs été classées cancérigènes par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS).

Les niveaux d'alerte diffèrent selon les prescripteurs: la directive européenne 2020 fixe un seuil de 20 µg/m³ de PM_{2,5}, le Grenelle de l'environnement a fixé celui de 15 µg/m³, et l'Organisation mondiale de la santé celui de 10 µg/m³ (en moyenne annuelle, 25 µg/m³ sur 24h). Il existe également des seuils pour les PM₁₀, pas encore a priori pour les PM_{0,1} (Cours des Comptes 2015).

D'après une étude de l'InVS, à chaque fois que la concentration de particules augmente de 10 microgrammes par mètre cube d'air respiré, le risque de mort croît de 0.5%. L'OMS (2016) quant à elle avançait une réduction de 15% environ la mortalité imputable à la pollution de l'air en réduisant la pollution par les PM₁₀ de 70 µg/m³ à 20 µg/m³.

ii/ Oxydes d'azote

Les oxydes d'azote, aussi appelés NO_x et qui comprennent à la fois le monoxyde d'azote (NO) et le dioxyde d'azote (NO₂) résultent majoritairement, comme le SO₂, de la combustion des combustibles fossiles et de certains procédés industriels peu impliqués dans le système productif de transports routier (comme la production d'acide nitrique, la fabrication d'engrais, le traitement de surfaces, etc.). Majoritairement formés dans les chambres de combustion, ils peuvent avoir trois origines dont les mécanismes chimiques simplifiés sont décrits ci-dessous :

- origine thermique (si $T > 1400^{\circ}\text{C}$) : $\text{N}_2 (\text{air}) + \text{O}_2 \rightarrow 2 \text{NO}$
- origine combustible (si N dans le combustible) : $\text{R-NH}_2 (\text{N du combustible}) + \text{O}_2 \rightarrow \text{NO} + \dots$
- NO prompt (différentes étapes) : $\text{N}_2 + \text{CH} \rightarrow \text{HCN} + \text{N}$ puis NO

Ensuite, ces NO se transforment sous l'action d'oxygène en NO₂ dans le foyer. Cette réaction se poursuit par la suite lentement dans l'atmosphère et explique, dans le cas des villes à forte circulation, la couleur brunâtre des couches d'air pollué situées à quelques centaines de mètres d'altitude sous l'action des matières particulaires. Les NO_x interviennent également dans la formation des oxydants photochimiques (ozone troposphérique) que nous détaillons dans la section suivante, et par effet indirect dans l'accroissement de l'effet de serre.

Deux principaux émetteurs de NO_x sont aujourd'hui pointés du doigt¹⁶⁹ (voir Figure 37) : le transport routier (d'où une politique de réduction au moyen de pots catalytiques par exemple, et la forte réduction des seuils de tolérance dans les normes Euro, notamment entre les normes Euro 5 et Euro 6) et les grandes installations de combustion. En 2015, selon les données de CITEPA (2016d), le transport routier comptait en effet pour 55% des émissions de NO_x, contre seulement 6% pour les autres modes de transport, 13% pour l'industrie manufacturière, 11% pour le résidentiel et tertiaire, 10% pour l'agriculture, et 5% pour la transformation d'énergie. Si l'on regarde les évolutions d'émissions de NO_x entre 1960 et 2015, on remarque que le transport routier s'est constamment amélioré depuis le fort pic des années 1990, après avoir cru très fortement jusqu'au milieu des années 70 et plus doucement entre 1970 et 1990. Entre 1960 et 2015, le secteur a ainsi réduit de 125% ses émissions, contre 77% et 73% respectivement en agriculture/sylviculture et en résidentiel/tertiaire. En revanche, les autres secteurs ont vu leurs émissions augmenter : +73% pour la transformation de l'énergie, +59% pour l'industrie manufacturière, +42% pour les autres transports. Au total, les NO_x n'ont décré que de 2% sur cette période.

En 2014, la décomposition des contributions du transport routier par type de véhicules donnait, sur une contribution globale de 56%, 23% de la contribution globale aux émissions de NO_x par les VP diesel, 20% par les PL diesel (incluant PLF, bus, et autocars), et 11% par les VUL diesel (CITEPA 2016d).

¹⁶⁹ Notons tout de même une émission de NO_x biogénique, par les volcans, les orages, et les feux de forêts.

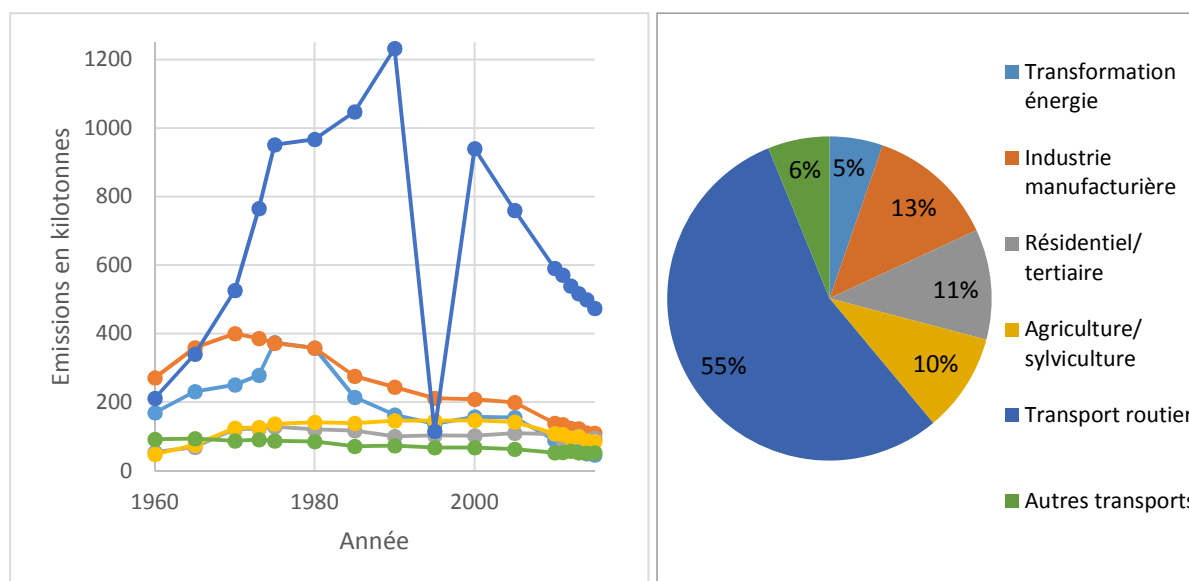


Figure 37 Émissions de NOx en France Métropolitaine de 1960 à 2015 (à gauche) et sources d'émissions en 2015 (à droite) – légende commune indiquée à droite (données CITEPA 2016d, format SECTEN)

Les effets néfastes des NOx sont de deux types. C'est un précurseur de la formation d'ozone troposphérique, ayant des effets négatifs à la fois sur la santé et les effets socioéconomiques des changements climatiques que nous développerons dans la section suivante. Il présente également des conséquences négatives directes en termes de santé publique, de respect des écosystèmes et du patrimoine. En effet, le NO₂ est un gaz toxique – 40 fois plus que CO, et 4 fois plus que NO par exemple. Il peut pénétrer profondément dans les poumons. Les pics de concentrations sont plus nocifs qu'une exposition chronique à même dose cumulée. Le NO est un gaz irritant pour les bronches et réduit le pouvoir oxygénateur du sang. Les NOx génèrent aussi une acidification de l'air, donc des pluies (via la formation d'acide nitrique) avec des conséquences néfastes pour les écosystèmes et le patrimoine bâti (c'est un peu moins le cas qu'il y a une quinzaine d'années néanmoins).

Le seuil d'information et de recommandation de la France est de 200 µg/m³ en moyenne horaire, et le seuil d'alerte de 400 µg/m³ dépassés sur 3h consécutives, ou de 200 µg/m³ en moyenne horaire en cas de dépassement de ce même seuil la veille et de risque de dépassement le lendemain (Cour des comptes 2015). L'Union Européenne (UE) quant à elle exige que le seuil de 200 µg/m³ en moyenne horaire ne soit pas dépassé plus de 18 fois en une année, ce seuil étant également préconisé (sans occurrence maximale) par l'OMS. L'UE menace d'ailleurs 5 pays¹⁷⁰ n'ayant pas respecté les limites en matière de pollution atmosphérique fixées pour le dioxyde d'azote (NO₂) de saisir la Cour de justice de l'UE sans action sous deux mois: la France, l'Allemagne, l'Espagne, l'Italie et au Royaume-Uni. Ses mesures phares préconisées concernent le transport routier : réduction du volume global du trafic routier, favorisation de l'électromobilité, comportement des conducteurs, émissions des véhicules à moteur diesel.

Dans le but de ne plus dépasser ces seuils, la France a mis en place des mesures primaires (CITEPA 2016a) et secondaires de réduction des NOx (CITEPA 2016b). Les mesures primaires visent une réduction des émissions à la source par différence aux mesures secondaires qui traitent les polluants déjà émis et présents dans les effluents gazeux. Les mesures primaires comptent la combustion en

¹⁷⁰ <http://www.lefigaro.fr/sciences/2017/02/15/01008-20170215ARTFIG00344-pollution-de-l-air-l-europe-menace-la-france.php>

faible excès d'air (moteurs), l'étagement d'air (chaudières et brûleurs), l'étagement du combustible (moteurs), la recirculation des gaz de combustion (moteurs), et les brûleurs bas-NOx. Les mesures secondaires sont principalement les suivantes : Réduction Catalytique Sélective (i.e. on injecte des agents réducteurs comme l'urée ou de l'ammoniac dans les fumées, et on utilise des catalyseurs de réaction) et la réduction sélective non catalytique (idem que la mesure d'avant mais sans catalyseur).

iii/ Pollution photochimique : ozone troposphérique

Il faut distinguer deux types d'ozone, de même formule chimique (O_3) mais situés à des altitudes différentes et qui de ce fait vont avoir des impacts très différents sur l'environnement.

L'ozone stratosphérique, appelé vulgairement « bon ozone » est celui de haute altitude (6 à 17 km d'altitude). Il joue un rôle d'écran naturel aux ultraviolets solaires. C'est celui qui est en jeu dans le « trou dans la couche d'ozone » : il s'agissait dans les années 1980 d'un appauvrissement de plus de 50% de la couche d'ozone stratosphérique au-dessus de l'Antarctique, du fait de l'utilisation de CFC (voir 2.3.3). Aujourd'hui, un article publié dans Science en 2016 semble faire état d'un retour à la normale sur 4 millions de km^2 (Solomon et al. 2016), probablement grâce à l'interdiction des CFC. Pour autant, le HCFC continue d'être utilisé. D'ailleurs, un autre appauvrissement important (80%), cette fois au-dessus du pôle Arctique, a été signalé dans un article de Nature en 2011 (Manney et al. 2011). Le polluant que l'on souhaite évoquer ici en revanche, communément appelé « mauvais ozone », est celui présent dans la troposphère (« ozone troposphérique), soit dans la couche d'atmosphère terrestre située à des altitudes entre 0 et 10 km. Il est la résultante de plusieurs réactions chimiques dans l'atmosphère appelées cycle de l'ozone. Sous l'effet des ultraviolets lors de périodes chaudes et ensoleillées, le dioxyde d'azote émis par le trafic routier laisse échapper une molécule d'oxygène qui se mélange à l'oxygène déjà présent dans l'air (Annexe 42). O_2 se transforme donc en O_3 . Le mauvais ozone peut avoir trois précurseurs : les composés organiques volatiles (COV), les hydrocarbures non méthaniques (HCNM) et le monoxyde de carbone (Aumont 2005). La formation d'ozone va donc dépendre à la fois des émissions de COV, NCM, CO et NO_2 . Or, le NO_2 (et plus généralement les oxydes d'azote) et le CO sont des émissions d'origine majoritairement anthropique issue des échappements, en large partie des véhicules routiers (Aumont 2005). Les COV en revanche sont principalement des hydrocarbures d'origine primaire, liés aux activités à la fois biogéniques (90%) et anthropogéniques (10%) (Aumont 2005). En particulier, les espaces verts peuvent être source de COV (isoprène) en milieu urbain. Selon leur nature, leur temps de demi-vie et leur réactivité sont très variables (Aumont 2005). Les concentrations d'ozone sont globalement stables entre 2000 et 2012 (dernières données que nous ayons trouvées), que ce soit en fond urbain (+8% : de 45 à 50 $\mu m/m^3$) ou en milieu rural (60 $\mu m/m^3$) (CITEPA 2016e).

Le mauvais ozone est impliqué dans l'effet de serre (3^{ème} GES après le dioxyde de carbone et le méthane selon le 4^{ème} rapport du GIEC) bien qu'il ne fasse pas l'objet d'engagements de réduction des GES internationaux (Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques) (CITEPA 2016e).

Les impacts socioéconomiques de l'ozone sont de deux types : ceux sur la santé humaine et ceux sur les végétaux. Sur la santé humaine, l'ozone provoquerait une irritation des voies respiratoires et des yeux, une baisse des performances physiques et une détérioration de la fonction pulmonaire. Sur les végétaux, il perturbe la photosynthèse des plantes et altère leur résistance en entraînant des déficits de croissance, ce qui peut se remarquer par un jaunissement du feuillage. Il attaque plus ou moins sévèrement les plantes selon leur nature via leurs stomates, impliquant une absorption plus accrue par temps humide (stomates ouverts) que par temps sec (stomates fermé). Il résulterait in fine à une baisse de productivité des cultures (CITEPA 2016e).

Comme pour les poussières, les valeurs limites et valeurs cibles varient selon l'organisation (OMS, UE, France, US EPA) (Cour des Comptes 2015). La valeur fixée par l'UE est de $100\mu\text{m}^3$ en moyenne horaire sur 8h, tandis qu'en France le seuil d'information et de recommandation est de $180\mu\text{m}^3$ en moyenne horaire, et le seuil d'alerte de $240\mu\text{m}^3$ en moyenne horaire.

iv/ Dioxyde de soufre

Le dioxyde de soufre (SO_2) est un gaz incolore et toxique à l'odeur pénétrante. Il est libéré dans l'atmosphère par la combustion de certains charbons, pétroles ou gaz naturels. Il participe à l'acidification de l'air et peut former un brouillard et des aérosols d'acide sulfurique (pluies acides). Sur l'homme, il est fortement irritant pour les yeux et l'appareil respiratoire.

Les rejets de dioxyde de soufre (SO_2) sont dus en grande majorité à l'utilisation de combustibles fossiles sulfurés (charbon, lignite, coke de pétrole, fioul lourd, fioul domestique, gazole, etc.). Ils ont fortement décru depuis les années 1970-1980 auxquelles un pic s'est nettement fait sentir (avec une chute probablement lors du choc pétrolier de 1973) (Figure 38). Notamment, entre 1960 et 2015, ces rejets ont globalement diminué de 91%, soit de 91% dans l'industrie de la transformation énergétique, 89% dans l'industrie manufacturière et 98% dans les transports. Aujourd'hui, le plus grand contributeur reste l'industrie lourde, avec la moitié des émissions, suivie de la transformation de l'énergie (34%) et le bâtiment (14%) (Figure 38). Si la contribution du transport a pu se faire sentir, notamment les émissions d'exploitation du transport routier qui comptabilisait 11 à 12% du total des émissions entre 1990 et 1995, sa contribution est aujourd'hui (2015) très faible : 0.5% pour le transport routier et 1.7% pour les autres modes (données SECTEN). Néanmoins, cela pourrait évoluer avec la diffusion de l'électromobilité, consommatrice de produits industriels différents et surtout d'électricité (i.e. secteur de la transformation de l'énergie) en lieu et place des carburants fossiles. En effet, l'électricité nucléaire est assez peu émettrice de dioxyde de soufre.

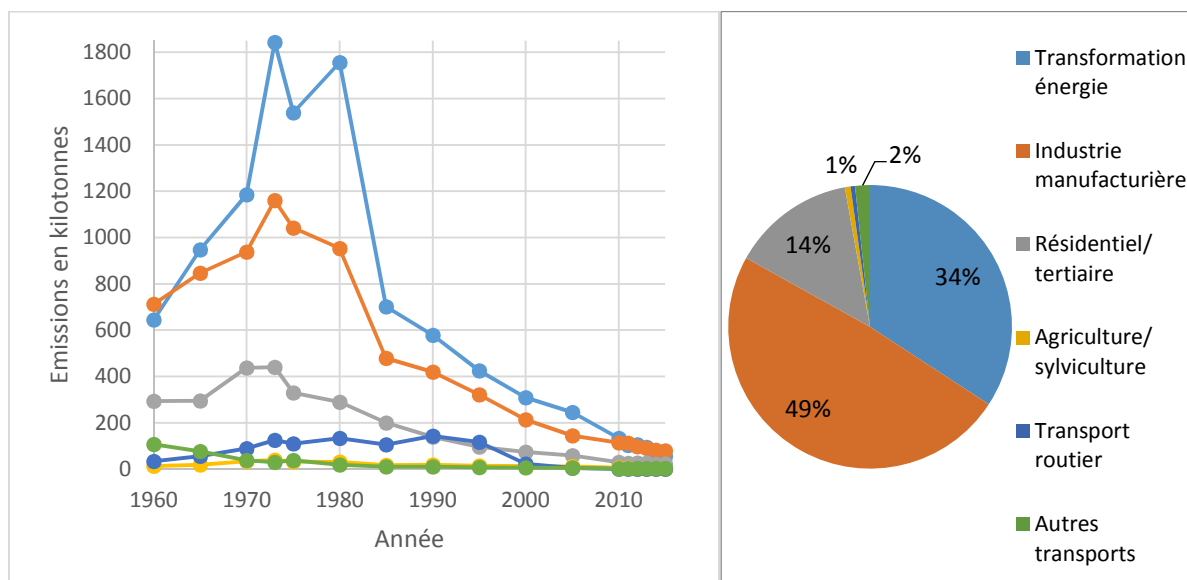


Figure 38 Émissions de SO_2 en France Métropolitaine de 1960 à 2015 (à gauche) et sources d'émissions en 2015 (à droite) (données SECTEN, (CITEPA 2016c))

Comme pour les autres polluants, il existe plusieurs valeurs limites et valeurs cibles (Cour des comptes 2015). La valeur fixée par l'UE est de $125\mu\text{m}^3$, à ne pas dépasser plus de 3 jours par an, tandis que le seuil d'information et de recommandation français est de $50\mu\text{m}^3$ en moyenne annuelle et $300\mu\text{m}^3$ en moyenne horaire, et le seuil d'alerte de $500\mu\text{m}^3$ sur 3h consécutives sur au moins 100km^2 en moyenne horaire.

Du point de vue sanitaire (INERIS 2011), les effets peuvent être liés à une exposition chronique (toxicité chronique de la pollution ambiante) ou par toxicité aiguë. La principale voie d'exposition au SO₂ est l'inhalation. Ce gaz étant très soluble dans l'eau, il est facilement absorbé par les muqueuses des voies respiratoires supérieures. Le nez absorbe la majorité du SO₂ inhalé, mais une respiration par la bouche participe d'une augmentation forte de la quantité de SO₂ atteignant les poumons. En effet, lors d'une respiration calme par le nez, la pénétration dans les voies respiratoires inférieures est très faible. Elle croît dans le cas d'une respiration profonde par la bouche ou quand la fréquence respiratoire augmente, en particulier pendant un exercice physique (INRS 2016). Ensuite, le SO₂ se dissocie rapidement dans l'eau pour former des ions hydrogène, sulfite et bisulfite. Les ions sulfite et bisulfite lèsent les cellules en interagissant avec d'autres molécules. L'ion bisulfure est également fortement bronchospastique : il provoque une inflammation des bronches avec un spasme qui altère la fonction respiratoire. À son paroxysme, c'est ce qui est appelé crise d'asthme.

Mais le système respiratoire n'est pas le seul touché par le SO₂, qui a également un effet systémique. En effet, il est absorbé dans le sang (d'abord via les muqueuses) qui le distribue dans tout l'organisme où il est métabolisé. Les ions sulfites réagissent chimiquement avec les protéines plasmatiques pour former des S-sulfonates et peuvent aussi réagir avec l'ADN. La détoxification a lieu essentiellement au niveau hépatique par oxydation en sulfates (via l'enzyme sulfite oxydase), éliminés dans les urines (INERIS 2011). Les diverses conséquences non respiratoires d'une exposition chronique sont (INRS 2016):

- bronchite chronique
- emphysème et altération globale de la fonction pulmonaire
- aggravation de l'asthme et des maladies pulmonaires inflammatoires ou fibrosantes
- affections respiratoires (toux chronique, dyspnée) et augmentation du taux de mortalité par maladie respiratoire ou cardiovasculaire (maladie ischémique)
- effet cancérigène possible par combinaison avec les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) (cancer broncho-pulmonaire), mais non classé cancérigène par le Centre international de recherche sur le cancer (CIRC)

Chez l'animal, les mécanismes sont les mêmes que ceux décrits chez l'homme (CITEPA 2016c).

v/ Autre polluants

D'autres polluants atmosphériques sont également surveillés (Cour des comptes 2015). En France, les autres polluants réglementés¹⁷¹ sont le benzène (C₆H₆) (2 µg/m³ en moyenne annuelle, 5 µg/m³ pour l'UE) et le plomb (Pb) (0.25 µg/m³ en moyenne annuelle). Mais au niveau international, des substances telles que le benzo(a)pyrène¹⁷² (1 ng/m³ en moyenne annuelle du contenu total de la fraction PM₁₀ en UE) le CO (10 mg/m³ en maximum journalier de la moyenne sur 8h pour l'UE), et d'autres métaux lourds comme l'arsenic (6 ng/m³ en moyenne annuelle du contenu total de la fraction PM₁₀ en UE), le cadmium (5 ng/m³ en moyenne annuelle du contenu total de la fraction PM₁₀ en UE, et 1.5 ng/m³ en moyenne annuelle dans les poussières en suspension en Suisse), le nickel (20 ng/m³ en moyenne annuelle du contenu total de la fraction PM₁₀ en UE), le zinc (400 µg/m³ en moyenne annuelle dans les retombées de poussières en Suisse), et le thalium (2 µg/m³ en moyenne annuelle dans les retombées de poussières en Suisse).

Entre 1990 et 2013, selon les données CITEPA, on notait les évolutions suivantes (Cour des Comptes 2015): -97% d'émissions de plomb, -87% d'émissions de cadmium, -85% d'émissions de mercure, -79%

¹⁷¹ <https://www.airparif.asso.fr/reglementation/normes-francaises>

¹⁷² Il est utilisé comme traceur du risque cancérigène lié aux hydrocarbures aromatiques polycycliques

d'émissions de nickel, -69% d'émissions de Composé Organique Volatil Non Méthanique (COVNM), -62% d'émissions d'arsenic, -54% d'émissions d'HAP (dont le benzo(a)pyrène (B[a]P classé cancérigène pour l'homme par l'OMS), -2.9% d'émissions d'ammoniac et -1% d'émissions de cuivre.

L'entretien routier a un impact sur les niveaux d'émissions, notamment du fait des émissions d'abrasion qui forment des particules fines, dont une partie sont métalliques, et d'autres de diverses natures (particules de route, de pneumatiques).

Enfin, les polluants atmosphériques, ou flux polluants libérés dans l'air, ne sont pas les seuls relâchés par le système de production impacté par l'entretien routier. En effet, une myriade de substances polluantes peut également être libérée dans d'autres milieux, tels que les eaux ou les sols. Un simple flux d'eau chaude, sans substance polluante, peut générer une perturbation du milieu néfaste pour la biodiversité et in fine pour l'homme. Ces flux perturbants, émis tout au long de la chaîne de production, sont pris en compte dans l'ACV.

vi/ Socioéconomie de la pollution atmosphérique

Le transport routier est un grand contributeur de multiples polluants atmosphériques, issus de la phase d'exploitation (gaz d'échappements et émissions d'abrasion), mais aussi de tout le cycle de vie (exposition des travailleurs sur les chantiers routiers, dans les usines (industrie routière, automobile et pneumatiques, garages) et de leurs riverains.

L'impact sur la santé de la pollution atmosphérique implique deux types de coûts socioéconomiques:

- les coûts de contrôle et de mesures de réduction des émissions (réduction et préventions),
- les dépenses de réaction à leurs effets : soins médicaux et éventuellement protection
- les amendes internationales potentielles (UE pour la France)

La pollution atmosphérique représente un risque environnemental majeur pour la santé humaine. La santé cardiovasculaire et respiratoire de la population, à court et long termes, est inversement proportionnelle au niveau de la pollution atmosphérique. Réduire les niveaux de pollution atmosphérique permettrait donc aux pays de réduire la charge de morbidité imputable aux accidents vasculaires cérébraux, aux cardiopathies, au cancer du poumon et aux affections respiratoires, chroniques ou aiguës, y compris l'asthme (OMS 2016). Selon l'OMS (2016), 92% de la population mondiale vit au-dessus des seuils de pollution préconisés par cet organisme, les populations du Pacifique occidental et de l'Asie du Sud-Est y étant particulièrement exposées. Toujours selon cet organisme (OMS 2016), *investir en faveur de transports plus écologiques* est un des leviers principaux de réduction de la pollution urbaine, avec les logements, la production d'électricité et l'industrie à haut rendement énergétique, ainsi que la gestion des déchets.

La pollution de l'air est la 3ème cause de décès en France après le tabac et l'alcool (49 000 décès annuels), peut-être même ex-aequo avec ce dernier. D'après la Cour des Comptes (2015), 60% de la population française respire un air de qualité dégradée, ce qui causerait entre 17 000 et 42 000 décès prématurés par an en France (i.e. une réduction de l'espérance de vie de 2 ans chez les trentenaires si l'on retient la fourchette haute), et qui coûterait entre 20 et 30 Md€ à la société selon les méthodes de monétarisation. Malgré la forte médiatisation des pics de pollution, il faut savoir qu'une vaste majorité des décès – estimée de 85 à 100% – est le fait de la pollution chronique ne dépassant pas les seuils réglementaires. L'exposition prolongée à des aérosols nocifs serait le mode le plus impactant de la pollution atmosphérique pour l'homme. L'impact reconnu et supporté par la CNAM au titre de la pollution de l'air sur la santé publique s'élève aujourd'hui à 1 Md€ (Cour des Comptes 2015). Si l'ensemble du territoire atteignait les niveaux de pollution des 5 % de villes françaises les moins atteintes, 34.500 décès pourraient être évités, alors qu'en respectant les normes du Grenelle de

l'environnement, on éviterait seulement 3000 décès, et 17 700 avec les critères de l'OMS. Le cadre européen moins contraignant, éviterait 10 décès.

L'union Européenne quant à elle dénonce sur son territoire 400 000 décès annuels à cause de la pollution atmosphérique. En Europe, le nombre de décès prématurés dus à l'ozone troposphérique serait de 22 700 (en 2000). En appliquant les résultats des travaux de révision du Protocole de Göteborg et l'intégralité des directives européennes en termes d'émissions de polluants, on pourrait limiter ce nombre à 17 400 en 2020 (CITEPA 2016e).

Notons qu'un autre impact de la réduction de la pollution atmosphérique serait de réduire le changement climatique à court et long termes dans la mesure où certains polluants ou précurseurs comme les particules de carbone noir et de méthane impactent le climat (OMS 2016).

B/ Bruit

Les émissions de bruit routier influencées par l'intensité du resurfaçage sont celles relevant de la modification du contact pneu-chaussée contributeur du bruit de roulement, et dans une moindre mesure des phases de travaux. Les émissions sonores émises tout au long du cycle de production relatif à l'entretien routier perturbent les riverains de ces sites, mais nous ne développerons pas ces cas. Nous nous concentrerons sur le bruit de roulement pneu-chaussée, les bruits liés aux travaux étant négligeables en interurbain (faible exposition car peu de riverains, notamment en jour ouvré, et travaux très ponctuels à l'échelle du cycle de vie) et ceux des autres sites très variés et difficilement caractérisables. Nous nous concentrerons donc sur le riverain dit « routier ».

i/Unités et indicateurs (Can, Guillaume, et Gauvreau 2015)

L'unité utilisée dans les études environnementales pour caractériser le bruit est le décibel pondéré A dB(A) qui traduit le niveau de pression acoustique auquel est sensible l'oreille humaine (voir les pondérations physiologiques en Annexe 43). Le niveau sonore est lié à la pression acoustique par une relation non linéaire¹⁷³.

Parmi de nombreux indicateurs à disposition pour décrire un environnement sonore, deux d'entre eux sont particulièrement utilisés dans le domaine de l'ingénierie : le niveau de pression sonore maximum observé pendant une période T donnée noté LA_{max}, et le niveau de pression sonore continu équivalent durant une période T noté LA_{eq}, qui représente le niveau de bruit constant qui aurait été produit avec la même énergie que le bruit existant réellement pendant la période T considérée. Ce dernier indicateur exprime donc la moyenne énergétique acoustique reçue pendant la période T.

ii/ Protocoles de mesures

Il existe plusieurs protocoles de mesure des émissions sonores générées par le trafic routier dont la méthode « statistique au passage » selon la norme NF EN ISO 11819-1 (AFNOR 2002) et la méthode au passage de la norme NF 31-119-2 (AFNOR 2000b) toujours en application. Les conditions de mesures des protocoles sont communes : mesure à 7.5m de l'axe de la voie et à 1.2m de hauteur, calcul des couples {niveau de puissance acoustique maximale LA_{max}, vitesse véhiculaire V_{veh}}, puis calcul du niveau sonore ramené à une vitesse de référence¹⁷⁴. Il existe également des protocoles de mesure du bruit à l'intérieur des véhicules, développés en particulier par les constructeurs automobiles. Le BRRC, Belgian Road Research Centre, a également mis au point un mode opératoire de mesure du bruit de contact pneu/route, pour le bruit extérieur et intérieur en 1984 (Descornet 1984).

¹⁷³ $L = 10 \log (P^2/P_0^2)$, P valeur efficace de la pression acoustique et P₀ pression de référence (seuil d'audibilité)

¹⁷⁴ loi de régression : $LA_{max}(V_{ref}) = LA_{max}(V) - a \cdot \ln(V/V_{ref})$

iii/ Règlementation (Hamdad 2018)

Les nuisances sonores routières sont règlementées vis-à-vis des riverains routiers à travers des valeurs seuils dans la directive 2007/34/CE du 14 juin 2007 concernant le niveau sonore admissible des véhicules routiers à 4 roues et plus et leur dispositif d'échappement. Ces seuils sont en accord avec le règlement international 51R02 qui limite les émissions sonores des VL de transport de personnes à des valeurs comprises entre 74 (transport non collectif) à 77 dB(A) (transport collectif), des PL de transport collectif ou de marchandise à 80 dB(A). Ces niveaux sont souvent dépassés (Syrota et al. 2011). Ces seuils sont potentiellement amenés à être réduits, et la Commission européenne a d'ailleurs fait une proposition de réduction fin 2011, qui doit être approuvée par le Parlement européen et les États membres pour application.

iv/ Impact sanitaire

Selon l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (AFSSET 2007), les transports sont un grand contributeur des bruits auxquels la population française est exposée. Notamment les modes routiers du fait de l'accroissement du trafic. En milieu urbain, le bruit routier est un problème diurne comme nocturne, et les niveaux sonores mesurés en façade augmentent depuis 30 ans, malgré une réduction de certains points noirs en zones périurbaines, suite à la mise en place de plans de réduction du bruit dans les villes. Les bruits routiers dans les villes sont principalement générés par les moteurs thermiques et les fermetures des portes. En revanche, en interurbain (autoroutes, voies à grande circulation), c'est le bruit de contact pneu-chaussée qui est le principal responsable du bruit ambiant (avec les bruits aérodynamiques). Plus la vitesse du véhicule est élevée, plus le bruit émis sera important. Plus le revêtement est dégradé, plus le bruit va être important également.

Impacts sur la santé (AFSSET 2007)

Le bruit présente trois types d'impacts sur la santé humaine : les impacts directs sur l'audition, les effets extra auditifs, et les effets subjectifs.

Sur l'audition, cela peut se révéler par une fatigue auditive temporaire donc réversible, et une perte irréversible de points d'audition. La nocivité du bruit dépend de sa nature – fréquence, pureté du son, intensité, moment d'émergence et rythme/périodicité – et de l'individu exposé – durée d'exposition, vulnérabilité individuelle (âge, antécédents infectieux, de traumatismes crâniens, tension artérielle, terrain génétique)

Les effets extra auditifs peuvent perturber le sommeil, la sphère végétative, le système endocrinien, le système immunitaire, et la santé mentale. Sur ce dernier point, le bruit pourrait être particulièrement néfaste chez les sujets dépressifs ou anxieux, amplifiant ces états, la fatigue, et les phénomènes de stress. Sur le sommeil, le bruit peut entraîner des troubles jusqu'à l'éveil, selon la qualité/le stade de sommeil et la sensibilité du sujet.

Les effets subjectifs en revanche se révèlent par une gêne, des effets sur les comportements, les performances et l'intelligibilité de la parole.

À ces trois types d'effets s'ajoutent les effets liés aux expositions cumulées, appelées multi-exposition, et à la combinaison avec d'autres agents tels qu'agents chimiques, chaleur, ou encore médicaments.

Coût sociétal et niveau d'entretien

La monétarisation du coût sociétal du bruit donne lieu à des fourchettes de coût plus ou moins larges. En nombre de victimes en Europe, l'Agence européenne de l'environnement estime que les nuisances sonores seraient à l'origine de plus de 10 000 décès prématurés par an, 6 700 victimes du bruit ambiant succombant à des crises cardiaques et 3 300 à des accidents vasculaires cérébraux (European

Environment Agency 2015). En France, une étude co-pilotée par l'ADEME et le cabinet d'audit et de conseil EY (E&Y 2016) a estimé le coût sociétal global du bruit à 57 milliards d'euros par an. Selon ce rapport, 25 millions de personnes en France seraient significativement touchées par le bruit des transports, dont 9 millions exposées à des niveaux critiques pour leur santé. Le bruit des transports a été évalué à 20Mds€/an pour la seule exposition à domicile, et ses impacts sur le sommeil, la gêne, les risques cardiovasculaires accrus, les décotes immobilières, les pertes de productivité et le troubles de l'apprentissage.

Le CEREMA a fait l'exercice de la monétarisation de l'impact des projets routiers sur le bruit en 2014 (Le Maître 2014). Dans son rapport, plusieurs méthodes sont appliquées dont celle préconisée par la DGITM pour l'ESE. On retrouve des calculs de coût moyen du bruit des sections routières, et le calcul du niveau marginal de bruit est également réalisé. L'idée est toujours de calculer l'impact généré par un projet routier sur l'exposition au bruit des populations : on calcule une différence de coûts entre option de projet et option de référence. En appliquant directement les valeurs tutélaires (en €/veh.km) du rapport de la commission Quinet (Quinet et al. 2013), la variation de coût entre projet et référence sur un an peut varier d'un rapport 10 sur les études de cas réalisées, mais reste dans l'ordre de grandeur de la méthode à partir de la carte de bruit stratégique complétée de coefficients de marginalité.

L'Annexe 47 présente un exemple de coûts marginaux préconisés pour les calculs socioéconomiques du bruit en France.

Les coûts du bruit routier sont donc moyennés quel que soit le revêtement routier (matériaux et état) et les grandes catégories de véhicules (VL, PL). Néanmoins, comme nous l'avons vu en 2.7, le type de revêtement routier ainsi que son âge va avoir un impact sur le niveau de bruit pneu-chaussée, qui est le bruit majoritaire sur les gammes de vitesse en interurbain. Comme déjà dit, quelques études avancent les taux d'évolutions de +1dB(A)/an en début de vie pour les revêtements poreux, +3dB(A) pour un BBTM (0/6) entre 1 et 7 ans d'âge, et une convergence globale des performances acoustiques des différents types de revêtements avec le temps (Doisy 2007). Rappelons que, dans le cas d'une source sonore supposée ponctuelle, une augmentation de 3dB(A) revient à doubler l'énergie sonore délivrée : ainsi, la variation du bruit généré par un revêtement routier sur un cycle d'entretien standard aujourd'hui (période supérieure à 10 ans) est non négligeable avec une partie des revêtements tout au moins. Évidemment, en interurbain, la source sonore est relativement éloignée des riverains routiers, peu nombreux à être exposés : la variation du coût social y est théoriquement plus faible qu'en milieu plus dense.

4.2.2.3 Nation

Les dépenses en transport génèrent environ 20% du PIB. Plus de la moitié de ces dépenses sont de l'autoproduction de service de transport : automobiles des ménages et transport pour compte propre des entreprises. 80% des dépenses sont faites dans le secteur routier, ce qui est proche de la part modale de la route en France. Nous expliquons ici les mécanismes généraux de l'effet d'entraînement économique de la fréquence de resurfaçage en France.

A/ Définitions et mécanismes généraux

La collectivité peut se définir comme un ensemble organisé d'individus. Elle doit être garante du bien commun, le concept d'équité s'opposant à la loi du plus fort et à l'intérêt individualiste. La fréquence d'entretien d'une infrastructure est une décision politique. L'intensité de resurfaçage va engendrer des effets en profondeur sur l'économie de la collectivité du pays, par le biais d'agents individuels et collectifs, publics et privés, administratifs, industriels et tertiaires. Les répercussions sur l'activité économique vont être:

- directes sur certains acteurs comme le producteur d'entretien et son financeur mais aussi sur les garages, producteurs de pneumatiques et de pièces détachées, et fournisseurs d'énergie de traction (carburants fossiles principalement aujourd'hui)
- du second ordre pour les fournisseurs de l'industrie routière
- du 3eme ordre pour les fournisseurs des fournisseurs
- etc.

C'est donc toute une chaîne de valeur qui se met en place, avec un effet d'entraînement de l'activité d'entretien sur d'autres branches économiques. À ces effets marchands, qui peuvent s'exprimer par un indicateur comme le PIB, s'ajoutent des effets de bien-être (aspects hédoniques non marchands) dont nous avons traité les principaux aspects en 4.2.1 et 4.2.2.2 dans les sections « Usagers » et « Riverains », ainsi que des effets systémiques tels que les économies d'agglomération ou les effets sur les marchés à concurrence imparfaite que nous détaillerons pas dans notre approche (Leurent 2013). Mais la question de l'économie collective s'aborde également par le biais de l'emploi et du chômage. Nous avons vu précédemment que le chômage était facteur de mal-être, en plus d'être financièrement préjudiciable pour la collectivité, puisqu'il nécessite, par solidarité sociale, le versement d'une indemnité. Le taux de chômage, qui est égal au rapport des demandeurs d'emplois sur les actifs occupés et les chômeurs, s'élève en 2018 en France à un peu plus de 9%¹⁷⁵, et est resté relativement stable ces 20 dernières années (entre 8 et 10% selon les données Eurostat¹⁷⁶). Au contraire, un emploi est source de cotisations patronales basées sur la rémunération salariale, et de salaire, qui constitue un revenu pour la consommation et un revenu pour les pouvoirs publics via les charges du salarié.

Nous nous attacherons à décrire la chaîne de valeurs relative à la fréquence de l'entretien routier en dehors des effets relatifs aux usagers que l'on a déjà traités (4.2.1), et des externalités environnementales que l'on a abordés du point de vue local dans les effets aux riverains (4.2.2.2) et que nous aborderons dans leur globalité dans la partie sur l'économie de l'environnement (4.2.2.4). Nous nous intéresserons donc maintenant à d'autres acteurs – les fournisseurs directs et de rang n (>1) de l'entretien routier, leurs employés, et les pouvoirs publics qui ont pour mission d'investir et d'entretenir les infrastructures et services collectifs grâce aux finances publiques.

B/ Pouvoirs publics

Les pouvoirs publics sont les principaux décideurs des politiques de transport. En termes de dépenses, selon les comptes des transports (CGDD 2015), les collectivités territoriales sont le principal financeur public des dépenses de transport, comptabilisant près de 75% des dépenses (répartis à 48% pour les TC et à 41% pour la voirie). L'intensité d'entretien des infrastructures, et par exemple la fréquence à laquelle les couches de roulement vont être renouvelées, relève d'une politique, puisqu'en fine, ce sont les finances publiques qui paient l'entretien des routes, ce qui est évident quand il s'agit de la plupart des réseaux puisqu'ils sont non concédés – les RC, RD, et RNnc – mais qui est aussi partiellement vrai dans le cas des quelques milliers de kilomètres d'autoroutes concédées, bien que le paiement soit indirect ou inverse dans le montage complexe des partenariats publics-privés de concessions autoroutières (négociations financières prenant en compte le besoin d'entretien et contrats de performance). En tout cas, selon l'intensité de resurfacement, le budget d'entretien routier du gestionnaire va varier, que ce dernier soit public – DIR, CD, communautés d'agglomération – ou privé – SCA.

¹⁷⁵ https://ec.europa.eu/eurostat/en/web/products-datasets/-/UNE_RT_M

¹⁷⁶ <https://www.contrepoints.org/2018/08/23/323147-croissance-et-chomage-la-france-decroche>

Ces pouvoirs publics perçoivent différentes contributions financières – recettes fiscales et cotisations sociales. D’abord, ils engrangent des recettes fiscales basées sur les échanges marchands (TVA, TICPE, taxes locales sur l’électricité), par exemple ceux des fournisseurs de rang n. Ensuite, ils perçoivent des impôts sur la production et les importations de biens et services, l’emploi de main-d’œuvre, la propriété et l’utilisation de terrains, bâtiments et autres actifs à des fins de production, et le montant des bénéfices obtenus, qui sont prélevés par les administrations publiques (ou les institutions de l’UE). Enfin, ils collectent des cotisations sociales.

Que les investissements soient publics ou privés, l’intensité du resurfaçage va jouer sur toute la chaîne de production de l’industrie routière, mais aussi sur la chaîne de consommation des véhicules en termes de carburant, de pneumatiques et d’entretien comme nous l’avons vu en 4.2.1. En effet, l’activité économique n’est pas une pure consommation, mais un enchaînement de flux liés entre eux.

C/ Importance de l’entretien routier

i/ Part et évolution de l’entretien routier dans le secteur de la construction

Les entreprises françaises de l’industrie routière réalisent environ 2/3 de leur CA en France, pour un montant de 13.6 Mds€ en 2014 (USIRF 2015). Elles contribuent donc, via la taxation des entreprises, aux finances collectives.

Selon la FNTP (2015a), les travaux routiers représentent 34% du chiffre d’affaire des travaux publics, sous-secteur également en baisse depuis 2013, après une période stable entre 2010 et 2012 (37%). Par comparaison, le secteur de la construction ferroviaire est plus de 10 fois plus faible en termes de CA (FNTP 2015b), bien que sa part soit croissante (elle est passée de 2 à 3% entre 2010 et 2014).

L’activité des entreprises de construction routière a beaucoup changé selon la profession : alors que l’activité d’hier se constituait majoritairement de projets neufs, avec la maturation de notre réseau routier et du maillage du territoire, l’entretien devient une part toujours plus importante de l’activité. Selon la FNTP (FNTP 2013), le CA se répartissait en 2012 à parts égales entre construction neuve et entretien, chiffres qui se sont maintenus en 2014 (FNTP 2015b) mais qui ont changé sensiblement en 2015 avec 70% du CA en entretien et grosses réparations contre 30% en travaux neufs (USIRF 2017). Par comparaison, le secteur de la construction ferroviaire ne représente que 2.5% du CA des TP, dont 1/3 en travaux neufs et 2/3 en travaux d’amélioration et d’entretien (FNTP 2015a). En termes d’activité par type d’entreprise, les chiffres 2014 semblent indiquer une sur-représentativité de l’entretien routier (plus de 45% du CA) par rapport à la construction neuve chez les TPE, bien qu’il faille vérifier ces faits sur d’autres années (voir Annexe 50). Sur 2014, il n’y a pas de corrélation nette entre effectifs des entreprises de construction routière et importance de l’entretien routier par rapport à la construction routière neuve.

En euros courants, le CA des travaux en métropole a globalement augmenté entre 1999 et 2008 (Annexe 49. Depuis, le secteur stagne (régression sur 2009 et 2010), avec une légère reprise en 2013 qui ne semble pas s’être maintenue depuis (voir Annexe 49).

ii/ Gestionnaires publics de l’entretien routier

La somme des dépenses publiques pour la routes et les voiries en 2013 (État + Bloc communal + Départements + autoroutes concédées) s’élevait à 18.4 Mds€, répartis entre section de fonctionnement et section d’investissement (USIRF 2015).

Dotation de l’État

Il existe une certaine adéquation entre population régionale et chiffre d'affaire des travaux routiers, avec des différences n'excédant guère les 4% (voir Annexe 48). Des indicateurs intéressants pourraient être calculés en croisant CA routiers et, d'une part trafics régionaux, d'autre part linéaires routiers régionaux (voire également richesse territoriale si de telles données étaient accessibles). Cela permettrait de mettre en évidence les politiques de répartition des budgets routiers, bien qu'il faille probablement segmenter par types de réseaux afin de faire ressortir des informations plus représentatives.

Part de l'entretien dans le budget routier

Au sein des collectivités, le budget routier doit être ventilé sur plusieurs postes de dépenses. En France, on peut considérer que dans ce budget (calculs basés sur des chiffres de la (FNTP 2015b)) :

- 40% est dévolu à l'exploitation et l'entretien courant (dont la moitié en charges de personnel)
- 30% est affecté aux grosses réparations, qui visent au maintien de la valeur patrimoniale
- 30% est alloué travaux de modernisation et de développement du réseau

Ce budget est consacré à des dépenses en matériaux et machines, et à la masse salariale (salaires et charges sociales), en sus des frais de structures (amortissements et autres) et autres. En postulant que l'investissement en resurfacement permet de diminuer la valeur de l'IRI de la route et donc les consommations véhiculaires associées, plus il y a de dépense en resurfacement, moins il y a de dépenses en carburant, pneumatiques et entretien des véhicules, et donc moins il y a d'activité dans ces secteurs, donc de valeur ajoutée et également de collectes de taxes.

iii/ Gestionnaires privés

Quand le gestionnaire est privé, il aura souvent d'autres charges financières comme le remboursement d'emprunts, et diverses taxes (selon statut) qui entreront dans les finances publiques : impôt sur les bénéfices et contribution économique territoriale (CET), composée de la cotisation foncière des entreprises (CFE) et de la cotisation sur la valeur ajoutée des entreprises (CVAE), cette dernière étant due uniquement par les entreprises réalisant plus de 500 000 euros de chiffre d'affaires.

D/ Production et emploi

Sur une population française active de 28.6 millions en France métropolitaine, la route emploierait directement et indirectement 8% des français : directement via la construction et l'entretien des routes (0.5%) et la construction automobile (0.70%), indirectement par la production des matières premières et services (1.3%), par l'usage de l'automobile (2.3%), et plus généralement par le secteur du transport routier (3.5%). En effet selon l'USIRF (2016), la route représente 2 300 000 emplois, dont 315 000 liés aux matières premières et aux services, 226 000 à l'industrie automobile, 635 000 à l'usage de l'automobile (vente, réparation, assurances, auto-école...), 985 000 aux transports (marchandises, voyageurs, police, santé, administration...) et 127 000 à la construction et l'entretien des routes.

Plus particulièrement sur le secteur routier, selon la FNTP, les emplois en purs travaux routiers en 2014 se montaient à 86 500 au total en 2014, dont 2/3 d'ouvriers (i.e. « compagnons »), 23% d'employés, techniciens et agents de maîtrise (i.e. « ETAM »), et 10% d'Ingénieurs Assimilés Cadres. Entre 2013 et 2014, les chiffres de la FNTP font part d'une réduction des effectifs de plus de 4% soit 3 709 emplois, réduction équilibrée sur les trois types d'emplois dont les ratios restent donc stables. Cela représente une perte de 2500 emplois d'ouvriers routiers en un an. Dans l'ensemble des TP, on a une baisse des effectifs de 3% entre 2013 et 2014, soit 7742 emplois, dont presque de 50% dans le secteur routier.

Comme on l'a évoqué pour le chiffre d'affaire, un regain d'activité en entretien augmente les emplois dans la construction routière, mais pourrait réduire l'emploi lié à l'entretien des voitures, à l'industrie pétrolière, et à l'industrie du pneumatique en particulier. Il n'existe a priori pas de chiffrage de ces effets, et un des objectifs de ce travail est de quantifier les effets de levier de la fréquence de resurfaçage sur les autres secteurs, afin de sortir des modèles macroéconomiques monosectoriels classiques.

Plus largement et plus généralement, une route en bon état pourrait accroître la performance des services publics utilisateurs de l'infrastructure, comme les ambulances, le ramassage scolaire, etc., ce qui a un effet sur l'économie également (voir les impacts de l'entretien routier sur les usagers de la route en 4.2.1).

L'effet de l'entretien sur les usagers pourrait aussi se traduire par un meilleur accès à l'emploi (car coûts d'utilisation plus faibles de la route, donc dépenses directes en termes d'utilisation du véhicule et gains en termes de temps). Cet accès facilité à l'emploi pourrait avoir un impact sur le chômage, donc sur les aides sociales alloués et sur le bien-être (BE) de la population comme vu auparavant. Côté entreprise, une meilleure accessibilité se traduit en accès aux compétences, ce qui est aussi bénéfique économiquement pour l'entreprise.

4.2.2.4 Environnement

Bien que l'économie n'ait pas de définition consensuelle, nous dirons qu'elle est une science sociale qui étudie la production, la répartition, la distribution et la consommation des richesses d'une société¹⁷⁷. Le principe général qui sous-tend l'économie, en particulier pour les ressources limitées ou rares, est celui de la rentabilité. Elle consiste à consommer un minimum de moyens en vue de réaliser un maximum de profits¹⁷⁸. L'économie de l'environnement inclut dans ses concepts importants la monétarisation des externalités environnementales, de manière à intégrer ces coûts indirects dans le système économique. Nous avons déjà parlé de monétarisation des effets socioéconomiques que l'on aurait pu considérer comme environnementaux précédemment : celle des émissions polluantes ou du bruit par exemple. Cette section se concentre sur les enjeux environnementaux de l'entretien des routes en dehors de ceux impactant directement la santé des riverains que nous avons déjà traités. Nous présentons l'importance socioéconomique de ces impacts.

A/ Consommations de ressources non renouvelables

i/ Accès aux ressources : épuisement et criticité

L'accès aux ressources est un facteur économique stratégique primordial, largement étudié par les gouvernements de par le monde : le Département de l'Énergie aux USA (US DOE 2011), la Commission Européenne (Commission Européenne 2014) et le Gouvernement français (Ministère de l'Économie, de l'Industrie et du Numérique 2014) ont par exemple tous étudié la sensibilité de cet accès, notamment pour les ressources minières. Les risques relatifs à l'accès aux matériaux sont divers et vont de la pénurie de ressources géologiques à la volatilité des marchés.

De nombreuses ressources sont consommées à un rythme qualifié de non durable : leur consommation est trop rapide par rapport aux stocks connus (opacité des marchés), à leur éventuel rythme de régénération, et aux pratiques de recyclage, nécessitant à terme soit une substitution soit une baisse de consommation, et générant in fine une potentielle perte en termes de bien-être. L'ACV propose un

¹⁷⁷ <http://www.cnrtl.fr/definition/C3%A9conomie>

¹⁷⁸ <http://www.cnrtl.fr/definition/rentabilit%C3%A9/substantif>

indicateur selon une approche environnementale globale (ressources géologiques terrestres): l'épuisement des ressources naturelles en équivalent antimoine.

La notion classique de criticité des matériaux quant à elle intègre des caractéristiques d'importance économique, de substituabilité, de recyclage, ainsi que de risque d'approvisionnement (zone d'extraction instable ou approvisionnement monopolistique ou oligopolistique du point de vue national). La commission européenne a utilisé cette seconde approche, davantage géopolitique, afin de lister les matériaux sensibles à son échelle. Le Département de l'Énergie aux USA privilégie quant à lui une approche hybride, mêlant sensibilité géopolitique, sociale, et environnementale. Des échelles plus petites peuvent également être considérées par rapport à la problématique de consommation de ressources. Notamment dans le cas des « matériaux qui se transportent mal », i.e. leur transport coûtant financièrement et environnementalement cher par rapport au coût local de la matière première. C'est le cas par exemple des granulats, qui n'ont pas un équivalent antimoine important et peuvent pourtant poser des problèmes d'approvisionnement locaux.

ii/ Matières sensibles et entretien routier (Commission Européenne 2014)

La plupart des études gouvernementales souligne la criticité forte des terres rares¹⁷⁹ et d'autres métaux, que l'on retrouve par exemple (Barreau, Hossie, et Lutfalla 2013) dans les batteries électriques (lithium¹⁸⁰, graphite, lanthane, cérium, praséodyme, néodyme) et les aimants permanents des moteurs électriques (dysprosium, cobalt, néodyme, praséodyme, terbium, samarium, gadolinium, lanthane). Cela pourrait donc assombrir le tableau environnemental du futur du VE. Le cobalt (résistance à l'usure) est quant à lui utilisé dans les voitures (liste de la CE 2014). La dernière liste de la commission européenne contient 20 matières premières jugées critiques (2014), exclusivement des minéraux. La Chine se révèle le pays le plus influent pour l'approvisionnement mondial de ces matières. Les matières biotiques étudiées (dont le caoutchouc) ne présentent pas de criticité majeure selon l'analyse. Évidemment, la criticité d'un matériau évolue constamment selon les découvertes de nouveaux gisements financièrement intéressants à exploiter.

Parmi les matières premières à haute importance économique à criticité moyennement élevée pour l'UE (Commission Européenne 2014), on retrouve de nombreux métaux présents dans les véhicules routiers : l'aluminium (électronique, carcasse de voitures), la bauxite (Principal minerai permettant la production d'aluminium), le chrome, le fer, le manganèse (dans certaines batteries), le nickel, et le zinc (pneumatiques, alliages). Enfin, dans les autres matières premières critiques pour l'UE, on retrouve entre autres l'argile (ciment), le cuivre (véhicules, signalisation), le gypse, le calcaire (ciment), et le lithium (batteries).

La criticité est finement géographique comme nous l'avons évoqué précédemment. En effet, certains matériaux impactés par la fréquence d'entretien des routes, par exemple les granulats, ne sont pas « rares » du point de vue national mais peuvent l'être à l'échelle régionale : leur raréfaction se fait sentir en IdF comme en Aquitaine ou en Picardie¹⁸¹. Le pétrole consommé sous forme de carburants divers par les véhicules routiers comme pour les liants hydrocarbonés reste aussi une matière sensible, qui a

¹⁷⁹ Les terres rares sont un groupe de métaux aux propriétés voisines comprenant le scandium 21Sc, l'yttrium 39Y, et les quinze lanthanides.

¹⁸⁰ 6% du lithium exploité dans le monde est aujourd'hui consommé dans l'industrie des batteries de véhicules électriques et hybrides rechargeables, alors que le segment du VE est encore assez restreint et pourrait se développer rapidement (<http://www.avem.fr/actualite-voiture-electrique-lithium-et-terres-rares-5455.html>)

¹⁸¹ usinenouvelle.com/article/demain-les-granulats-vaudront-de-l-or.N139431

généralisé des pratiques d'exploitation largement discutables et que l'on soupçonne toujours d'être à l'origine de nombreux troubles politiques.

iii/ Compétition intersectorielle

De plus, la compétition d'utilisation des matériaux entre secteurs complexifie encore la vision des stocks que l'on peut avoir, avec des effets systémiques et particulièrement des boucles de rétroaction : l'offre et la demande façonnent les prix, de même que les stocks physiques (connus, supposés ou communiqués) et les coûts d'extraction. En effet, selon la loi d'offre et de la demande, si la demande augmente, la valeur du produit augmente. Ainsi, dépenser davantage en entretien pourrait avoir un impact sur les aménagements à autres vocations que le transport, tels que le logement, les espaces publics divers, etc.

À titre d'exemple¹⁸², en France, on consomme aujourd'hui environ 330 Mt de granulat par an (UNICEM et UNPG 2018), chiffre qui a baissé d'environ 35% en 10 ans. Le bâtiment est responsable de 22% de la consommation de granulats annuelle, quand les travaux publics consomment le reste (UNICEM et UNPG 2018). Les travaux routiers et ferroviaires, VRD, endiguement et autres représentent 57% des consommations, et les enrobés à eux-seuls 9% (UNICEM et UNPG 2018). La consommation totale représente 5t/hab.an, soit presque 14 kg/hab.jour. Environ 110 Mt sont utilisées dans la production de béton. La France doit donc s'approvisionner de presque d'1Mt de granulats chaque jour pour pourvoir aux besoins des travaux d'aménagement du territoire. Cette production provient à 36% de roches meubles, à 56% de roches massives (calcaire et granulats éruptifs à parts égales), et à près de 8% de granulats recyclés (UNICEM et UNPG 2018). Un kilomètre d'autoroute nécessite entre 20 et 30 000 tonnes de granulats, quand une route secondaire en nécessite 10 à 15 000t.

Avec la mondialisation, cette compétition sectorielle et nationale peut s'élargir à une compétition internationale et donc à des effets (géo)politiques. Cela peut aussi donner lieu à des jeux de marchés, par exemple en tablant sur la non-transparence des stocks (exemple du pétrole).

Dans le secteur routier, la composition des routes a suivi par le passé le cours du marché pétrolier par exemple : en fonction de sa fluctuation, les liants des couches d'assise étaient soit à base de pétrole soit des liants hydrauliques lorsque le marché pétrolier était haut.

iv/ Consommations française de matériaux routiers finaux et « pratiques environnementales »

La production française d'enrobés bitumineux s'élève à 32 Mt en 2015, dont 26 Mt à chaud, 4.5 Mt d'enrobés tièdes et 1.8 Mt d'enrobés froids (USIRF 2016a). Les émulsions de bitume pour l'enrobage et l'épandage représentent environ 780 kt en France (USIRF 2016a). 550 kt sont dédiées au répandage (20% en cures et scellement, 60% en ESU et 20% en couches d'accrochage) et 170 kt sont utilisées en enrobage, dont 70% en grave-émulsion et en béton bitumineux à froid, et 30% en ECF (USIRF 2016a). Les matériaux recyclés se montent quant à eux à 12 Mt (USIRF 2016a), en constante baisse depuis 2012 où ils culminaient à 14.6 Mt. Toutefois, le taux d'intégration des agrégats d'enrobés dans les nouveaux enrobés bitumineux est lui en constante hausse depuis 2010, passant de 7.3% en moyenne à 13.4% en 2015 (USIRF 2016a). Autre procédé en augmentation : le retraitement en place, doublant entre 2012 et 2015, en volume comme en surface, pour la technique à l'émulsion comme aux liants hydrauliques (USIRF 2016a). Les émissions des brûleurs quant à elles sont en baisse de 30% depuis le Grenelle de

¹⁸² <http://www.planete-tp.com/granulats-chiffres-cles-a763.html>

l'environnement, pour atteindre 12.41 kgCO₂eq/t d'enrobé produit. Toutes ces pratiques convergent vers une consommation plus faible de ressources naturelles.

v/ Synthèse

Nous venons d'expliquer les problématiques de ressources non renouvelables liées aux politiques de resurfaçage. La question environnementale des déchets y est liée, de même que celle-ci est liée à la pollution des milieux. Nous ne détaillerons pas plus avant ces questions des déchets, qui ne constituent pas un dommage à l'environnement en tant que tel mais plutôt une problématique à la confluence d'enjeux plus englobants. Néanmoins, des éléments sur la production de déchet des sous-systèmes de l'entretien routier peuvent être trouvés en Annexe 51.

B/ Services écosystémiques

Comme dit précédemment (3), l'entretien routier va principalement impacter les écosystèmes, et in fine les services écosystémiques par le changement climatique et la modification de la qualité de l'air, de l'eau et du sol. La notion de service écosystémique a été développée dans le cadre du MEA (Millennium Ecosystem Assessment 2005) comme vu précédemment. Les services écosystémiques sont de 4 types comme nous l'avons déjà dit (3.4.3.2). Les services support assurent le cycle des nutriments (recyclage des nutriments et de la nécromasse par la faune, la fonge et les bactéries), la production et préservation des sols, et les productions primaires. Les services d'approvisionnement génèrent aliments, eau douce, bois et fibres, matériaux énergétiques et autres. Les fonctions régulatrices maintiennent un équilibre dans le climat, le cycle de l'eau (purification de l'eau, inondations), et les maladies. Enfin, les services culturels peuvent être d'ordre esthétique, spirituels, éducatif/pédagogique, ou encore récréatif.

i/ Des fonctions naturelles au service du bien-être humain

Les fonctions supports sont à la base du fonctionnement des écosystèmes et à ce titre ont été évoquées dans l'approche écologique de ce chapitre (3.4.3.2). Les trois autres types de services sont plus directement reliés au bien-être humain et affectent à la fois des besoins primaires et des besoins supérieurs selon la classification de Maslow (4.1.3.1) : besoins physiologiques (alimentation, abri), sécurité, santé, et relations sociales. Ces quatre constituants du BE seraient le support des libertés individuelles, au sens de liberté de choix et d'action (Millennium Ecosystem Assessment 2005). La force des relations entre composantes du BE et catégories de services a été étudiée dans le cadre du MEA (Millennium Ecosystem Assessment 2005). Les besoins physiologiques dépendent en majeure partie de service d'approvisionnement en matières premières (aliments, matériaux de construction ou d'habillement, ressources énergétiques) et de services de régulation (qualité de l'air, de l'eau, régulation de l'érosion, du climat, purification de l'eau, régulation sanitaire (maladies et nuisibles)). La sécurité, qu'elle soit sécurité personnelle, sécurité d'accès aux ressources ou sécurité des catastrophes naturelles, dépend plus fortement des services de régulation, puis ensuite des services d'approvisionnement. La santé dépend plus fortement des services régulateurs, mais aussi de manière non négligeable des services culturels. Enfin, les relations sociales dépendent d'abord des services culturels, puis des autres services.

Le bon fonctionnement des écosystèmes a donc un effet direct sur le bien-être humain, mais aussi sur la pauvreté. Or, ce sont majoritairement les humains qui perturbent leur fonctionnement via l'artificialisation des milieux (changement de l'usage local des sols), l'introduction ou l'éradication d'espèces, les changements et l'utilisation des technologies, les intrants anthropiques (fertilisants agricoles, produits phytosanitaires, ou irrigation), et les consommations de ressources naturelles et

cultures. Ces déterminants directs des services écosystémiques sont eux-mêmes dépendants de grandes variables sociétales telles que la démographie, l'économie, la sociopolitique, les sciences et technologie, ainsi que de la culture et de la religion, tous étant à la fois des vecteurs indirects de changement des écosystèmes mais étant façonnés par les hommes, leur éthique et leurs conditions de vie (Millennium Ecosystem Assessment 2005).

De nombreux ouvrages ont étudié le lien entre les écosystèmes et le bien-être humain (par exemple, (Millennium Ecosystem Assessment 2005; Ash et al 2011)), qui sont représentés schématiquement en Annexe 52). L'approche économique de la biodiversité et des services liés aux écosystèmes dans la contribution à la décision publique a également été étudiée dans le cas spécifique de la France dans le rapport de Chevassus-au-louis (Chevassus-au-Louis et al. 2009).

ii/ Monétarisation des services écosystémiques

Par ses nombreux services écosystémiques, la nature est un facteur de production. Puisque la production humaine est ancrée dans un système économique monétaire, une façon d'optimiser l'utilisation des ressources naturelle pourrait être de donner une valeur aux écosystèmes ou aux services qu'ils rendent, et d'internaliser les coûts écosystémiques externes.

De nombreux travaux se sont penchés sur la question de la monétarisation des services écosystémiques : sa signification profonde, les méthodes possibles, des études de cas.

Une des difficultés de l'économie réside en la non-équivalence du prix et de la valeur. Le prix est « le montant monétaire qu'un acheteur est prêt à remettre à un vendeur pour l'acquisition d'un bien ou service et inversement qu'un vendeur est prêt à recevoir pour la cession d'un bien ou service ». La valeur d'un objet est liée aux services et plaisir qu'il apporte. Kant (1785) signalait déjà la signification profonde que renferme l'action de poser un prix sur quelque chose : cela rend la chose substituable. Une chose sans prix n'admet au contraire pas d'équivalent. Les théories capitalistes, par exemple la théorie des capitaux multiples, admet la nature comme double facteur de production. Le travail est un autre facteur de production. Or, il n'existe pas sans l'homme, dont l'existence dépend de la nature. L'importance de la nature dans l'économie dépasse donc son simple état de capital naturel (i.e. ensemble de ressources exploitables), puisqu'elle influe aussi sur le capital humain.

Les valeurs données par l'homme à la nature et en particulier aux services écosystémiques pourraient donc représenter plusieurs choses, par exemple la volonté humaine de conserver la nature par préférences sociales ou valeur morale, ou encore la valeur de la production humaine qui repose sur le fonctionnement d'un service écosystémique particulier.

La commission présidée par Chevassus-au-Louis en France sur le sujet a appliqué les conseils du MEA, comme « ne pas évaluer les services d'auto-entretien » du fait de leur nécessité pour les 3 autres types de service (double-compte), afin de proposer une monétarisation partielle des services écosystémiques, qu'ils soient dynamiques (i.e. résultant en un changement, comme la fixation du carbone) ou statiques (i.e. conservation d'un état comme le stock de carbone).

iii/ Entretien routier et services écosystémiques

Effets de la pollution routière

La pollution atmosphérique d'origine routière n'impacte pas que les riverains de l'infrastructure, mais présente également un enjeu économique plus global. Le niveau de polluants émis par le système routier va en partie dépendre de la fréquence d'entretien. Or, cette pollution va ensuite générer tout un ensemble de perturbation du fonctionnement des écosystèmes touchés, qui vont à leur tour se répercuter sur l'homme.

La pollution va modifier le système agraire : la composition de l'air et le pH des sols sont des facteurs de croissance de la végétation, donc des rendements et de la qualité nutritionnelle et sanitaire agricole. Les dépôts acides issus de l'échappement tels que les ions H^+ , SO_4^{2-} ou NO_3^- abaissent le pH des sols qui nécessite déjà naturellement en France d'être corrigé avec des amendements minéraux basiques afin de maintenir une activité biologique et une structure des sols bénéfiques aux cultures. Dans le même temps, les dépôts azotés accroissent le développement des plantes, qui vont puiser plus rapidement les éléments minéraux nécessaires à leur croissance, amplifiant ainsi l'acidification des sols. De même, l'ozone va réduire la photosynthèse, augmenter la respiration, et diminuer la croissance des plantes. Les effets de l'ozone sur les pertes de culture ont été monétarisés à plusieurs occasions. Rainer (2004) avance par exemple un coût d'environ 750€₂₀₁₁ par tonne de COVNM pour les dommages engendrés sur les cultures à l'échelle de l'UE.

La pollution routière peut aussi dégrader les habitats locaux et plus éloignés (selon le devenir des polluants) et la reproduction de certaines espèces, et par exemple des espèces pollinisatrices. La pollinisation – processus par lequel le pollen est déplacé depuis les anthères jusqu'aux stigmates des fleurs qui constitue le mode de reproduction des espèces de plantes à fleurs – joue un rôle majeur dans la production agricole alimentaire ou non (biomasse). Il existe plusieurs modes de pollinisation: par les animaux (majoritairement les insectes, plus précisément les lépidoptères, coléoptères, diptères, et hyménoptères), par anémogamie (transport du pollen par le vent), et l'hydrogamie (transport par l'eau). Or, plusieurs études ont montré le déclin planétaire des populations de pollinisateurs (Biesmeijer 2006; Potts et al. 2010). 640 espèces consommées par l'homme auraient un rendement dépendant de la pollinisation, ce qui représente 84% des espèces cultivées au niveau européen (Klein et al. 2007). Par exemple, nos melons dépendraient à 90% de l'activité des pollinisateurs. Nous ne pourrions plus consommer ces variétés si les insectes pollinisateurs venaient à disparaître. La Conférence des Parties n°5 (COP5) avait lancé une Initiative internationale pour la conservation et l'utilisation durable des pollinisateurs (Décision V/5, section II) en 2000. En France, les travaux d'EFESE (Évaluation Française des Écosystèmes et des Services Écosystémiques) initiés en 2012 annoncent une première évaluation économique de la valeur du service de pollinisation pour le pays : elle serait comprise entre 2.3 et 5.3 milliards d'euros 2010 pour l'impact sur la production alimentaire humaine (5.2 à 12% de cette production totale dépendrait des écosystèmes). L'évaluation économique des services de pollinisation est basée sur deux indicateurs principaux : la valeur monétaire du service, et un indice de vulnérabilité des cultures confrontées à un déclin des pollinisateurs (CGDD 2016a).

De la même façon, en termes de contrôle biologique, les bioagresseurs de cultures peuvent se surdévelopper si leurs prédateurs – les auxiliaires – disparaissent. Cela signifie dans ce cas la diminution plus ou moins importante des rendements et in fine de la production à défaut d'une augmentation de surfaces cultivées, augmentation qui apparaît difficilement envisageable au vu de l'artificialisation déjà trop importante du territoire eu égard à des considérations de soutenabilité.

Un insecte peut disparaître dans une chaîne alimentaire et provoquer potentiellement de fortes modifications de productions agricoles. Néanmoins, nous sommes peu à même d'anticiper l'ampleur des conséquences, justement du fait de l'aspect systémique et interconnecté de ces changements : la question de la potentielle non-linéarité entre modifications écosystémiques et leurs effets est aujourd'hui critique pour le bien-être humain et peut-être également sa survie.

Effets du changement climatique

Les principaux impacts du changement climatique sur le bien-être humain en France seront les suivantes : la modification des rendements agricoles et de la production halieutique, ainsi que

l'accroissement des événements climatiques extrêmes en fréquence et intensité, tout cela à cause de modifications des écosystèmes et donc des services qu'ils rendent.

Concernant les troubles à l'alimentation humaine, prenons l'exemple central des coraux. Les récifs coralliens sont des zones de reproduction pour les poissons. Or, ils disparaissent peu à peu du fait du changement climatique combiné à l'acidification des océans (principalement due à la pollution routière dans le cadre de l'entretien routier) (Hoegh-Guldberg et al. 2007), ce qui entraîne une réduction des populations et donc de la pêche à moyens égaux, entraînant à son tour de nouvelles pratiques de pêche néfastes pour les écosystèmes, comme le chalutage en eau profonde (récemment interdite par l'UE dans les eaux communautaires) où de larges filets lestés viennent draguer les fonds marins, endommageant les habitats et entraînant la mort plus ou moins rapide des « prises accessoires ». Aujourd'hui, toutes les espèces de poisson entrant dans l'alimentation humaine sont en surexploitation : la pêche ne suffit déjà plus à l'alimentation en poisson, et l'on consomme environ 50% de poisson d'élevage. Mais les ressources halieutiques ne sont pas les seules menacées. À titre d'exemple, un rapport commandé par le pentagone avançait les quelques chiffres suivants comme impacts au changement climatique (Schwartz et Randall 2006) : baisse de pluie donc réduction de 15% de productivité d'herbe, engendrant -10% de volume d'eau potable disponible, et -12% du poids du bétail conduisant entre autres à -30% de production de lait de vaches.

L'exposition aux événements climatiques extrêmes, si l'on se restreint aux frontières françaises, concernerait principalement les épisodes caniculaires, les inondations, et les tempêtes, impliquant une moins-value en termes de bien-être. Mais les conséquences de ces événements doivent être considérées à une échelle plus large, puisque certaines crises étrangères pourraient nous toucher, comme l'a illustré l'impact du tsunami sur la centrale nucléaire de Fukushima au Japon dont le nuage radioactif s'est diffusé à large échelle. Évoquons plus largement les risques géopolitiques d'accès aux ressources. Les ressources alimentaires risquent de devenir toujours moins équitablement réparties avec des zones sèches toujours plus arides en particulier. La modification de production et donc d'accès aux ressources, qu'elles soient alimentaires ou non, ainsi que les événements climatiques extrêmes pourraient provoquer un exode climatique par détresses alimentaires, sanitaires et sécuritaires. Selon l'économiste Sachs (2007), des centaines de millions d'êtres humains pourraient devoir migrer rien que par le fait de la montée du niveau des océans d'ici à 2050, devenant alors « réfugiés climatiques ».

Toutes les modifications climatiques nécessiteront de l'homme une adaptation plus ou moins forte selon sa situation géographique mais aussi financière. Les études d'adaptation ou de résilience au changement climatiques fleurissent d'ores et déjà dans la littérature grise comme académique. Sur la question de l'entretien routier, l'adaptation peut se voir à deux niveaux : celle des hommes en général, face aux modifications que nous venons d'évoquer, mais également plus précisément l'adaptation des infrastructures de transport et en particulier des routes : le climat est un des deux facteurs de dégradation les plus importants des infrastructures routières avec le trafic. Chaque route étant unique, il est déjà difficile actuellement de dégager des lois de comportement des structures. L'incertitude devient encore supérieure en tenant compte d'une modification des variables climatiques sur les décennies prochaines. De plus, la disponibilité des routes et le risque d'exploitation pourraient également changer fortement avec les épisodes climatiques, comme l'illustre l'impact des inondations de l'autoroute A10 en juin 2016. Mais on peut penser que les comportements de mobilité seront également amenés à changer, ne serait-ce qu'à la lumière de considérations énergétiques et plus généralement de ressources, donc les dégradations routières également, voire l'objet routier lui-même.

5 Conclusion

Le système routier, et particulièrement l'intensité du resurfaçage des infrastructures, a des effets directs et indirects sur toutes les phases de cycle de vie de la route et sur tous les éléments du système que nous nous sommes attachés à qualifier ici. Ces effets concernent d'abord les grandes variables d'état géophysiques de la planète, principalement via les phénomènes de changement climatique auxquels vont contribuer à la fois la chaîne de production des travaux d'entretien mais aussi celle de la consommation des véhicules, dont l'intensité sera modulée par l'état de la route, elle-même conditionnée par la politique d'entretien. L'évolution de ces variables d'état impliquera des modifications du système écologique, dont les enjeux ont été détaillés dans la deuxième partie du chapitre. Ces deux strates, géophysiques et écologiques, viendront à leur tour impacter le fonctionnement socioéconomique, détaillé en partie 3. Ce fonctionnement, ainsi que les objectifs de société, sont étudiés à la lumière de plusieurs types de documents : une littérature académique portant principalement sur l'éthique sociale et environnementale ainsi que les économies du bien-être et du bonheur, puis les textes de référence de vision sociale française – déclaration des droits de l'homme, charte de l'environnement. Cette étude nous permet de faire ressortir des indicateurs de performance de l'entretien routier pressentis pour une méthode d'évaluation durable des politiques. Au-delà de cet objectif opérationnel, ce chapitre est une tentative de présentation exhaustive des impacts systémiques de l'entretien des routes, qui permet de saisir les phénomènes les plus importants pour l'homme qui se jouent avec les politiques d'entretien des routes. Il met en évidence les différents impacts par partie prenante, ce qui débouchera – dans le prochain chapitre – sur le développement d'une méthode d'évaluation quantitative intégrée des politiques de resurfaçage selon un jeu d'indicateurs couvrant les principaux impacts mis en évidence dans ce chapitre.

6 Bibliographie

ADETEC Déplacements. 2012. « Le coût réel de la voiture en 2012 ». ADETEC Déplacements. www.adetec-deplacements.com/cout_reel_voiture_3p.pdf.

AFNOR. 2000. « NF S31-119-2 Décembre 2000 Acoustique - Caractérisation in situ des qualités acoustiques des revêtements de chaussées - Mesurages acoustiques au passage - Partie 2 : procédure véhicule maîtrisé ». <https://www.boutique.afnor.org/norme/nf-s31-119-2/acoustique-caracterisation-in-situ-des-qualites-acoustiques-des-revetements-de-chaussees-mesurages-acoustiques-au-passage-/article/762488/fa106697>.

———. 2002. « NF EN ISO 11819-1 Mars 2002 Acoustique - Mesurage de l'influence des revêtements de chaussées sur le bruit émis par la circulation - Partie 1 : méthode statistique au passage ». <https://www.boutique.afnor.org/norme/nf-en-iso-11819-1/acoustique-mesurage-de-l-influence-des-revetements-de-chaussees-sur-le-bruit-emis-par-la-circulation-partie-1-methode-stat/article/642442/fa117372>.

AFSSET. 2007. « Bruit & santé - Effets biologiques et sanitaires du bruit - Comment lutter contre le bruit ? » AFSSET. <https://www.anses.fr/fr/system/files/AP2003et1000Sy.pdf>.

———. 2009. « Pollution par les particules dans l'air ambiant - Synthèse des éléments sanitaires en vue d'un appui à l'élaboration de seuils d'information et d'alerte du public pour les particules dans l'air ambiant ». AFSSET. <https://www.anses.fr/en/system/files/AIR2007et0006Ra.pdf>.

Araus, José Luis, et Gustavo A. Slafer, éd. 2011. *Crop stress management and global climate change*. CABI climate change series 2. Wallingford, Oxfordshire, UK ; Cambridge, MA: CABI.

Arnsperger, Christian, et Philippe Van Parijs. 2007. *Éthique économique et sociale*. Paris: La Découverte.

Ash, N, et Al. 2011. « Les Écosystèmes et le Bien-être humain. Un manuel pour les praticiens de l'évaluation ». Washington D.C.: Island Press.

Aumont, Bernard. 2005. « Production d'ozone troposphérique et régimes chimiques ». Créteil: Laboratoire Interuniversitaire des Systèmes Atmosphériques. http://www.lisa.u-pec.fr/~aumont/contenu/enseignement/M2_SGE/cours_O3prod.pdf.

Barreau, Blandine, Gaëlle Hossie, et Suzanne Lutfalla. 2013. « Approvisionnements en métaux critiques - Un enjeu pour la compétitivité des industries française et européenne ». N°2013-04. Document de travail. Commissariat général à la stratégie et à la prospective. http://archives.strategie.gouv.fr/cas/system/files/dt_métaux_critiquesvalbbsl_le_09-07final.pdf.

Bauwens, Alexandra, Catherine Sohier, et Aurore Degré. 2013. « Impacts du changement climatique sur l'hydrologie et la gestion des ressources en eau du bassin de la Meuse (synthèse bibliographique) ». *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, Le Point sur, , n° 17(1): 76-86.

Bell, James R., Lynda Alderson, Daniela Izera, Tracey Kruger, Sue Parker, Jon Pickup, Chris R. Shortall, Mark S. Taylor, Paul Verrier, et Richard Harrington. 2015. « Long-Term Phenological Trends, Species Accumulation Rates, Aphid Traits and Climate: Five Decades of Change in Migrating Aphids ». Édité par Ken Wilson. *Journal of Animal Ecology* 84 (1): 21-34. <https://doi.org/10.1111/1365-2656.12282>.

Bentham, Jeremy. 1781. *An Introduction to the Principles of Morals and Legislation*.

Bérenghier, Michel, et al. 2001. « Influence de la couche de roulement de la chaussée sur le bruit du trafic routier ». 4. Cftr - info - Notes d'information. Comité français pour les techniques routières. <http://portail.documentation.developpement-durable.gouv.fr/dtrf/pdf/pj/Dtrf/0002/Dtrf-0002693/DT2693.pdf?openerPage=notice>.

Biesmeijer, J. C. 2006. « Parallel Declines in Pollinators and Insect-Pollinated Plants in Britain and the Netherlands ». *Science* 313 (5785): 351-54. <https://doi.org/10.1126/science.1127863>.

Bitelli, Gabriele, Andrea Simone, Fabrizio Girardi, et Claudio Lantieri. 2012. « Laser Scanning on Road Pavements: A New Approach for Characterizing Surface Texture ». *Sensors* 12 (12): 9110-28. <https://doi.org/10.3390/s120709110>.

Branchu, P, A.L Badin, B Béchet, L Eisenlohr, T Le Priol, F Marseille, et E Trielli. 2013. « Pollution d'origine routière et environnement de proximité ». *Vertigo*, n° Hors Série (février).

Can, A., G. Guillaume, et B. Gauvreau. 2015. « Noise Indicators to Diagnose Urban Sound Environments at Multiple Spatial Scales ». *Acta Acustica United with Acustica* 101 (5): 964-74. <https://doi.org/10.3813/AAA.918891>.

CGDD. 2012. « Les véhicules utilitaires légers au 1er janvier 2011 ». n°310. Chiffres & statistiques. Commissariat Général au Développement Durable. http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/fileadmin/documents/Produits_editoriaux/Publications/Chiffres_et_statistiques/2012/Chiffres%20et%20stats%20310%20V%C3%A9hicules%20utilitaires%20%C3%A9gers%20au%201%202011%20-%20avril%202012.pdf.

———. 2015. « Chiffres clés du transport - Édition 2015 ». Commissariat Général au Développement Durable. http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/fileadmin/documents/Produits_editoriaux/Publications/Reperes/2015/reperes-transport-ed2015-b.pdf.

———. 2016a. « Le service de pollinisation ». Analyse.

———. 2016b. « Vingt-cinq années de transport intérieur de voyageurs ». Etudes & Documents. Commissariat Général au Développement Durable. http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/fileadmin/documents/Produits_editoriaux/Publications/Etudes_et_documents/2016/ed148-transport-interieur-voyageurs-mai-2016.pdf.

Chandra, Satish. 2004. « Effect of Road Roughness on Capacity of Two-Lane Roads ». *Journal of Transportation Engineering* 130 (3): 360-64. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(2004\)130:3\(360\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2004)130:3(360)).

Chevassus-au-Louis, Bernard, Jean-Michel Salles, Sabine Bielsa, Dominique Richard, Gilles Martin, et Jean-Luc Pujol. 2009. « Approche économique de la biodiversité et des services liés aux écosystèmes - Contribution à la décision publique ». Rapports et documents. Centre d'Analyse Stratégique. <http://www.ladocumentationfrancaise.fr/var/storage/rapports-publics/094000203.pdf>.

CITEPA. 2016a. « Mesures primaires de réduction des émissions de NOx ». <https://www.citepa.org/fr/air-et-climat/techniques-de-reduction/mesures-primaires-de-reduction-des-emissions-de-nox>.

———. 2016b. « Mesures secondaires de réduction des émissions de NOx ». <https://www.citepa.org/fr/air-et-climat/techniques-de-reduction/mesures-secondaires-de-reduction-des-emissions-de-nox>.

- . 2016c. « Dioxyde de soufre - SO₂ ». <https://www.citepa.org/fr/air-et-climat/polluants/aep-item/dioxyde-de-soufre>.
- . 2016d. « Oxydes d'azote - NO_x ». <https://www.citepa.org/fr/air-et-climat/polluants/aep-item/oxydes-d-azote>.
- . 2016e. « Pollution photochimique ». <https://www.citepa.org/fr/air-et-climat/phenomenes/pollution-photochimique>.
- CNR. 2017. « Evolution du prix du gazole et incidence sur le prix de revient situation au 28 février 2017 ».
- Coffin, Alisa W. 2007. « From Roadkill to Road Ecology: A Review of the Ecological Effects of Roads ». *Journal of Transport Geography* 15 (5): 396-406. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2006.11.006>.
- Commission Européenne. 2014. « The European Critical Raw Materials review ». http://europa.eu/rapid/press-release_MEMO-14-377_en.htm.
- Cour des comptes. 2015. « Les politiques publiques de lutte contre la pollution de l'air ». Cour des comptes. <https://www.ccomptes.fr/Publications/Publications/Les-politiques-publiques-de-lutte-contre-la-pollution-de-l-air>.
- Cour des Comptes. 2015. « Les politiques publiques de lutte contre la pollution de l'air ». <https://consultation.securite-routiere.gouv.fr/media/default/0001/01/47c34b26daa6573ba898b835dda132307adac465.pdf>.
- Davoine, Lucie. 2009. « L'économie du bonheur: Quel intérêt pour les politiques publiques ? » *Revue économique* 60 (4): 905. <https://doi.org/10.3917/reco.604.0905>.
- Descornet. 1984. « Mode opératoire - Mesure du bruit de contact pneu/route ». Centre de Recherches Routières. <http://www.brrc.be/publications/mf/mf5084.pdf>.
- Desportes, Marc, et Antoine Picon. 1997. *De l'espace au territoire: l'aménagement en France XVIe - XXe siècles*. Paris: Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées.
- Doisy. 2007. « Pérennité des performances acoustiques des revêtements ». février. http://media.lcpc.fr/ext/pdf/sem/2007_bruit_05.pdf.
- Ducharne, Agnès, Sylvain Théry, Pascal Viennot, Emmanuel Ledoux, Eric Gomez, et Michel Déqué. 2003. « Influence du changement climatique sur l'hydrologie du bassin de la Seine ».
- Easterlin, R. 1974. « Does Economic Growth Improve the Human Lot? Some Empirical Evidence ». In: David, R. and Reder, R., Eds., *Nations and Households in Economic Growth: Essays in Honor of Moses Abramovitz*. New York: Academic Press. <http://huwdixon.org/teaching/cei/Easterlin1974.pdf>.
- . 2003. « Building a Better Theory of Well-being ». In *Proceedings*. University of Milano-Bicocca. <http://www-bcf.usc.edu/~easterl/papers/BetterTheory.pdf>.
- Edenhofer, Ottmar, Ramon Pichs-Madruga, Youba Sokona, et al. 2014. « Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change ». Fifth assessment report. United Nations report - IPCC - Working group III contribution to AR5. http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_and_data_reports.shtml.
- Elad, Yigal, et Ilaria Pertot. 2014. « Climate Change Impacts on Plant Pathogens and Plant Diseases ». *Journal of Crop Improvement* 28 (1): 99-139. <https://doi.org/10.1080/15427528.2014.865412>.

Eriksson, Lina, James Mahmud Rice, et Robert E. Goodin. 2007. « Temporal Aspects of Life Satisfaction ». *Social Indicators Research* 80 (3): 511-33. <https://doi.org/10.1007/s11205-006-0005-z>.

European Environment Agency. 2015. *L'environnement en Europe: état et perspectives 2015 : synthèse*. Luxembourg: Office des publications de l'Union européenne. <http://dx.publications.europa.eu/10.2800/4738>.

E&Y. 2016. « L'impact socio-économique du rechapage poids lourd en France et en Europe - L'économie circulaire du pneu en danger ». [http://www.ey.com/Publication/vwLUAssets/ey-l-impact-socio-economique-du-rechapage-poids-lourd-en-france-et-en-europe/\\$FILE/ey-l-impact-socio-economique-du-rechapage-poids-lourd-en-france-et-en-europe.pdf](http://www.ey.com/Publication/vwLUAssets/ey-l-impact-socio-economique-du-rechapage-poids-lourd-en-france-et-en-europe/$FILE/ey-l-impact-socio-economique-du-rechapage-poids-lourd-en-france-et-en-europe.pdf).

Fangmeier, A, L De Temmerman, et al. 1999. « Effects on nutrients and on grain quality in spring wheat crops under elevated CO₂ concentration and stress conditions in the Europea, multiple-site experiment "ESPACE-wheat" ». *European Journal of Agronomy* 10: pp 215-229.

Fletcher, R.J, L Ries, J Battin, et A.D Chalfoun. 2007. « The role of habitat area and edge in fragmented landscapes : definitively distinct or inevitably intertwined ? » *Canadian Journal of Zoology* 10 (85): 1017–1030.

FNTF. 2013. « Travaux publics - Recueil de statistiques 2012 ».

———. 2015a. « Les travaux publics, rapport d'activité 2015 ». n°73. TP Informations. http://www.fntp.fr/upload/docs/application/pdf/2015-12/recueil_de_statistiques_2014_final_4_complet.pdf.

———. 2015b. « Travaux publics - Recueil de statistiques 2014 ». http://www.fntp.fr/upload/docs/application/pdf/2016-05/recueil_statistiques_2014.pdf.

Forman, Richard T. T., et Lauren E. Alexander. 1998. « Roads and Their Major Ecological Effects ». *Annual Review of Ecology and Systematics* 29 (1): 207-31. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.29.1.207>.

Fourès, Jean-Marc, et Pierre Pech. 2015. « Prendre les espaces de temps pour maîtriser les impacts diffus générés par les grandes infrastructures de transport terrestre (ITT) sur la biodiversité ». *Vertigo*, n° Volume 15 Numéro 2 (septembre). <https://doi.org/10.4000/vertigo.16620>.

Gautier. 2006. « La lutte contre le bruit de roulement ». janvier. http://www.arts-et-metiers.net/pdf/JeanLucGautier_1_16.pdf.

Hamdad, Hichem. 2018. *Recherche d'une description optimum des sources et systèmes vibroacoustiques pour la simulation du bruit de passage des véhicules automobiles*. Le Mans. <http://www.theses.fr/2018LEMA1032>.

Hamet, Jean-François. 2003. « Les mécanismes de génération de bruit de roulement et l'influence des caractéristiques de chaussée ». *Acoustique & Techniques*, n° 32. http://www.infobruit.com/revues/78_09956.PDF.

Headay, Bruce, et Alexander J Wearing. 1992. *Understanding Happiness: A Theory of Subjective Well-Being*. Melbourne: Longman Cheshire.

Hoegh-Guldberg, O., P. J. Mumby, A. J. Hooten, R. S. Steneck, P. Greenfield, E. Gomez, C. D. Harvell, et al. 2007. « Coral Reefs Under Rapid Climate Change and Ocean Acidification ». *Science* 318 (5857): 1737-42. <https://doi.org/10.1126/science.1152509>.

- Iacob, Marcela. 2016. *La fin du couple*. Les essais. Paris: Stock.
- INERIS. 2011. « Dioxyde de soufre (SO₂) ». Fiche de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques.
- INRS. 2016. « Dioxyde de soufre ». Base de données FICHES TOXICOLOGIQUES n°41. Fiche toxicologique.
- INSEE. 2014. « Tableaux de l'Économie Française - Édition 2014 - Pétrole - Charbon ». INSEE RÉFÉRENCES. <https://www.insee.fr/fr/statistiques/1288394?sommaire=1288404>.
- Kant, Emmanuel. 1785. *Fondements de la métaphysique des moeurs*.
- Klein, A.-M., B. E Vaissiere, J. H Cane, I. Steffan-Dewenter, S. A Cunningham, C. Kremen, et T. Tscharntke. 2007. « Importance of Pollinators in Changing Landscapes for World Crops ». *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 274 (1608): 303-13. <https://doi.org/10.1098/rspb.2006.3721>.
- Laita, A., J. S. Kotiaho, et M. Mönkkönen. 2011. « Graph-Theoretic Connectivity Measures: What Do They Tell Us about Connectivity? » *Landscape Ecology* 26 (7): 951-67. <https://doi.org/10.1007/s10980-011-9620-4>.
- Le Maître, Hélène. 2014. « Monétarisation des impacts sur le bruit des projets routiers ». Rapport d'étude. Céréma. http://www.infra-transport-materiaux.cerema.fr/IMG/pdf/1402w-rapport_monetarisation_bruit-2.pdf.
- Lelong, et Michelet. 2001. « Passengers cars. Power unit and tyre-road noise, driving behaviour: what are the stakes? » In . http://www.inrets.fr/ur/ite/publications/publications-pdf/Lelong-publi/emission_synthese.pdf.
- Leurent, Fabien. 2013. « Chapitre 4 - L'équipement territorial au prisme de l'éco-conception : quels principes et quelles méthodes pour l'aménagement et le transport? » In *Eco-conception des ensembles bâtis et des infrastructures*, pp 57-105. Presses de l'École des mines.
- Lopes, M.S, et C.H Foyer. 2011. « The impact of high CO₂ on plant abiotic stress tolerance ». In *Crop stress management and global climate change*, pp 85-103.
- Lundberg, Jakob, et Fredrik Moberg. 2003. « Mobile Link Organisms and Ecosystem Functioning: Implications for Ecosystem Resilience and Management ». *Ecosystems* 6 (1): 0087-0098. <https://doi.org/10.1007/s10021-002-0150-4>.
- Manney, Gloria L., Michelle L. Santee, Markus Rex, Nathaniel J. Livesey, Michael C. Pitts, Pepijn Veefkind, Eric R. Nash, et al. 2011. « Unprecedented Arctic ozone loss in 2011 ». *Nature* 478 (7370): 469-75. <https://doi.org/10.1038/nature10556>.
- Marshall, Alfred. 1890. *Principles of Economics*.
- Maslow, Abraham. 1943. *A theory of Human motivation*.
- MEDDE. 2014. « Chiffres clés du transport - Edition 2014 ». http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/fileadmin/documents/Produits_editoriaux/Publications/Reperes/2014/reperes-chiffres-cles-transport-ed2014-v2.pdf.
- Millennium Ecosystem Assessment, éd. 2005. *Ecosystems and human well-being: synthesis*. Washington, DC: Island Press.

Ministère de l'Économie, de l'Industrie et du Numérique. 2014. « L'ECONOMIE CIRCULAIRE, OU LA COMPETITION POUR LES RESSOURCES - Etude annuelle 2014 du Conseil Général de l'Économie ».

Musy, André. 2005. *Cours d'Hydrologie Générale de l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne*. Lausanne, Suisse. <http://echo2.epfl.ch/e-drologie/chapitres/chapitre1/main.html>.

Naess, Arne. 2008. « The shallow and the deep, long-range ecology movement. A summary* ». *Inquiry* 16 (août): 95-100. <https://doi.org/10.1080/00201747308601682>.

Ng, Y.-K. 2003. « From Preferences to Happiness: Towards a More Complete Welfare Economics ». *Social Choice and Welfare*, 2003, 20 édition.

OMS. 2016. « Qualité de l'air ambiant et santé ». N°313. Aide-mémoire.

Organisation for Economic Co-operation and Development Staff. 2008. *Perspectives de l'Environnement de l'OCDE à l'horizon 2030. Chapitre 9 - Biodiversité*. Washington; Biggleswade: Organization for Economic Cooperation & Development Turpin Distribution Services Limited [distributor. <https://www.oecd.org/fr/env/ressources/43901839.pdf>.

OVE. 2017. « TCO Scope 2017 ». *Les Editions de l'OBservatoire du Véhicule d'Entreprise*, 2017.

Paskoff, Roland. 1998. « Conséquences possibles sur les milieux littoraux de l'élévation du niveau de la mer prévue pour les prochaines décennies ». *Annales de Géographie* 107 (600): 233-48. <https://doi.org/10.3406/geo.1998.20847>.

Petit, J.R., et al. 1999. « Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica ». *Nature*, n° 399 (juin): 429-36. <https://doi.org/10.1038/20859>.

Pigou, Arthur. 1932. *The Economics of Welfare*. Macmillan and Co. London. <http://www.econlib.org/library/NPDBooks/Pigou/pgEW.html>.

Pinet, Michel, et Marc D'Aubreby. 2015. « Financement des infrastructures et transport routier - Rapport final ». Rapport n° 010144-01. CGEDD. <http://www.actu-environnement.com/media/pdf/news-25009-rapport-cgedd-financement-infrastructures-transport.pdf>.

Potts, Simon G., Jacobus C. Biesmeijer, Claire Kremen, Peter Neumann, Oliver Schweiger, et William E. Kunin. 2010. « Global Pollinator Declines: Trends, Impacts and Drivers ». *Trends in Ecology & Evolution* 25 (6): 345-53. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2010.01.007>.

Prades, José A. 1995. *L'éthique de l'environnement et du développement*. 1. éd. Que sais-je? 2967. Paris: Presses universitaires de France.

Quinet, E, et al. 2013. « L'évaluation socioéconomique des investissements publics - Rapport final ». Tome 1.

Rainer, F. 2004. « NewExt : New Elements for the Assessment of External Costs from Energy Technologies ». Rapport final pour la commission européenne. Stuttgart.

Rawls, John. 1999. *A theory of justice*. Rev. ed. Cambridge, Mass: Belknap Press of Harvard University Press.

Rodrigue, Jean-Paul, Claude Comtois, et Brian Slack. 2013. *The geography of transport systems*. Third edition. Abingdon, Oxon: Routledge.

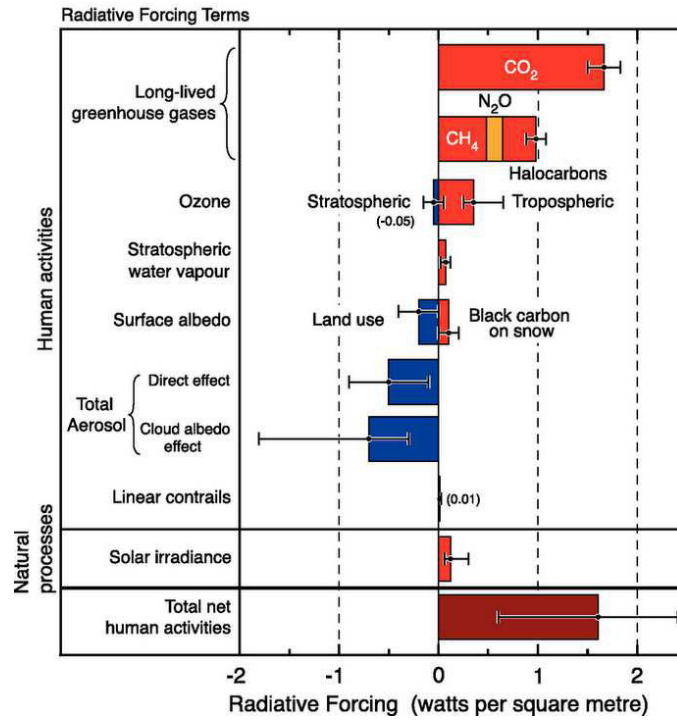
- Royannez, Gil-lan. 2015. « Compréhension et prise en compte de la notion de bonheur, quel impact dans la réflexion économique ? (Le bonheur, un concept difficile à mesurer) ». *Kairos* n°1 (avril).
- Sachs, Jeffrey. 2007. « Climate change refugees ». *Scientific American*, n° 296.6: p43.
- Santos, Joao. 2015. « A comprehensive life cycle approach for managing pavement systems ». Portugal: Universidade de Coimbra. <https://estudogeral.sib.uc.pt/bitstream/10316/30093/1/A%20Comprehensive%20Life%20Cycle%20A%20approach%20for%20Managing%20Pavement%20Systems.pdf>.
- Schwartz, Peter, et Doug Randall. 2006. *Rapport secret du Pentagone sur le changement climatique*. Paris: Éditions Allia.
- Schwarz, Norbert, et Fritz Strack. 1999. « Reports of Subjective Well-Being: Judgmental Processes and Their Methodological Implications ». In *Well-being: The foundations of hedonic psychology*. Edition: 1. Russel Sage Foundation.
- Scitovsky, Tibor. 1992. *The joyless economy: the psychology of human satisfaction*. Rev. ed. New York: Oxford University Press.
- Seiler, A. 2001. « Ecological Effects of Roads, A review ». Swedish University of Agricultural Sciences - Department of Conservation.
- Serres, Michel. 2009. *Le contrat naturel*. Paris: Flammarion.
- Sétra. 2011. « L'impact des fondants routiers sur l'environnement - Etat des connaissances et pistes d'actions ». Note d'information 94. Economie Environnement Conception. http://www.infra-transport-materiaux.cerema.fr/IMG/pdf/1109w_NI_EEC_94.pdf.
- Smith, Adam. 1776. « Livre V : Du revenu du souverain ou de la République ». In *Recherche sur la nature et les causes de la richesse des nations*.
- Solomon, Susan, Diane J. Ivy, Doug Kinnison, Michael J. Mills, Ryan R. Neely, et Anja Schmidt. 2016. « Emergence of Healing in the Antarctic Ozone Layer ». *Science* 353 (6296): 269-74. <https://doi.org/10.1126/science.aae0061>.
- Stocker, T, et al. 2013. « Climate Change 2013 : The physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change ». IPCC. <http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>.
- Syrota, Jean, Étienne Beeker, Alan Bryden, Johanne Buba, Caroline Le Moign, et Felix Von Pechmann. 2011. « La voiture de demain: carburants et électricité ». *Conseil d'Analyse Stratégique, Paris, Rapports&Documents*, n° 40. https://www.strategie.gouv.fr/en/system/files/cas_rapp37_voiture_de_demain_web_0.pdf.
- Tardieu, Léa, Sébastien Roussel, et Jean-Michel Salles. 2013. « Assessing and Mapping Global Climate Regulation Service Loss Induced by Terrestrial Transport Infrastructure Construction ». *Ecosystem Services* 4 (juin): 73-81. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2013.02.007>.
- Taub, Daniel R., Brian Miller, et Holly Allen. 2008. « Effects of Elevated CO2 on the Protein Concentration of Food Crops: A Meta-Analysis ». *Global Change Biology* 14 (3): 565-75. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2007.01511.x>.

- Trombulak, Stephen C., et Christopher A. Frissell. 2000. « Review of Ecological Effects of Roads on Terrestrial and Aquatic Communities ». *Conservation Biology* 14 (1): 18-30. <https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.2000.99084.x>.
- UNICEM, et UNPG. 2018. « L'industrie française des granulats - Edition 2017/2018 (données 2016) ». <http://www.unicem.fr/wp-content/uploads/depliant-unpg-chiffres-2016.pdf>.
- US DOE. 2011. « Critical materials strategy ». https://www.energy.gov/sites/prod/files/DOE_CMS2011_FINAL_Full.pdf.
- USIRF. 2012. « Enquête USIRF / ADF sur la Convention d'Engagement Volontaire », . Routes de France, , n° 85.
- . 2015. « La dépense de gestion, d'entretien et d'investissement routier en France : Quelles réalités derrière les chiffres globaux et leurs évolutions pour les Travaux Publics ? - Etude sur neuf départements tests ». <http://www.usirf.com/wp-content/uploads/USIRF-Rapport-d%C3%A9tude-sur-la-d%C3%A9pense-de-gestion-d'entretien-et-d'investissement-routier-en-France-30.10.2015.pdf>.
- . 2016. « Bilan environnemental 2015 ». <http://www.usirf.com/wp-content/uploads/BILAN-ENVIRONNEMENTAL-2015-valid%C3%A9.pdf>.
- . 2017. « L'état de la route 2016 ». USIRF. http://www.usirf.com/wp-content/uploads/USIRF_EDLR2016_BD.pdf.
- Veenhoven, Ruut. 1999. « Quality of life in individualistic society ». *Social Indicators Research* 48: pp.157-186.
- . 2000. « Wellbeing in the welfare state: Level not higher, distribution not more equitable ». *Journal of Comparative Policy Analysis* 2: 91-125.
- . 2009. « World database of happiness - Tool for dealing with the "data-deluge" ». *Psychological Topics (special issue on Positive Psychology)*, n° n°18: 221-46.
- Visse, Pierre-Edouard. 2013. « Évolution du budget automobile des ménages français depuis 1990 ». 14. DGCCRF éco. DGCCRF. http://www.economie.gouv.fr/files/directions_services/dgccrf/documentation/dgccrf_eco14.pdf.
- White, A. 2007. « A Global Projection of Subjective Well-being: A Challenge to Positive Psychology? » *Psychtalk*, n° n° 56,: 17-20.
- Wilde, W. J, S Waalkes, et R Harrison. 2001. « Life cycle cost analysis of portland cement concrete pavement ». Austin, Texas: Univ. of Texas at Austin.
- Wilson, Scott, et Paul Keddy. 1988. « Species Richness, Survivorship, and Biomass Accumulation along an Environmental Gradient ». *Oikos* Vol. 53 (No. 3 (Nov., 1988)): 375-80.
- Young, Cristobal, et Chaeyoon Lim. 2014. « Time as a Network Good: Evidence from Unemployment and the Standard Workweek ». *Sociological Science*, 10-27. <https://doi.org/10.15195/v1.a2>.
- Yu, Bin, et Qing Lu. 2014. « Empirical Model of Roughness Effect on Vehicle Speed ». *International Journal of Pavement Engineering* 15 (4): 345-51. <https://doi.org/10.1080/10298436.2013.792931>.

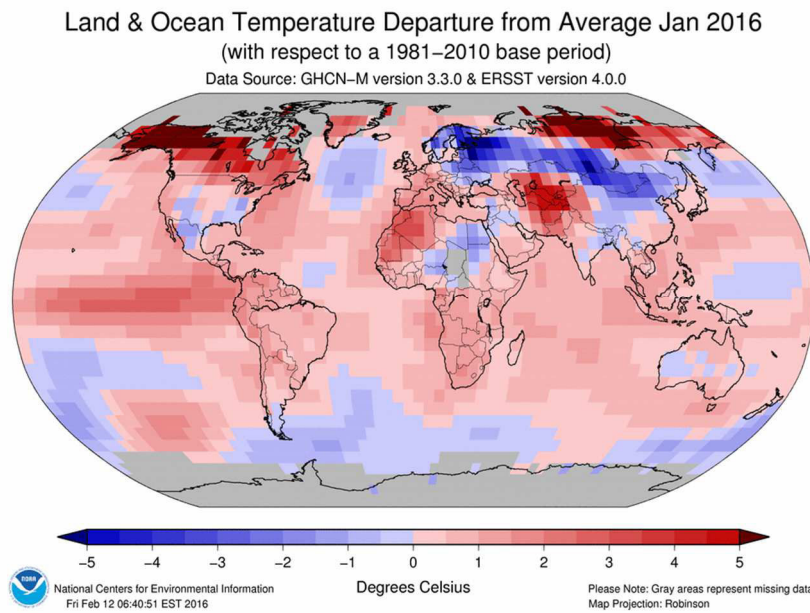
Zaabar, Imen, et Karim Chatti. 2010. « Calibration of HDM-4 Models for Estimating the Effect of Pavement Roughness on Fuel Consumption for U. S. Conditions ». *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2155 (1): 105-16. <https://doi.org/10.3141/2155-12>.

7 Annexes

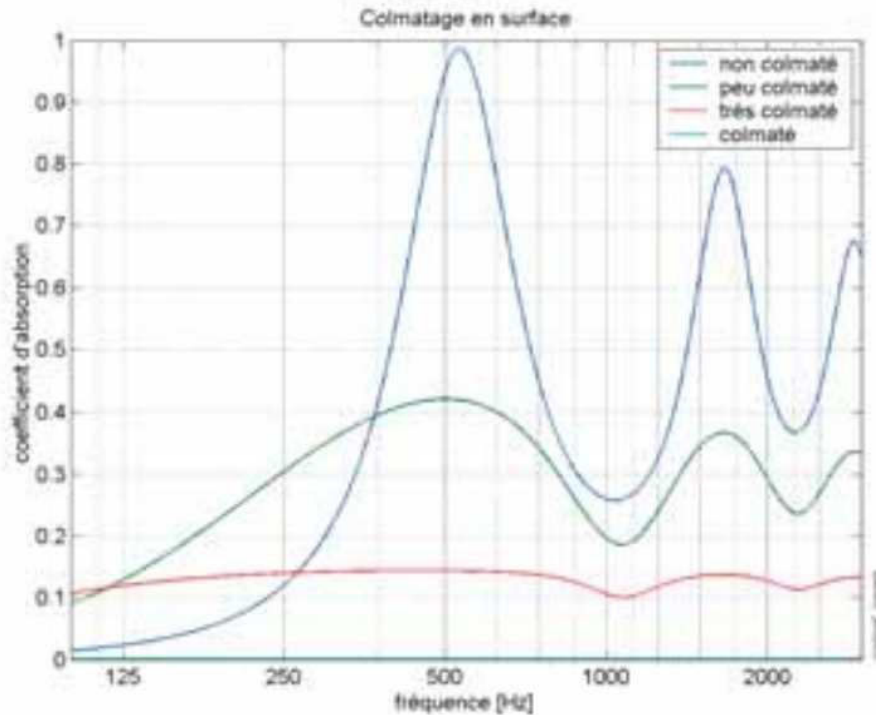
Annexe 25. Contributions relatives des différentes causes du forçage radiatif entre 1750 et 2005, différenciées entre processus naturels et activités humaines (IPCC 2007)



Annexe 26. Anomalies de températures positives et négatives en janvier 2016 comparées à la période 1981-2010 (NOAA 2016)



Annexe 27. Influence d'un colmatage sur le coefficient d'absorption acoustique d'une chaussée poreuse (Hamet 2003)



Annexe 28. Hypothèses de calcul de l'individu temporel

A/ Sommeil

Parce qu'il occupe environ 1/3 de notre temps, le rythme de sommeil mérite que l'on s'y intéresse. La National sleep foundation (Hirshkowitz et al 2015) a publié en 2015 un rapport indiquant le nombre d'heures de sommeil optimal en fonction de l'âge, basé sur 300 publications scientifiques et rédigé par 6 experts du sommeil et 12 experts médicaux divers. Les temps pouvant varier de manière non négligeable dans une même tranche d'âge, ce sont des intervalles de temps de sommeil souvent, souvent variant de 2h, qui sont indiqués. Nous donnerons des moyennes à retenir. Les nouveau-nés (>1 ans) dorment en moyenne 15h, les enfants entre 12h (1 à 5 ans) et 10h (6-13 ans), les adolescents (14-17 ans) 9h, les adultes 8h et les personnes de plus de 65 ans 7.5h.

B/ Scolarité et travail

Scolarité

L'enseignement primaire, que l'on peut considérer commencer à 5 ans, dure 6 ans en France, l'enseignement secondaire 7 ans, et l'enseignement supérieur 4 ans en moyenne. En effet, un français termine ses études à l'âge moyen de 21 ans selon le bilan 2010 de l'INSEE. Les chiffres de l'OCDE (2013) estiment à environ 4500h en 6 ans soit 750h par an d'enseignement au primaire et 4000h sur 7 ans soit 570h/an au secondaire, ce à quoi s'ajoute le temps dédié aux devoirs à la maison. Nous n'avons pas trouvé de statistiques sur le temps de travail au primaire. Rappelons que les devoirs à la maison sont actuellement interdits, mais pas la demande de l'apprentissage des leçons ou de lectures. Sur l'exemple des chiffres Belges, nous considérerons un temps de travail personnel de 3h par semaine au primaire. Au secondaire, le temps de travail hebdomadaire serait de 5h en France. Les pratiques dans l'enseignement supérieur comportent de fortes disparités selon les statistiques de l'Observatoire de

la vie étudiante. En moyenne, les heures de cours s'élevaient à 21h, le temps de travail personnel en semaine à 11h et le week-end à 5h (dans blog.lemonde.fr, Rollot 2011).

Travail

En moyenne, un français commence à travailler à l'âge de 21 ans. Il travaillera jusqu'à ses 63 ans (62.4 ans en moyenne en 2015, à la hausse de 2 ans en 10 ans). Par an, il travaille en moyenne 1652h par an (Eurostat 2016), pour un temps de travail effectif le plus bas d'Europe.

C/ Temps libre

Le temps que nous qualifierons de « libre » est le temps hors travail/scolarité et sommeil. Ce temps peut être utilisé de manière variée. Pour reprendre la classification propre aux transports (motifs de déplacement privés), nous citerons les activités suivantes : les achats, les soins médicaux et personnels (e.g. coiffeur), les démarches (administratives, recherches d'informations), les visites (parents, amis), l'accompagnement, les loisirs (vie associative, activités sportives ou culturelles, etc.), et les vacances.

D/ Temps de transport

Pour calculer le temps passé en transport hors vacances, nous étudierons les chiffres de la dernière Enquête Nationale des Transports et Déplacements (ENTD) (MEDDE 2008). Elle propose des données détaillées pour la mobilité courte distance (< 80 km à vol d'oiseau autour du domicile) en semaine, le samedi, et le dimanche d'une part, et par mode de transport et motif en particulier d'autre part.

Les temps de transport rattachés à la scolarité et au travail peuvent dans certains cas être mis à profits (et il semblerait que ce soit de plus en plus le cas, notamment avec la révolution numérique), par exemple pour lire, jouer, traiter ses e-mails professionnels, ne rien faire (Transports en commun), ou encore sociabiliser (déplacement en famille en VP par exemple). Néanmoins, dans la mesure où ils sont des temps « imposés » par la distance entre le domicile et le lieu de scolarisation/travail, nous considérerons que ce temps est consommé au détriment du temps disponible pour d'autres activités apportant davantage de satisfaction. Et nous chercherons à estimer la part de ce temps passé dans les modes routiers, puisque ce sont sur ces modes que le niveau d'entretien routier va jouer. C'est ce temps que nous voudrions précisément chiffrer à l'échelle d'une vie humaine.

En France, selon l'ENTD 2008, le temps passé par déplacement entre lieu de travail fixe et domicile est en moyenne de 22.6 minutes, soit environ 45 minutes de déplacement journalier en considérant un aller-retour par jour (ce qui n'est le cas que pour 2/3 de la population). Le conducteur d'une VP représente 69% des modes principaux utilisés, pour seulement 3.6% en tant que passager VP. Les TC urbains représentent 12% des modes principaux utilisés, la marche à pied 9%, les deux roues 3%, le vélo 2%, et le train 1.4% (MEDDE 2008).

Les déplacements du domicile vers les lieux de scolarité sont tous assimilés dans une même catégorie, avec les déplacements vers les lieux de garde également. Ainsi, nous aurons des moyennes de temps de transport pour tous les individus entre 0 et 21 ans inclus. Ce temps par déplacement vaut 15.8 minutes selon l'ENTD (2008) soit environ 32 minutes par jour. En termes de choix modal, environ 31% de ces trajets se font à pied, 1% en 2 roues, 3% en vélo, 3% en tant que conducteur de VP, 32% en tant que passager, 29% en TC et 1% en train.

Il est intéressant de regarder l'influence de l'unité d'étude de la mobilité : selon que l'on s'intéresse aux déplacements, aux voyageurs.kilomètres (deux unités classiques en analyse du transport), ou aux voyageurs.heures, on n'observe pas la même importance des modes de transport comme le montre la Figure 39. La voiture reste le mode majoritaire quel que soit l'unité – entre 65% pour la part de

déplacement, 80% pour la part de voyageurs.kilomètres, et 60% pour la part d'heures passées dans les transports pour le travail ou la scolarité.

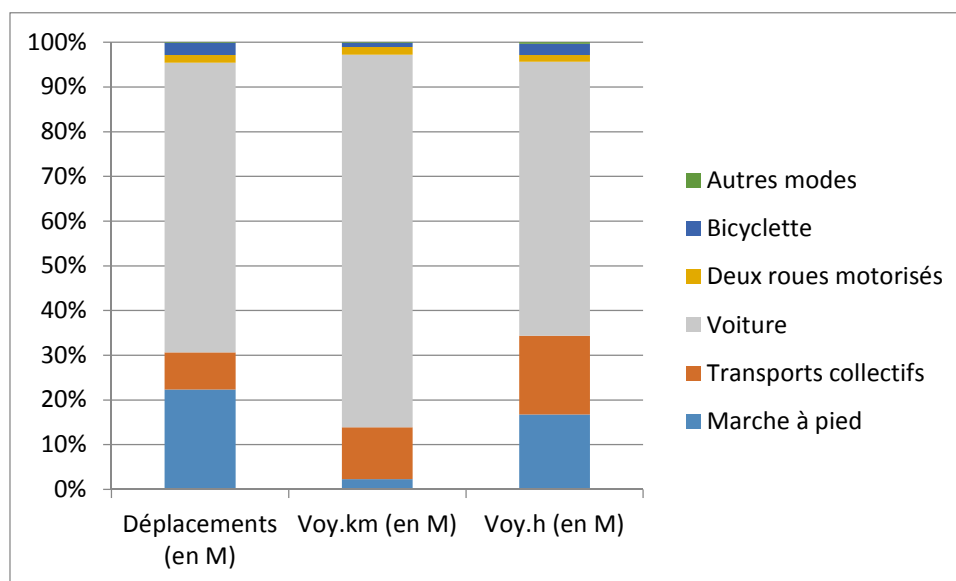


Figure 39 Caractérisation modale de la mobilité courte distance en semaine selon l'unité de mobilité considérée (données : ENTD 2008)

Avec les données de l'ENTD de 2008, nous avons calculé le temps cumulé de transport des individus lié à la scolarité ou au travail (en courte distance), par mode de transport en voyageurs.heures (indicateur créé) en France : cela se monte environ à 220 millions d'heures par semaine travaillée, soit 190 millions d'heures par semaine pour les déplacements liés au travail et 27 millions d'heures par semaine liées à la scolarité. Par personne, cela représente 5h de transport par semaine pour les travailleurs et un peu moins de 3h pour les individus scolarisés.

Chez les actifs, la moyenne nationale de jours de congés (+ fériés) pris en France est de 37 jours ouvrables par an, soit 6.2 semaines selon l'INSEE (2012). Pour les scolaires du primaire et du secondaire, le nombre de semaines de vacances s'élève à 16 semaines. Dans le supérieur, faute de données, nous considérerons la même chose. Ayant 52 semaines dans l'année, un actif travaille donc $52 - 6 = 46$ semaines environ, quand un étudiant travaille 36 semaines. Le temps de transport contraint se monte donc respectivement à $46 * 5h = 230$ h/an soit quasiment 10 jours par année travaillée et 6 jours dans une voiture par individu moyen, et 105 h/an soit plus de 4 jours 1.5 jours passés en voiture pour aller sur le lieu d'étude.

E/ Vacances

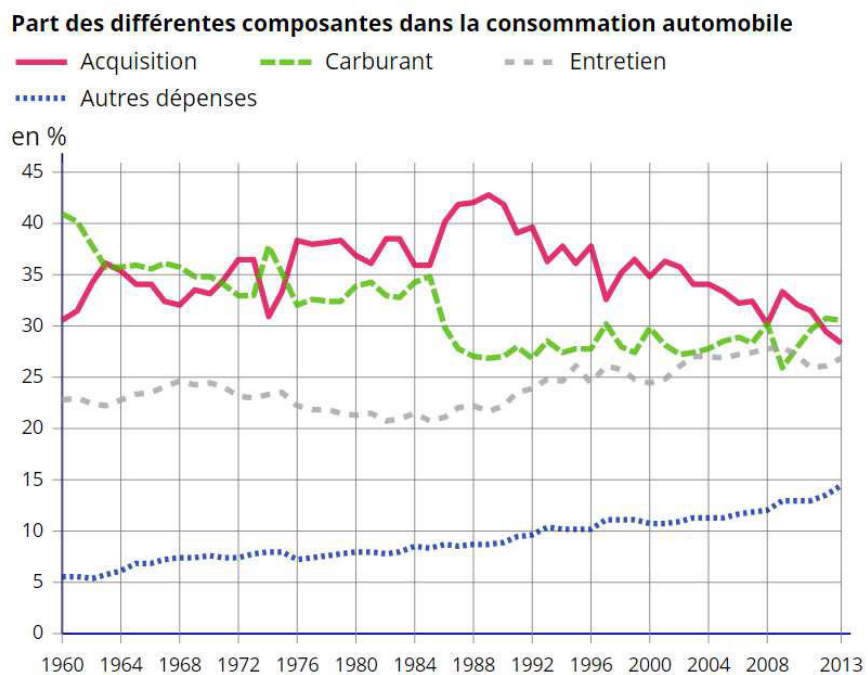
Selon les données du SOeS (2016) sur « La mobilité à longue distance des Français » en 2015, seuls 16% des voyages (> 100 km) réalisés le sont pour motifs professionnels, le reste étant pour motifs personnels. Parmi les voyages personnels, la voiture représente 72% des voyages, contre 14% pour le train et 9% pour l'avion. Sans considération plus poussée, on peut déjà dire que l'état des routes aura un impact sur la qualité des vacances des français, selon des considérations de confort (bruit et vibrations à l'intérieur de l'habitacle), de temps passé (ralentissement sur les routes en mauvais état), de dépenses des ménages (usure et consommation relatifs à la qualité de surface des routes), etc.

F/ Autres activités

Les activités des actifs en métropole varient par type d'actif et par genre, mais se répartissent globalement, lissées sur une semaine (jour de semaine et week-end confondus), ainsi (EDT 2010) :

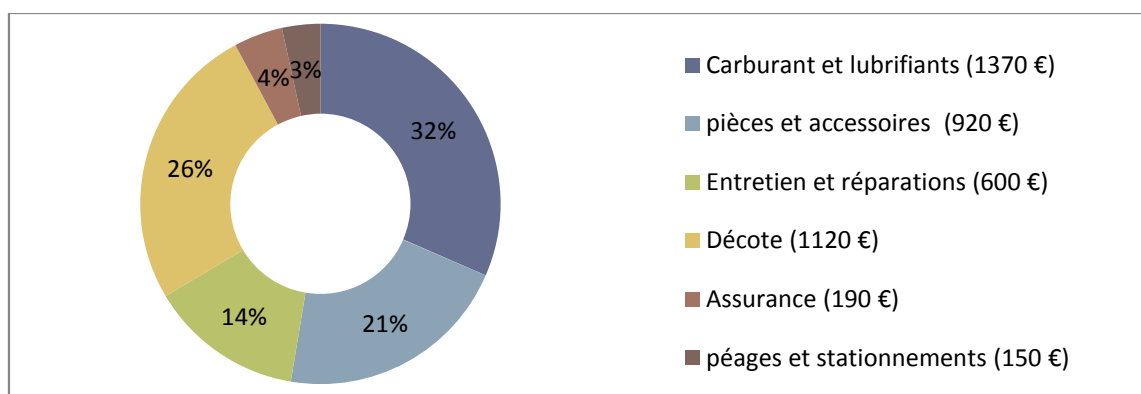
- 49% de leur temps dévolu aux besoins physiologiques : le sommeil, déjà évoqué, mais aussi les repas (environ 2h par jour), la toilette et les soins (environ 1h par jour)
- 22% de temps professionnel (travail et déplacements liés)
- 11% de temps domestique (2h45/j environ, fortes disparités hommes/femmes) pour les tâches ménagères, les soins aux enfants, adultes et animaux, le bricolage et jardinage
- 12% de temps de loisir (passé à plus de 50% devant les écrans)
- 3% de temps de sociabilité
- 3% de temps de transport hors mobilité pour le travail

Annexe 29. Part de la dépense de consommation automobile (INSEE 2014)



Source : Insee, comptes nationaux base 2010.

Annexe 30. Coût moyen annuel de possession d'une voiture en France (Source : auteur ; chiffres INSEE 2013)

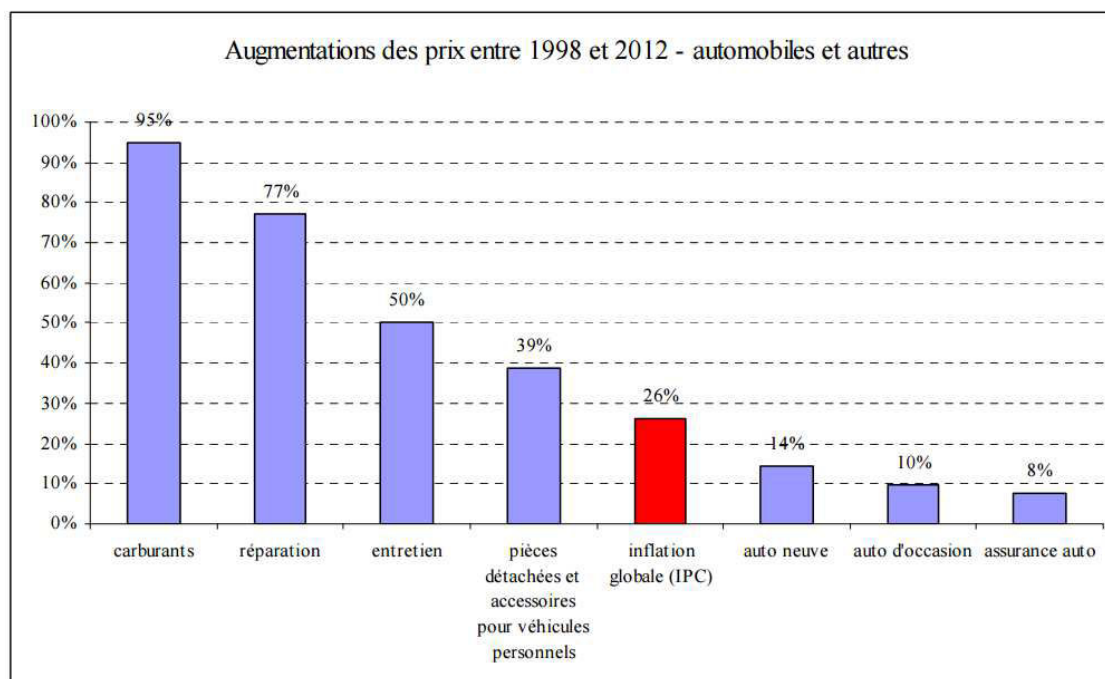


Annexe 31. Part des dépenses d'automobile dans les budgets des ménages entre 1990 et 2010 (DGCCRF 2013)

Part dans le budget des ménages	1990	2000	2009	2010
ACHATS DE VEHICULES (neuf et occasion)	4,1 %	3,1 %	2,7 %	2,6 %
dont automobiles neuves	3,4 %	2,3 %	1,9 %	1,8 %
DEPENSES D'UTILISATION DES VEHICULES	6,2 %	6,6 %	5,9 %	6,2 %
- entretien, réparation, pièces détachées & accessoires	2,6 %	2,8 %	2,8 %	2,8 %
dont services d'entretien de véhicules automobiles	1,1 %	1,0 %	1,0 %	1,0 %
- carburants et lubrifiants	2,9 %	3,1 %	2,4 %	2,6 %
- péages, stationnement, location, auto-écoles	0,6 %	0,7 %	0,8 %	0,8 %
ASSURANCES AUTOMOBILES	0,5 %	0,4 %	0,4 %	0,4 %
PART DE L'AUTOMOBILE DANS LE BUDGET DES MENAGES	11,1 %	10,4 %	9,3 %	9,4 %

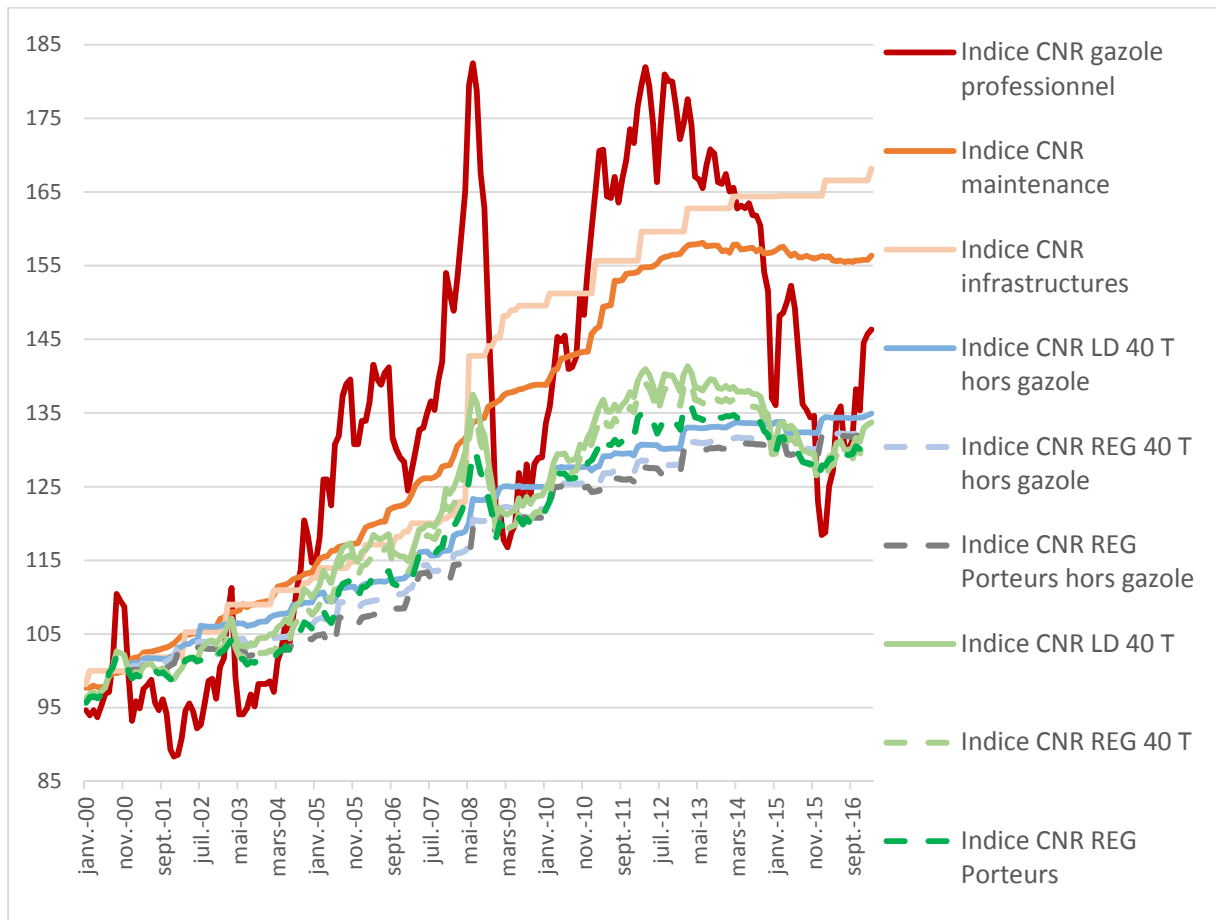
Source Insee – retraitement DrivePad.fr, décembre 2011

Annexe 32. Évolution des prix des différents postes de dépenses en automobile entre 1998 et 2012 (DGCCRF 2013)

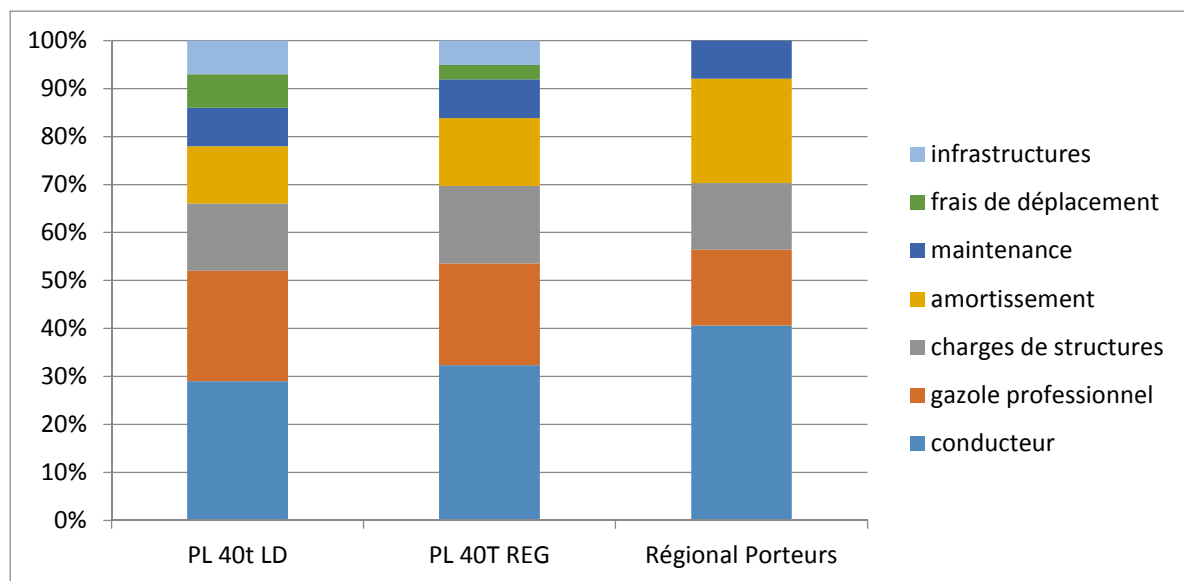


Source Insee – calculs DGCCRF, mars 2013

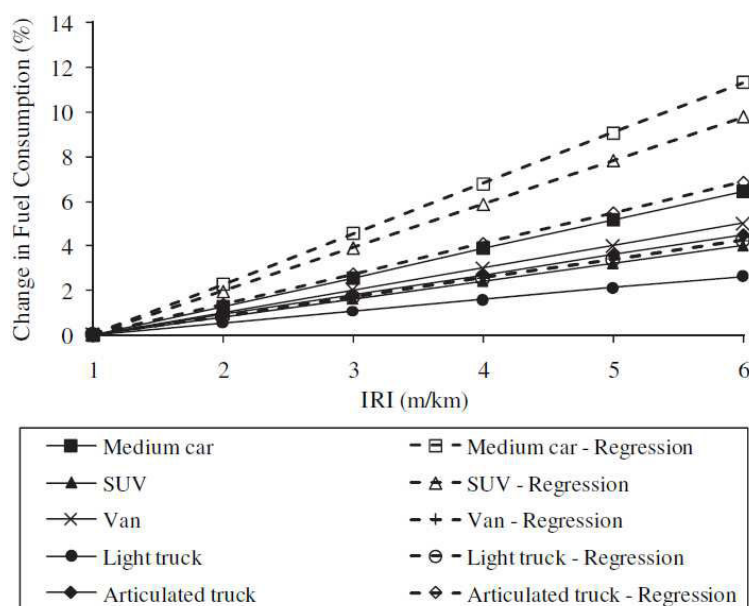
Annexe 33. Évolution des indices PL du CNR entre 2000 et 2016 (données chiffrées : CNR 2016)



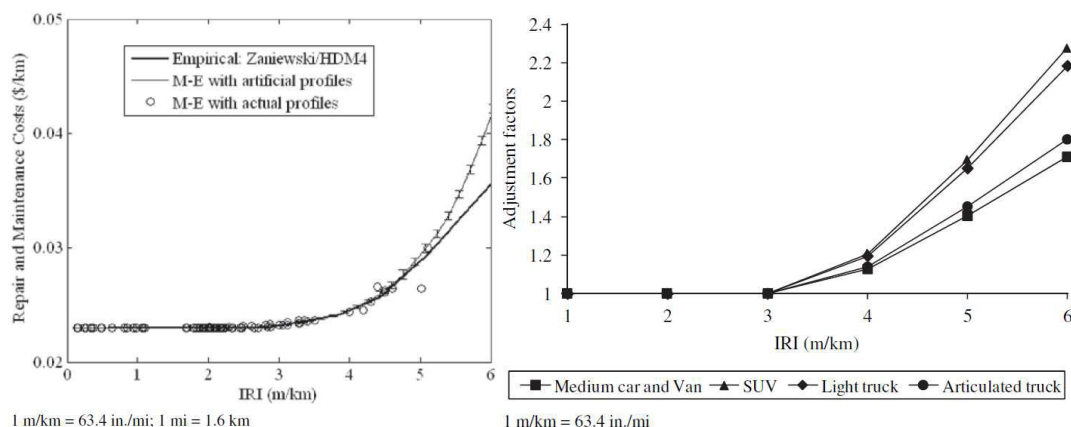
Annexe 34. Répartition des coûts d'exploitation des PL sous pavillon français (Source : auteur ; Chiffres : CNR 2016)



Annexe 35. Effet de la rugosité sur la consommation de différentes catégories de véhicules à 88 km/h avec le modèle de consommation d'HDM-4 (Chatti et Zaabar 2012)



Annexe 36. Effet de la rugosité sur les coûts de réparation et de maintenance des automobiles (gauche) et des PL (droite) (Chatti et Zaabar 2012)



Annexe 37. Effet de l'IRI sur l'usure pneumatique (Chatti et Zaabar 2012)

Speed	Vehicle Class (Number of Wheels)	Baseline Conditions (%/km) ^a	Baseline Conditions (%/mi) ^a	Adjustment Factors from the Baseline (Fraction per Tire)				
		IRI (m/km)						
		1	2	3	4	5	6	
56 km/h (35 mph)	Medium car (4)	0.0013	0.0021	1.01	1.01	1.02	1.02	1.03
	Van (4)	0.0011	0.0017	1.00	1.01	1.01	1.02	1.02
	SUV (4)	0.0011	0.0017	1.01	1.02	1.03	1.04	1.05
	Light truck (4)	0.0012	0.0020	1.01	1.02	1.03	1.04	1.05
	Articulated truck (18)	0.0006	0.0010	1.01	1.01	1.02	1.02	1.03
88 km/h (55 mph)	Medium car (4)	0.0014	0.0022	1.01	1.02	1.03	1.04	1.05
	Van (4)	0.0013	0.0021	1.01	1.01	1.02	1.03	1.04
	SUV (4)	0.0013	0.0021	1.01	1.03	1.05	1.06	1.08
	Light truck (4)	0.0018	0.0029	1.01	1.02	1.04	1.05	1.06
	Articulated truck (18)	0.0007	0.0012	1.01	1.02	1.03	1.04	1.05
112 km/h (70 mph)	Medium car (4)	0.0015	0.0025	1.01	1.03	1.04	1.06	1.08
	Van (4)	0.0018	0.0028	1.01	1.02	1.03	1.04	1.04
	SUV (4)	0.0017	0.0027	1.02	1.04	1.06	1.08	1.10
	Light truck (4)	0.0029	0.0046	1.01	1.02	1.04	1.05	1.06
	Articulated truck (18)	0.0009	0.0015	1.01	1.02	1.03	1.04	1.06

^a percentage of new tire volume

Annexe 38. Valeurs préconisées pour la monétarisation des accidents routiers en France (Quinet et al 2013)

Accident	Valeur (€2010)	Évolution
Tués (Valeur de la Vie Statistique (VVS))	3 000 000	PIB
Blessé grave (15% de la VVS)	375 000	PIB
Blessé léger (2% de la VVS)	15 000	PIB
Accident matériel ou corporel	4 600	PIB

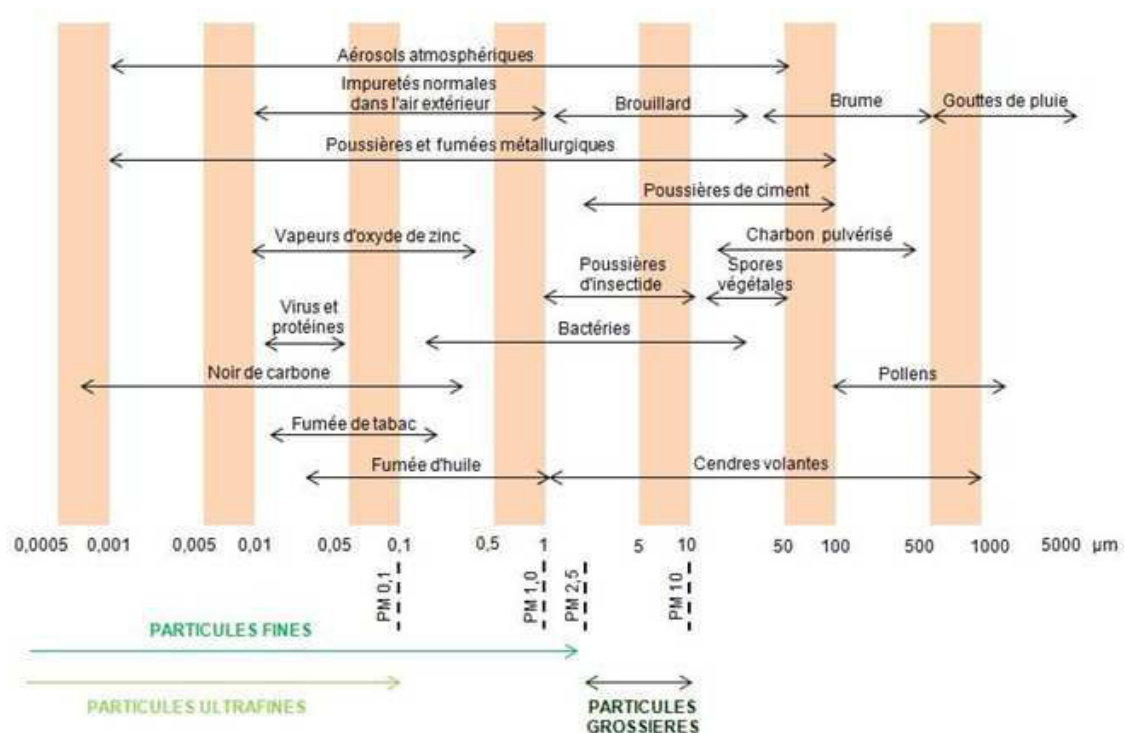
Annexe 39. Valeurs du temps des modes routiers de passagers selon le motif et la distance parcourues en euros 2010, préconisés par la commission Quinet (Quinet 2013)

Mode	Motif	d ≤ 20km	20 km < d < 80 km	80 km	80 km < d < 400 km	d ≥ 400km	d inconnu	d _{moy} (km)
Route – véhicule particulier	Tous motifs	7.9	0.090*d+6.1	13.3	0.006*d+12.8	15.2	14.4	266.7
	Professionnel	17.5	0.202*d+13.5	29.6	0.016*d+28.4	34.8	32.7	
	Personnel-vacances	6.8	0.031*d+6.2	8.7	0.012*d+7.7	12.4	10.9	
	Personnel-autres	6.8	0.067*d+5.5	10.8	0.019*d+9.3	17.0	14.4	
Route-autocar	Tous motifs	7.9	0.166*d+4.6	17.9	0.019*d+19.3	11.9	13.9	293.8
	Professionnel	17.5	0.153*d+14.5	26.7	0.004*d+26.3	28.0	27.6	
	Personnel-vacances	6.8	0.031*d+6.2	8.7	0.003*d+8.4	9.8	9.4	
	Personnel-autres	6.8	0.067*d+5.5	10.8	0.006*d+10.4	12.8	12.1	

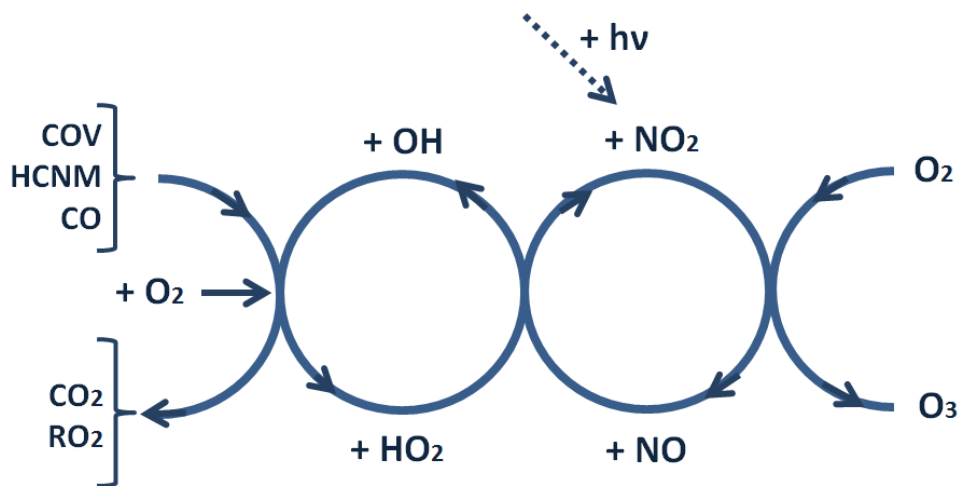
Annexe 40. Valeurs du temps des modes routiers de marchandises en euros 2010, préconisés par la commission Quinet (Quinet 2013)

Type de marchandises	Valeur du temps de déplacement (€/t)
Marchandises à forte valeur ajoutée	0.60
Marchandises courantes	0.20
Marchandises à faible valeur ajoutée	0.01

Annexe 41. Microparticules : Taille et composition en France (CITEPA 2016)



Annexe 42. Cycle de l'ozone troposphérique

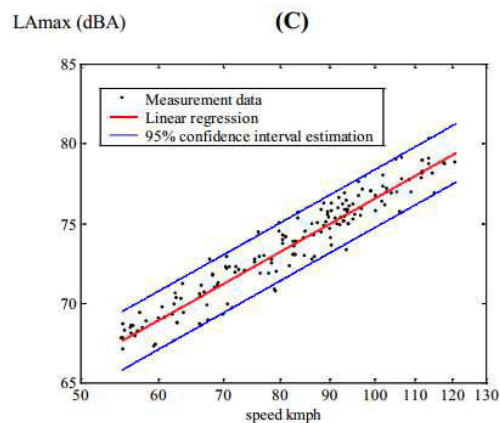


COV = Composés Organiques Volatiles, HCNM = Hydrocarbures Non Méthaniques
CO=Monoxyde de carbone, hv=UV...

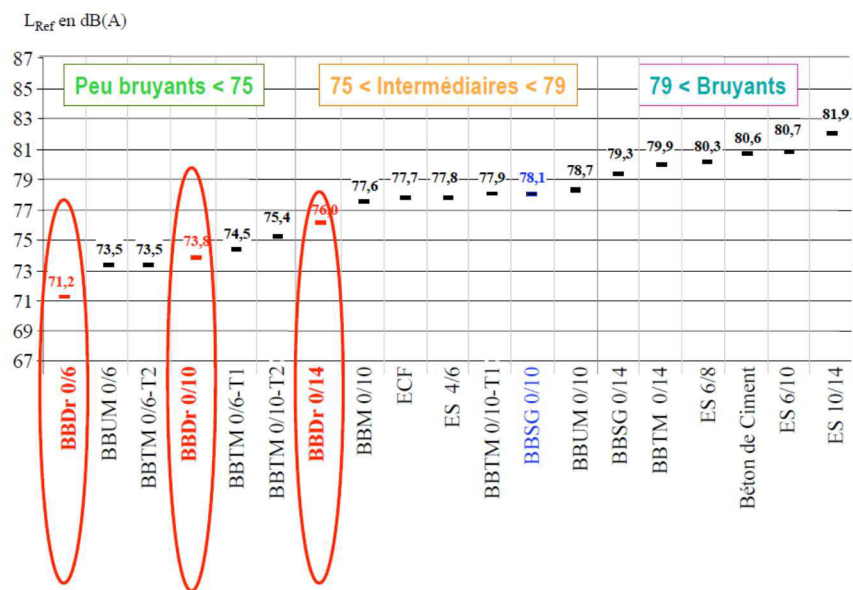
Annexe 43. Pondérations physiologiques des niveaux de pression acoustique
(genie-acoustique.com)

Fréquences centrales des octaves (en Hz)	Pondération physiologique "A" (en dB)
31,5	-39,4
63	-26,2
125	-16,1
250	-8,6
500	-3,2
1 000	0
2 000	+1,2
4 000	+1,0
8 000	-1,1

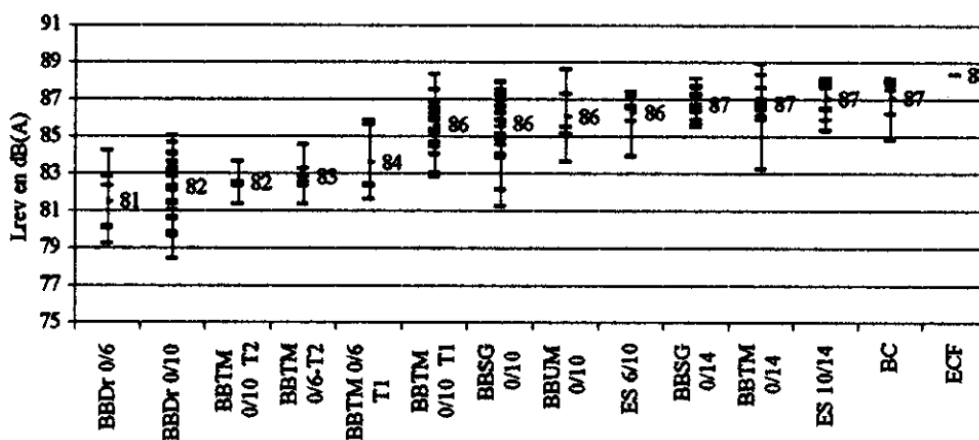
Annexe 44. Émissions sonores dues au contact pneu-chaussée selon la vitesse
(Lelong et Michelet 1999)



Annexe 45. Bruit moyen généré par les VL (Doisy 1999 remanié par Gautier 2006) selon le revêtement routier



Annexe 46. Bruit moyen généré par un PL (Doisy 1999) selon le revêtement routier



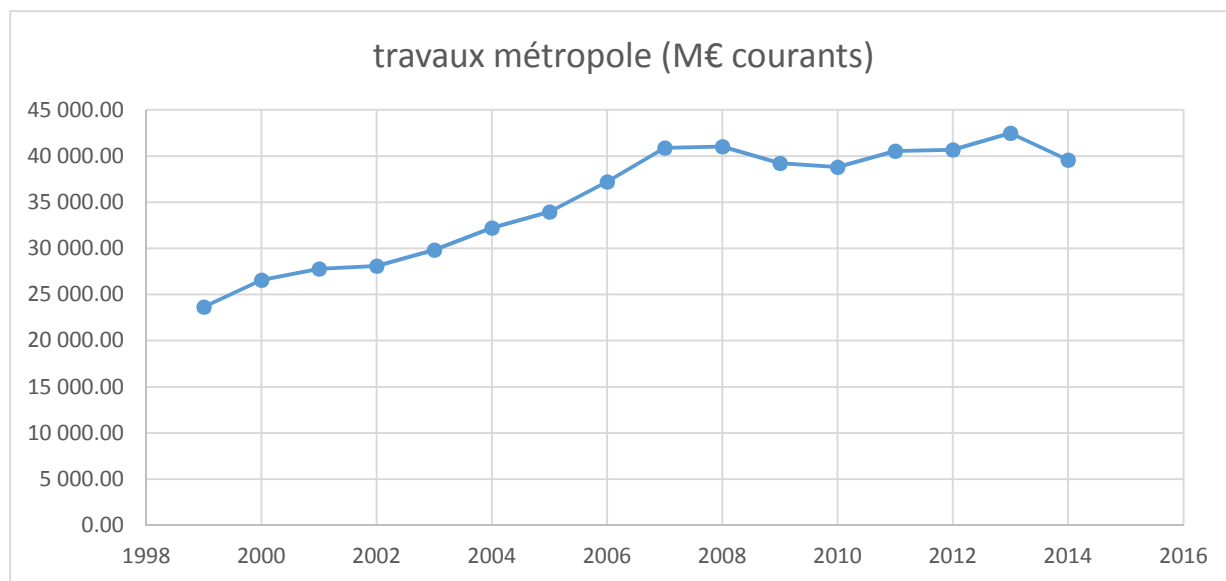
Annexe 47. Coûts du bruit journaliers en €2010/1000veh.km (CEREMA 2014)

	Trafic	Péri-urbain	Rural
VL	Dense	0,5	0,1
	Peu dense	1,6	0,1
PL	Dense	6,7	1,1
	Peu dense	13,3	2,2

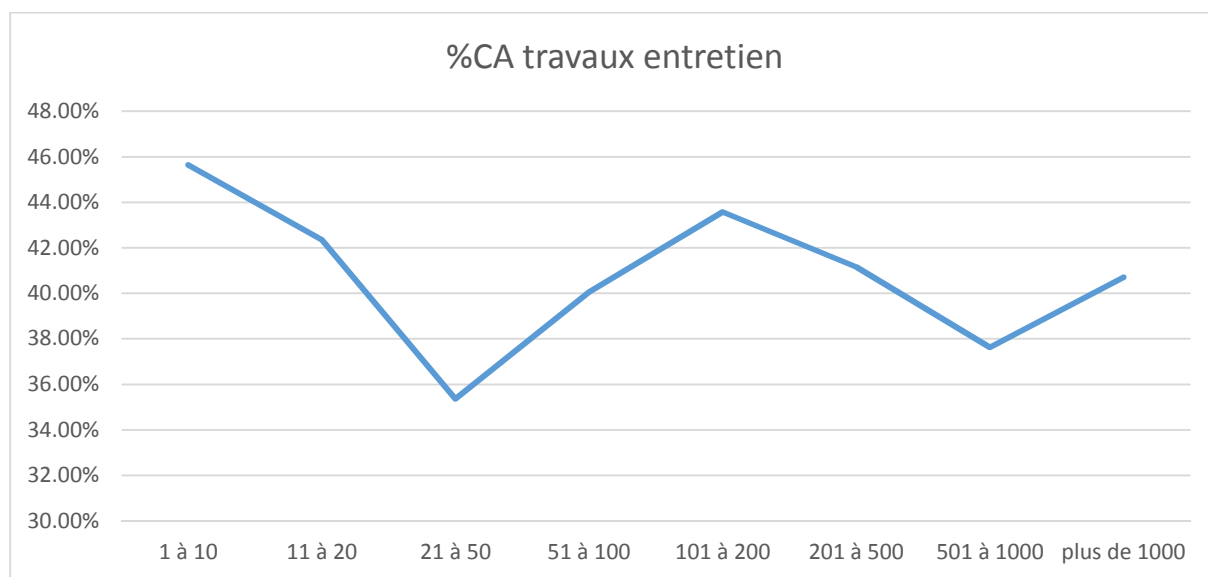
Annexe 48. Croisement population et chiffre d'affaire des travaux routiers par région (Source : auteur ; chiffres CA : FNTTP 2015)

REGION	% CA TRAVAUX ROUTIER	% POPULATION	DIFFERENCE (CA – POP)
ALSACE	2.1	3.0	-0.9
AQUITAINE	7.7	5.4	2.3
AUVERGNE	0.8	2.2	-1.4
BASSE-NORMANDIE	1.4	2.4	-1.0
BOURGOGNE	1.7	2.7	-1.0
BRETAGNE	4.6	5.3	-0.7
CENTRE	2.1	4.1	-2.0
CHAMPAGNE	1.6	2.1	-0.5
FRANCHE-COMTE	0.5	1.9	-1.4
HAUTE-NORMANDIE	2.4	3.0	-0.6
ILE-DE-FRANCE	18.2	19.4	-1.2
LANGUEDOC	0.8	4.4	-3.6
LIMOUSIN	1.4	1.2	0.2
LORRAINE	7.6	3.8	3.8
MIDI-PYRENEES	3.4	4.8	-1.4
NORD	8.3	4.2	4.1
PACA	11.2	8.0	3.2
PAYS-DE-LOIRE	8.2	5.9	2.3
PICARDIE	2.2	3.1	-0.9
POITOU-CHARENTES	0.7	2.9	-2.2
RHONE-ALPES	13.1	10.4	2.7

Annexe 49. CA des travaux publics en métropole entre 1999 et 2014 (Source : auteur ; chiffres : FNTF 2015)



Annexe 50. Part de l'entretien routier dans l'activité des entreprises routières françaises en fonction de l'effectif en 2014 (Source : auteur ; chiffres : Statistiques FNTF 2014)



Annexe 51. Quelques chiffres sur la problématique des déchets au sein des deux sous-systèmes de l'entretien routier : route et véhicules

Relativement stable depuis 2002, la production de déchets a néanmoins doublé entre 1960 et le début du siècle, jusqu'à devenir un enjeu à la fois environnemental et financier pour notre société¹⁸³. Nous donnons ici des éléments de contextes avant de spécifier l'enjeu relatif à l'entretien routier.

A/ Généralités

¹⁸³ <http://www.territoires-climat.ademe.fr/domaines-actions/dechets/contexte-et-enjeux>

Contexte européen et français

En 2012 (derniers chiffres disponibles), l'Allemagne et la France produisaient à eux deux et à parts relativement égales près du tiers des déchets de l'Union Européenne (E28) (CGDD 2015). Cela représente pour la France 14% et 345 millions de tonnes de déchets, dont 2/3 issus du secteur du BTP et 10% issus des ménages. 11 millions de tonnes, soit 3% des déchets, sont classés dangereux. Le tonnage global semble être à la baisse, avec en 2012 un niveau égal à celui de 2008 et inférieur de 3% par rapport à 2010, qui serait imputable au secteur du BTP, générant 247 Mt en 2012 contre 260 Mt en 2010 (CGDD 2015). Le tonnage de l'industrie en revanche continue à croître passant de 23.6 à 26.0 Mt sur ces mêmes années.

La réglementation française intègre aujourd'hui les orientations européennes, via son plan d'action comprenant un programme national de prévention, qui définit des objectifs chiffrés :

- valorisation et réduction de 50 % des déchets stockés à l'horizon 2020
- réduction de moitié des déchets non dangereux non inertes mis en décharge à l'horizon 2025 par rapport à 2010
- augmentation du taux de recyclage pour les déchets non dangereux et les déchets du BTP

Aspects réglementaires français

La prévention et la gestion des déchets en droit français sont régies par les articles 541 et suivants du Code de l'environnement (partie législative de L 541-1 à L541-50, partie réglementaire à partir de l'Art. D41-1). Aujourd'hui en France, depuis la Loi Nouvelle Organisation Territoriale de la République, la planification et la gestion des déchets reviennent aux Conseils régionaux, qui s'appuient sur un plan régional de prévention et de gestion des déchets unique¹⁸⁴. Toutefois, selon le code de l'environnement (L541-2), le maître d'ouvrage producteur de déchets est responsable de l'élimination des dits déchets¹⁸⁵.

Typologie française de déchets

En France, le secteur du BTP va différencier 4 types de déchets.

Les *déchets inertes* sont composés de matières minérales. Ils ne connaîtront pas de modification importante susceptible d'entraîner une pollution durant leur stockage de fin de vie. Il s'agit par exemple des pierres, de la terre, des matériaux de terrassement, du béton, de la céramique, de la terre cuite ou des déchets de verres.

Les déchets non dangereux comprennent les Déchets Industriels Banals (DIB) et les déchets d'emballages. Ils peuvent brûler, produire des réactions chimiques, physiques ou biologiques pendant leur stockage, sans présenter de caractère dangereux ou toxique. Ce sont par exemple des matériaux à base de plâtre, des matières plastiques (PVC, PE, polystyrène), du bois non traités, des métaux, des films plastiques, des palettes, des cartons, des bidons et pots non souillés.

Les déchets dangereux, appelés Déchets Industriels Spéciaux (DIS), contiennent des substances toxiques ou dangereuses, comme par exemple les bois traités, produits anticorrosifs, adjuvants, ignifugeants, antirouilles, siccatifs, solvants, diluants, peintures et vernis avec solvants, et tout emballage ayant contenu ces différents produits.

Enfin, les déchets d'amiante font l'objet de précautions particulières suivant leur état – floqué (i.e. friable et volatile) ou lié (i.e. non friable telle que l'amiante-ciment). L'amiante floqué est un déchet dangereux qui doit être enfoui dans un centre de stockage habilité.

¹⁸⁴ <http://www.ademe.fr/expertises/dechets/elements-contexte/politique-vigueur/planification-prevention-gestion-dechets>

¹⁸⁵ http://www.ouest.cerema.fr/IMG/pdf/Club-Invest-Dechets-EC_V1-18112009_cle5162f4.pdf

B/ Panorama national

Production de déchets (CGDD 2015)

Comme déjà évoqué, le secteur du BTP est très largement majoritaire en ce qui concerne la production de déchets totaux, avec 72% de production de déchets en volume en 2012. Cependant, il ne représente plus que 1/5 des déchets de la catégorie dangereux (Figure 40), avec une baisse de près de 10% en deux ans. Le BTP émet ainsi 94% de déchets inertes, 5% de DIB et 1% de déchets dangereux. Les « résidus d'opérations thermiques » (3.5 millions de tonnes) ont doublé du fait d'une meilleure prise en compte des laitiers de la sidérurgie dans les bilans déchets. Les laitiers peuvent être réutilisés comme coproduits dans le BTP. Les mâchefers d'incinération représentent 3.3 millions de tonnes de déchets par an, et peuvent également être utilisés (e.g. en couches routières inférieures).

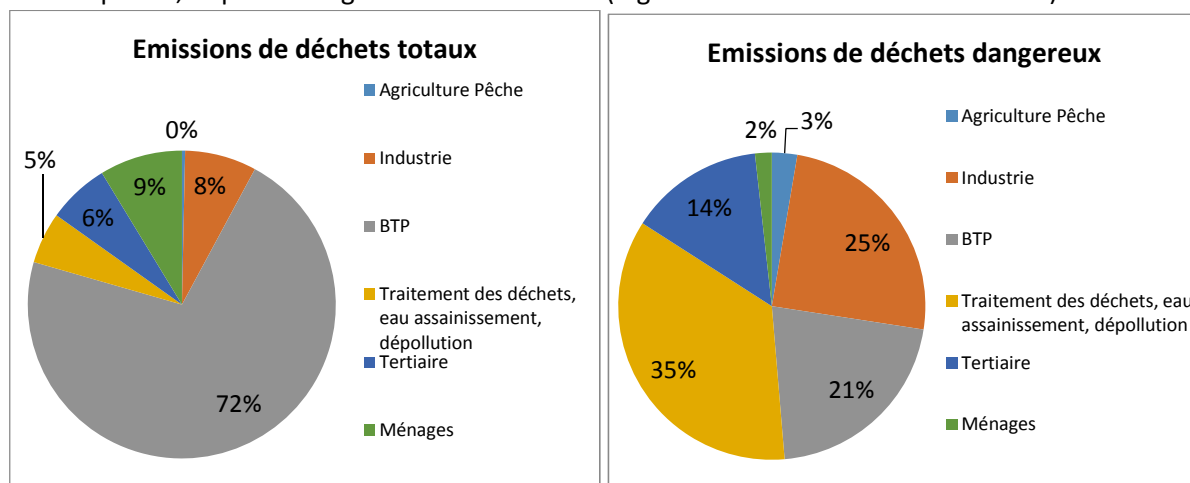


Figure 40 Émissions de déchets en 2012 par secteur (Source : auteur ; chiffres : CGDD 2015)

Traitement

92% en masse des déchets produits en France sont traités sur le territoire (raisons : exportations, importations, stocks, changement de masses volumiques, erreurs de mesures). 1/3 des déchets partent en centre de stockage quand 2/3 sont valorisés (voir Annexe 53). Les déchets dangereux représentent 8.8 Mt de déchets traités en 2012, dont 7% de déchets minéraux de la construction (à 90% recyclés), 4% de solvants usés (à 30% recyclés, et 70% recyclés avec ou sans récupération d'énergie), 4% de véhicules au rebut (à 95% recyclés), 3% de batteries et accumulateurs (à 99% recyclés), et 2% d'huiles usées (à 40% recyclés, et 60% incinérés). Cela représente donc un pourcentage non négligeable issu des véhicules. Parmi les DIB de l'industrie manufacturière (Annexe 54), les métaux sont très bien recyclés en valorisation matière (95%), de même que le verre (85%) et les plastiques (80%). Les caoutchoucs, les textiles, et pire encore les déchets en mélange sont en revanche plus difficilement recyclés, respectivement à 50, 40, et 10%.

C/ Entretien routier : quels déchets ?

Federec est la Fédération Professionnelle des Entreprises du Recyclage. Chaque année, Federec publie un rapport sur la gestion des déchets en France. Parmi les 12 filières analysées, on retrouve le BTP, la déconstruction automobile, le Verre (CYCLEM), le métal, et les métaux non ferreux. Pour autant, les chiffres donnés ne sont pas homogènes entre les secteurs, sans que le lecteur sache s'il s'agit d'un manque de données ou d'un défaut de transparence (qui viserait à ne pas stigmatiser certains secteurs).

Infrastructure

L'Union Nationale des Exploitants du Déchet¹⁸⁶ corrobore les informations du CGDD (2015) : les déchets du bâtiment et des travaux publics seraient principalement constitués de déchets inertes. Dans le secteur routier, les déblais hors terre végétale sont des déchets inertes (98% des déchets), tandis que les croûtes et fraisats d'enrobés sont des DIB¹⁸⁷.

L'IFEN (2006) donne les chiffres un peu datés suivants concernant les déchets routiers :

- 99% était constitué de déchets minéraux : terre, cailloux, mélanges bitumineux et bétons.
- 65% des déchets inertes étaient déjà recyclés – en remblais, techniques routières – ou utilisés en comblement de carrières, quand le reste était mis en décharge.
- 1Mt de déchets étaient considérés comme déchets dangereux : déchets de bois (98%), terres et boues de dragage polluées (1.3%), huiles usagées (0.13%) et piles et accumulateurs des engins de chantier (0.017%).

Nous n'avons pas trouvé de chiffres relatifs à la question précise de l'entretien des routes et particulièrement au resurfaçage. Toutefois, les matériaux des couches de roulement étant riches en liants hydrocarbonés et ces derniers ayant un coût financier important, il est probable qu'ils soient de mieux en mieux réutilisés. Parmi les 500 centrales françaises, la plupart sont équipées afin d'intégrer des agrégats à chaud ou en formules tièdes. Les techniques de recyclage à froid sont souvent réalisées in situ. Aux USA, sur 90 Mt/an, les agrégats sont réutilisés à plus de 95%¹⁸⁸. La norme « agrégats » régleme les teneurs possibles d'intégration de fraisats, qui sont loin d'être atteintes en France à l'heure actuelle (rappelons le taux moyen de 13% déjà évoqué (USIRF 2016a)) : jusqu'à 40% en assise, 20% en couche de liaison et 10% en couche de roulement. Pour information, on utilise la terminologie normalisée suivante : recyclage à faible taux en-dessous de 10% d'agrégats d'enrobés, à moyen taux entre 10 et 30% et à fort taux au-delà.

Véhicules

Le secteur de l'automobile produit des déchets variés qui, selon leurs caractéristiques, devront suivre des filières de recyclage, de traitement ou d'élimination différentes. Une nouvelle directive relative aux circuits de fin de vie est en vigueur depuis mai 2018¹⁸⁹. Ces déchets sont issus de l'entretien, la réparation et la fin de vie des véhicules, et produits par les garages et les ménages. Ils sont donc constitués de déchets d'usage et des Véhicules Hors d'Usage (VHU).

Types de déchets

On distingue plusieurs types dans les déchets d'usage. Les déchets spéciaux sont par exemple les huiles et solvants usés, les filtres à huile, liquides de frein et de refroidissement, ou les batteries. Les *déchets souillés* considérés comme des déchets toxiques sont constitués des fûts ayant contenus des produits toxiques, des chiffons imprégnés de matières toxiques, etc. Enfin, les déchets banals contiennent les pneus, pare-chocs, pare-brise, palettes, pièces métalliques, et emballages non souillés.

Filières de fin de vie

Les déchets recyclés dans le secteur automobile peuvent être soit réutilisés (pièces automobiles d'occasion), soit utilisés comme métaux (seconde fonte ou plus)

¹⁸⁶ http://www.uned.fr/dossiers/reglementation/les_dechets_du_btp#dechets_inertes

¹⁸⁷ http://www.ouest.cerema.fr/IMG/pdf/Club-Invest-Dechets-EC_V1-18112009_cle5162f4.pdf

¹⁸⁸ Asphaltroads.org

¹⁸⁹ Directive (UE) 2018/849 du Parlement Européen et du Conseil du 30 mai 2018 modifiant la directive 2000/53/CE relative aux véhicules hors d'usage entre autres

Les déchets banals peuvent rejoindre des filières de valorisation des déchets non dangereux, néanmoins leur valorisation est variable (selon caractéristiques).

Les batteries, huiles usagées, liquides de frein, filtres à huile, filtres à air, liquides de refroidissement, solvants et dégraissants, et emballages souillés par exemple requièrent une élimination selon des filières spécifiques dédiées aux déchets dangereux.

Véhicules Hors d'Usage

Chaque année, environ 1.5 millions de tonnes de véhicules hors d'usage, classés déchets dangereux, sont retraités (vidange des déchets classés dangereux) par des professionnels agréés (articles R543-153 à R543-171 du code de l'environnement) avant d'être démantelés. Les déchets qui résultent du démantèlement des VHU sont broyés avant d'être stockés ou valorisés énergétiquement en cimenterie.

226 000 tonnes de batteries et accumulateurs, soit 99% de la production, sont recyclés. En ce qui concerne le verre, une étude a été menée à la demande du MEDE et de l'ADEME afin de comprendre les enjeux de cette collecte : difficiles à retirer systématiquement (coûts de démantèlement) pour des filières de reprise peu nombreuses et donc un coût de transport important, la voie qui se dessine semble être de laisser le verre sur les carcasses pour broyage, tant que l'objectif européen de 85% de recyclage est atteint (Federec 2015).

En dehors des chiffres déjà cités, il semble difficile d'obtenir des données plus précises.

Focus sur les pneumatiques

Des pneus usagés peuvent être soit rechapables, revendables (occasion) ou réparables, soit non récupérables (PUNR). Ces derniers ne sont pas aisés à gérer car le gisement est dispersé, le transport est dispendieux, et le stockage consommateur d'espace. Depuis 2002, le coût de traitement d'un pneu usagé est inclus dans le prix d'achat, et les revendeurs et fabricants doivent se charger de leur fin de vie. Le *réemploi* : par rechapage, revente en occasion, utilisation en ensilage en agriculture, ameublement

- La valorisation matière : le broyage en poudrette pour une utilisation en revêtement de sol...
- la valorisation en travaux publics : remblais, confortement de digue...
- la valorisation énergétique : le caoutchouc a un pouvoir calorifique élevé. Les déchets de pneus peuvent donc servir de combustible de qualité dans les cimenteries.

En valorisation matière, les 3 éléments qui constituent les pneus sont séparés : métal, textile, gomme. En France, selon les experts, le métal est vendu à Arcelor-Mittal, les textiles sont utilisés en tant que combustible en cimenterie car leur odeur persistante de caoutchouc liée aux hydrocarbures résiduels les rend non adaptés comme matériaux d'isolation ou autre, et le caoutchouc est réduit en poudrette qui peut être utilisé en revêtement de sol (aires de jeux pour enfants, gymnases) ou plus récemment en bandes de caoutchouc pour les roues de manutention (société Roll-Gom). Cette dernière filière permet le recyclage de 54t de pneu par jour, soit 10% de la mise journalière sur le marché. Cependant, la vulcanisation en boucle du caoutchouc recyclé n'est mécaniquement pas infinie, tout comme certains métaux perdent en qualité mécanique à la refonte, contrairement au verre qui peut se recycler à l'infini (Federec 2015). Les filières de revalorisation des pneus sont présentées dans le Tableau 18.

Tableau 18 Filières de revalorisation des déchets du secteur automobile (Issu de Federec 2015)

	Entretien et réparation	DEVENIR
DECHETS SPECIAUX	huiles, solvants usés, filtres à huile, liquides de frein et de refroidissement, batteries	Tri et collecte spécialisée
DIB	pneus, pare-chocs, pare-brise, palettes, emballages non souillés	Valorisation possible : tri et collecte spécialisée
DECHETS DANGEREUX	fûts ayant contenus des produits toxiques, chiffons imprégnés de matières toxiques, etc.	

Déchets consommés relatifs à l'entretien routier (Federec 2015)

La valorisation des déchets peut se faire par réemploi, recyclage ou toute autre action visant à obtenir à partir des déchets soit des matériaux réutilisables soit de l'énergie. Nous avons présenté la question de la fin de vie des éléments du transport routier. Cependant, nous n'avons pas abordé la question dans l'autre sens (en dehors des agrégats d'enrobés), à savoir les déchets recyclés utilisés dans ce secteur. Les déchets Métaux Ferreux sont transformés à 97% en matières premières de recyclage, prêtes à être consommées dans les usines sidérurgiques, en particulier les fours électriques, pour fabriquer de l'acier. Ces aciers (12.5Mt/an) sont des aciers spéciaux utilisés dans l'automobile, des ronds à béton et des poutrelles pour le secteur de la construction et du bâtiment, ainsi que des laminés marchands destinés à l'industrie mécanique. Ils concernent donc fortement le secteur du transport routier. Les déchets non ferreux sont l'aluminium, le cuivre, l'étain, le plomb, et le zinc. Leur valorisation matière est de 100%, pour un tonnage de 1.9 MT/an, et profite à tous les secteurs, et par exemple les laminoirs qui produisent les tôles pour le secteur automobile. Enfin, sur 860 000t de plastiques collectés, plus de 90% sont re-commercialisés, et 8% sont destinés à l'automobile.

Électricité et déchets nucléaires

Le système d'entretien routier consomme de l'électricité. En France, le mix électrique est tout à fait atypique comparé à la scène internationale. Il nous semble donc important de faire un point particulier sur ces déchets nucléaires.

Les déchets nucléaires sont un type de déchets très particulier, dont la production est un point particulièrement sensible en France où le mix électrique se caractérise par un taux exceptionnellement haut de provenance nucléaire : 77% en 2014. Bien que la loi pour la transition énergétique prévoit une baisse importante de la part de nucléaire dans le mix électrique français (50% d'ici à 2020 et 32% d'ici à 2030) et que la consommation électrique ne représente qu'environ 22% de la consommation d'énergie française, le pétrole et le gaz naturel étant largement en tête de ce classement, il reste important de tenir compte de cette spécificité nationale. Les profils de consommation d'énergie primaire du transport routier montrent qu'aujourd'hui, avec les systèmes de traction thermique, la principale consommation d'énergie provient de la consommation d'usage des véhicules, soit de la consommation de ressources pétrolifères. Néanmoins, une vingtaine de pourcents de cette consommation totale serait liée à la production et l'entretien des véhicules, soit en large partie à une consommation électrique (de Bortoli 2014).

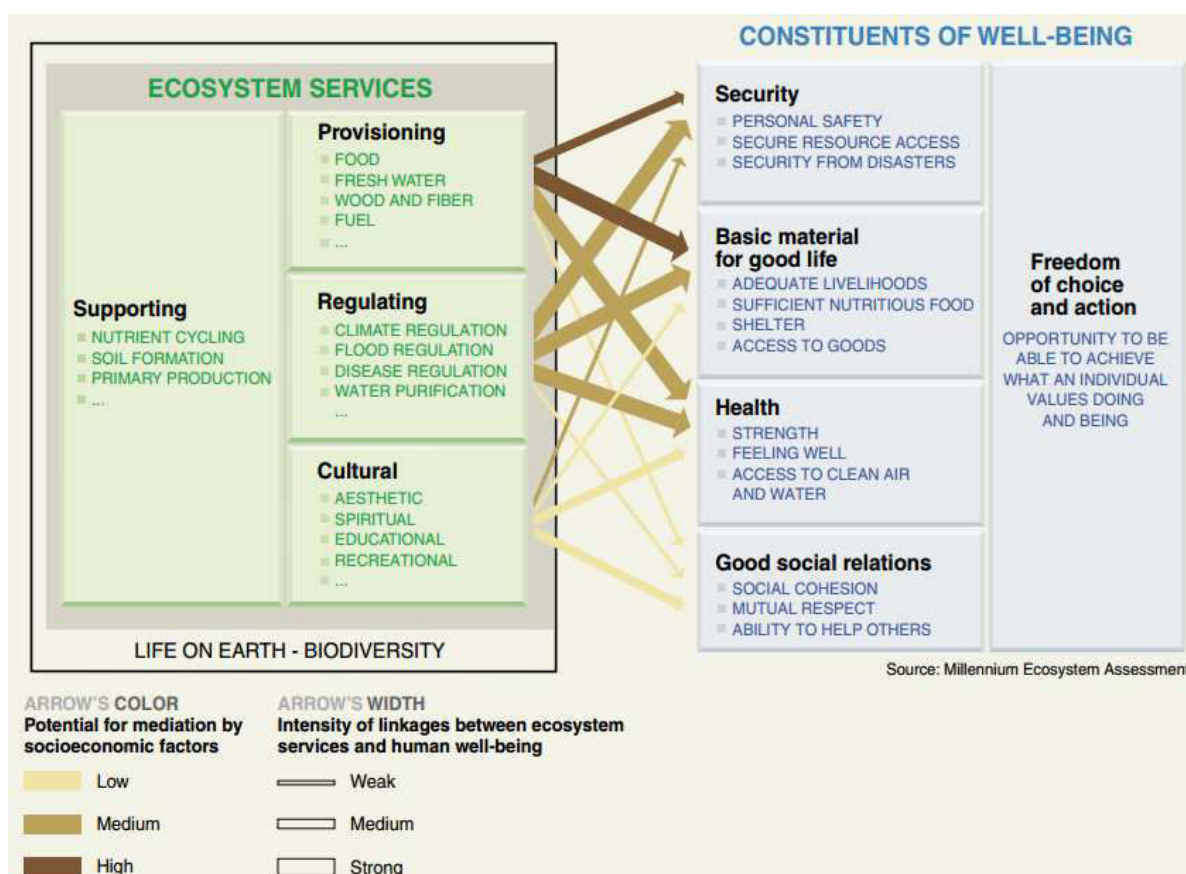
On classe les déchets selon leur activité – 4 niveaux d'activité et 3 demi-vies. L'autorité de sûreté nucléaire classe entre autres trois types de déchets nécessitant une prise en charge différente : les déchets de Haute Activité (HA) à Vie Longue (HA-VL) formés avec les atomes radioactifs des

combustibles nucléaires usés, les déchets de Faible et Moyenne Activité à Vie Courte (FMA-VC), et les déchets à Très Faible Activité (TFA).

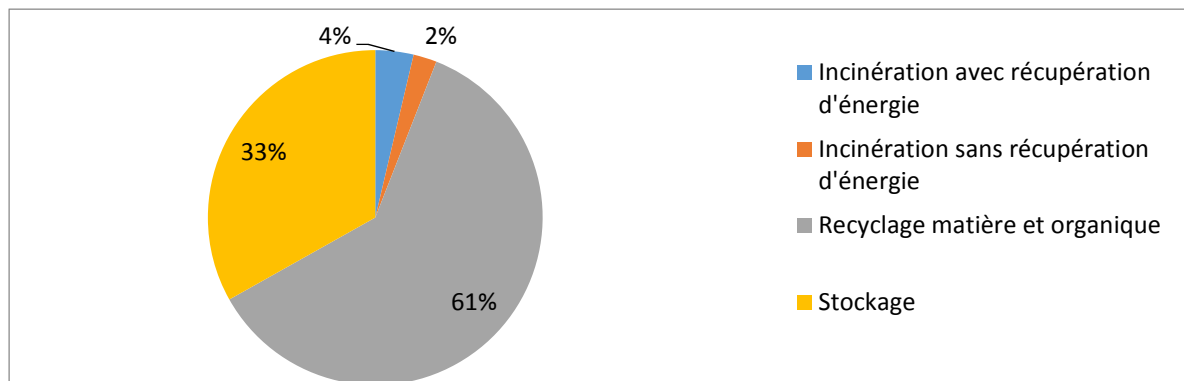
Selon l'État, la dépense pour la gestion des déchets radioactifs se montait à 642M€ en 2013, en baisse de 5.5% par rapport à 2012 (SOeS, Compte satellite de l'environnement 2015). Cette gestion est assurée quasi-entièrement par Areva et l'Agence Nationale pour la gestion des Déchets Radioactifs (Andra). L'Andra a également réalisé plusieurs chiffrages concernant les budgets nécessaires à la gestion des déchets nucléaires de haute et moyenne activités à l'horizon de 2125 (26 ou 35 milliards sur une centaine d'années, l'État ayant arrêté ce chiffre à 25M€), toutefois ces chiffrages varient, l'Autorité de sûreté nucléaire ayant d'ailleurs publié un avis en 2015 appelant à la prudence quant à ces chiffrages. Ils se répartissent globalement de manière égale entre investissement, exploitation et autres (impôts, assurances...). Selon les estimations de l'Andra, le coût du stockage reviendrait entre 1 et 2% du coût total de la production d'électricité.

Dans le détail, l'Andra présente l'évolution du coût total de gestion des déchets nucléaires au cours du temps, mais nous n'avons pas trouvé de coût de gestion par type d'activité (ni de production par type), qui aurait pu permettre une agrégation monétaire d'indicateurs.

Annexe 52. Relation entre les services écosystémiques et les constituants du bien-être humain (Millennium Ecosystem Assessment 2005)

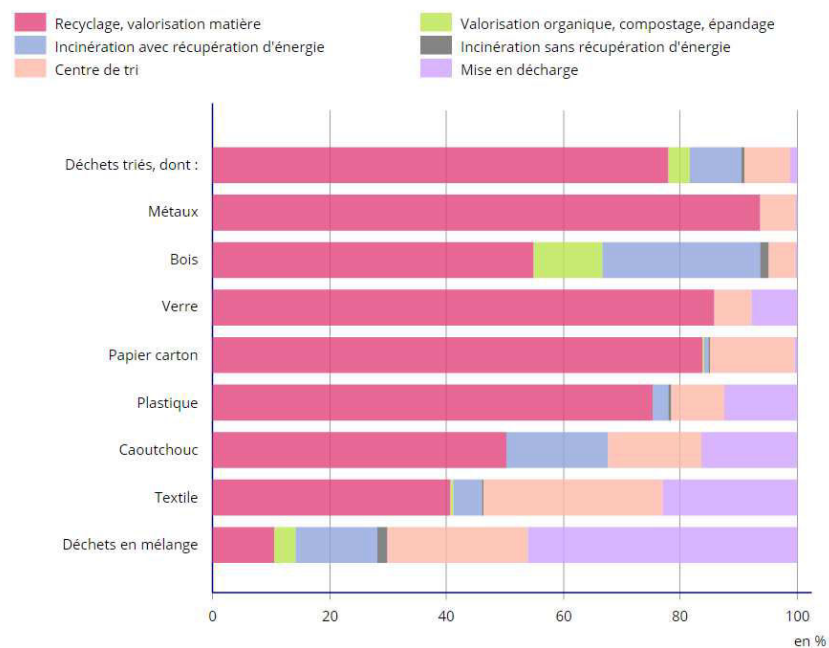


Annexe 53. Devenir des déchets totaux français sur le territoire (Source : auteur ; chiffres : CGDD 2015)



Annexe 54. Déchets banals de l'industrie manufacturière en 2012 (INSEE 2016)

Déchets banals de l'industrie manufacturière en 2012



CHAPITRE 3 – Indicateurs routiers d'état de surface et de performance : revue et questionnements

Table des matières

1	Indicateurs d'état de surface de chaussée : caractérisation et évolution	229
1.1	Panorama d'IRI français.....	230
1.2	Lien entre NBO et IRI	231
1.2.1	Sensibilité de l'IRI aux longueurs d'ondes et contribution par gamme	231
1.2.2	Vérification : tests de corrélations NBO et IRI.....	232
1.3	Loi d'évolution de l'IRI.....	234
1.3.1	Revue de littérature	234
1.3.2	Tests basiques français : corrélation entre IRI et âge de couche de surface autoroutière 236	
1.4	Effet de la technique de resurfacement sur l'IRI.....	237
2	Indicateurs usuels d'évaluation de la performance routière.....	237
2.1	Planification publique des transports et protocoles d'évaluation	238
2.1.1	Évaluation socioéconomique	238
2.1.2	Études environnementales.....	239
2.1.3	Synthèse	240
2.2	Indicateurs financiers	240
2.2.1	Définitions et calculs	240
2.2.2	Approche par acteur.....	244
2.2.3	Conclusion	246
2.3	Indicateurs macroéconomiques.....	247
2.3.1	Le modèle MESANGE.....	247
2.3.2	Analyse entrées-sorties	248
2.4	Indicateurs de performance routière.....	249
2.4.1	Gestion des routes.....	250
2.4.2	Performances normalisées.....	250
2.5	Indicateurs environnementaux par analyse du cycle de vie	251
2.5.1	ACV : définition et protocole normalisé de la méthode.....	251

Pour un entretien routier durable

2.5.2	Méthodes de caractérisation	252
2.5.3	Ancrage disciplinaire, typologie et bases de données	253
2.5.4	Application au transport routier et choix d'indicateurs.....	254
2.6	Conclusion	254
3	Conclusion : nécessité d'une nouvelle méthode combinatoire d'évaluation des stratégies d'entretien routier.....	255
4	Bibliographie.....	258

Les définitions du terme « indicateur » sont nombreuses dans la littérature mais assez convergentes. Nous proposons de retenir celle de l'Agence Européenne de l'Environnement (2005): « Un indicateur est une mesure¹⁹⁰, généralement quantitative, qui peut être utilisée pour illustrer et faire connaître de façon simple des phénomènes complexes, y compris des tendances et des progrès dans le temps ». L'indicateur permet d'évaluer l'état ou l'évolution d'un système généralement complexe, que l'on peut difficilement appréhender de manière directe : il peut ainsi être indicateur descriptif (i.e. indicateur d'état de situation) ou indicateur de performance (i.e. indicateur comparatif qui évalue l'écart entre situation actuelle et situation désirée) (UICN 2014).

Dans le chapitre précédent, nous nous sommes attachés à décrire d'un point de vue principalement qualitatif les effets de l'état de surface des routes selon plusieurs conceptions de la réalité terrestre : géophysique, écologique, puis socioéconomique. Nous avons vu comment l'entretien des routes est impliqué dans le fonctionnement de ces systèmes, et comment il impacte la performance du transport routier. La clé principale de ces phénomènes est la surconsommation des véhicules – en carburant, pneumatiques, pièces de suspension – et le bruit, engendrés par des déformations aux longueurs d'onde supérieures à quelques centimètres (voir chapitre 1 et 2). Aussi, nous souhaitons développer une méthode d'évaluation qui permette de quantifier l'ensemble des impacts d'un programme d'entretien sur ses parties prenantes en se concentrant sur l'influence de la déformation de la surface de chaussée, aspect aujourd'hui négligé dans les systèmes d'aide à la décision en France mais qui pourrait devenir tout à fait crucial avec le déclin des budgets attribués à l'entretien des routes. Le présent chapitre s'attachera donc d'abord à présenter plus en détail les indicateurs existants en termes d'état de surface présentés au chapitre 1 (IRI et NBO), à caractériser les valeurs classiques de ces indicateurs sur le réseau français, à interpréter leurs valeurs, à comprendre la vitesse d'évolution dans le temps de ces valeurs, et à étudier les liens entre IRI et NBO. En effet, l'IRI n'étant pas utilisé en France contrairement aux NBO, un des objectifs est de permettre à un gestionnaire ne disposant que de données en NBO d'utiliser tout de même la méthode que nous développerons. Toutefois, à partir d'un relevé de profil réalisé à l'APL, il est possible de calculer n'importe lequel de ces deux indicateurs.

Dans un second temps, puisque nous souhaitons évaluer la performance durable des programmes d'entretien des routes, nous recenserons les indicateurs de performance existants pour les infrastructures routières et particulièrement l'entretien quand ils existent, afin d'orienter la sélection ou le développement de nouveaux indicateurs spécifiques au chapitre 4. Nous présenterons les méthodes et indicateurs d'évaluation existants, nous discuterons leur plus ou moins grande adéquation à l'évaluation des opérations d'entretien, ainsi que leur complétude en termes d'impacts et de parties prenantes considérées comme d'étapes du cycle de vie prises en compte.

Après cette discussion, ce chapitre ébauchera une architecture de méthode d'évaluation globale en recombinaison et complétant les méthodes discutées ci-avant, et motivera une sélection typique d'indicateurs pour l'évaluation du resurfaçage sur la base des effets qualitatifs de l'entretien routier pour toutes ses parties prenantes, effets et parties prenantes mis en évidence au chapitre 2.

1 Indicateurs d'état de surface de chaussée : caractérisation et évolution

Comme nous l'avons vu au chapitre 2, des chercheurs ont quantifié les phénomènes de surconsommations véhiculaires engendrés par la déformation de surface de chaussée en fonction de valeurs d'IRI. Notre méthode d'évaluation nécessitera une telle quantification mais l'IRI est peu utilisé en France. Nous présentons ici les niveaux d'IRI auxquels on peut s'attendre sur les réseaux routiers français, l'étude du lien entre les indicateurs d'état de surface utilisés plus couramment en France –

¹⁹⁰ Étalon, grandeur prise comme terme de comparaison pour évaluer quelque chose

NPO, NMO, NGO – et l'IRI, les lois d'évolution d'IRI au cours du temps recensées dans la littérature et l'effet de divers types de travaux de resurfaçage sur ces valeurs.

1.1 Panorama d'IRI français

Les gammes d'IRI suivantes peuvent être retenues : inférieures à 2 m/km pour les autoroutes, entre 1.5 m/km et 3.5 m/km pour des chaussées neuves en général, pouvant monter jusqu'à 6 m/km pour les chaussées anciennes et même 10 m/km pour les chaussées endommagées (Figure 41).

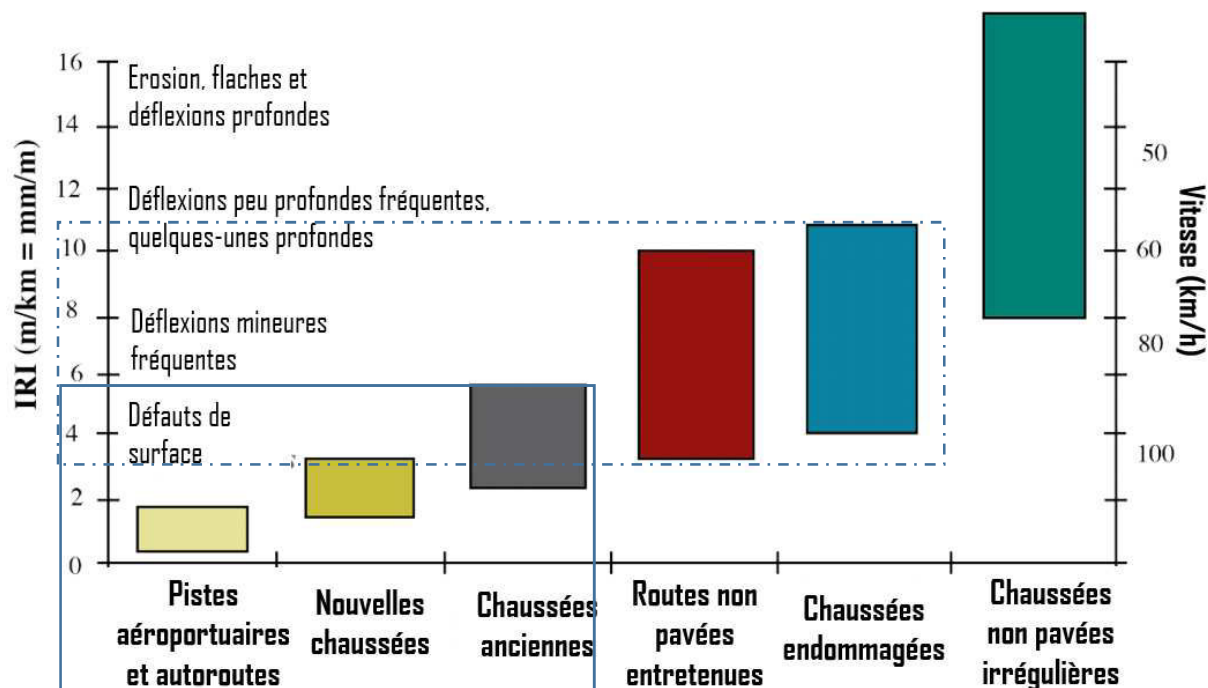


Figure 41 Gammes d'IRI selon les types de chaussées et leur état (inspiré de (Sayers et Karamihis 1998) dans (Greene et al. 2013), traduit en français) – encadrées en bleu : les gammes sur chaussées françaises

Ce sont en effet les valeurs d'IRI qui ont été grossièrement estimées à partir de NBO relevées sur autoroutes (Bertrand et al. 2015)¹⁹¹ et sur routes départementales (Daniel et al. 2017)¹⁹² en France. Nous présentons quelques courbes de fréquences cumulées d'IRI calculées ou estimés sur tronçons de routes françaises en Figure 42.

Notons que la relation PO-IRI de Delanne ne permet pas de calculer un niveau d'IRI inférieur à 0.88 m/km pour la chaussée, d'où l'impression de courbe cumulée tronquée : si l'estimation de l'IRI, comparée aux données d'IRI directement obtenues de la part de l'entreprise de relevés routiers française Vectra, est assez précise au-delà de 0.88 m/km, cette relation correspond néanmoins à ce que nous pourrions qualifier de « filtre passe haut ». Notons également que les profils de linéaire routier cumulé en fonction de l'IRI sur les deux échantillons routiers présentés semblent indiquer une dispersion de l'IRI beaucoup plus importante sur RD, ce qui vient conforter les niveaux d'état routiers constatés sur le terrain. Par exemple, les profils cumulés montrent un IRI médian de 0.65 et 2.65 respectivement sur autoroute et sur RD, et une probabilité cumulée d'IRI à 95% de respectivement 1.55 et 4.80 (IRI notés par des étoiles sur la Figure 42).

¹⁹¹ Projet d'étudiants de première année de l'École des Ponts ParisTech monté et encadré par Anne de Bortoli

¹⁹² Projet de master d'Elèves Ingénieurs du Corps des Ponts monté et encadré par Anne de Bortoli (GAAP du MS PAPDD)

Citons également quelques valeurs intéressantes trouvées dans Delanne (2008) : IRI = 0 : uni parfait ; IRI = 4 est la limite haute critique pour une autoroute ; IRI > 8 : route circulaire uniquement à des vitesses inférieures à 60 km/h.

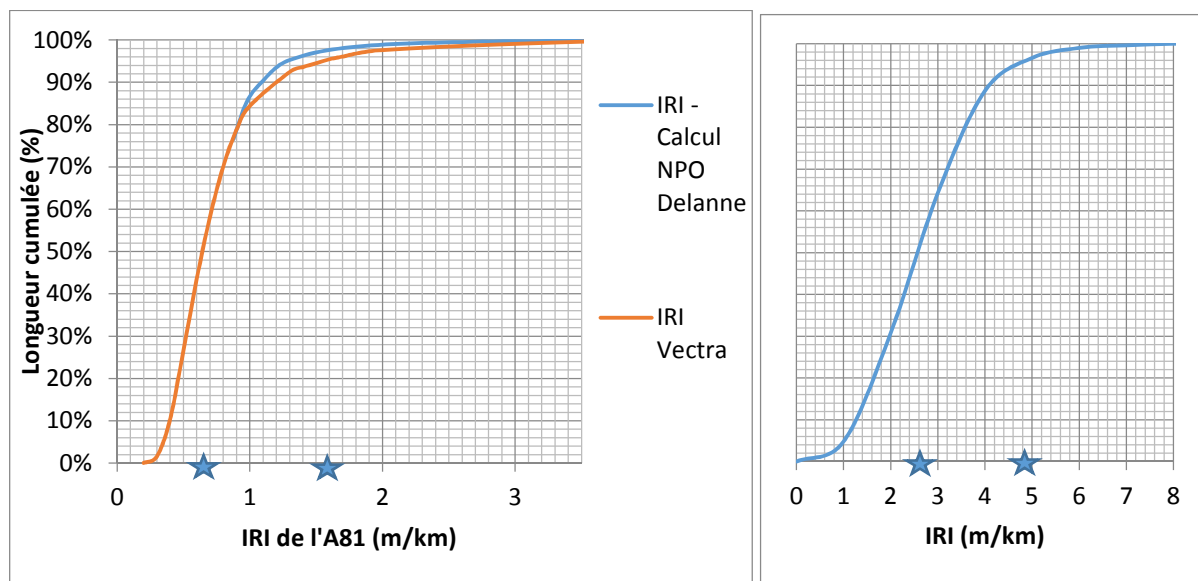


Figure 42 Courbe de probabilités cumulées croissantes de l'IRI de routes françaises : à gauche, IRI estimés par la relation PO-IRI de Delanne¹⁹³ sur les données 2015 d'un tronçon de l'autoroute A81 (PR175 à PR268 ; à droite, IRI estimés à partir de relevés d'accélération sur smartphone sur routes départementales de Loire-Atlantique (CD44) lors du projet MIRANDA

1.2 Lien entre NBO et IRI

Nous n'avons pas trouvé de document publié mettant en évidence une relation entre NBO et IRI. Toutefois, une étude interne a été réalisée à l'IFSTTAR¹⁹⁴ sur le sujet. Elle met en évidence de très bonnes corrélations (coefficient de détermination R² bien souvent supérieurs à 0.9, parfois valant 0.99, voir Tableau 19) entre IRI d'une part et NPO comme NMO d'autre part, de la forme :

$$IRI = a \cdot \exp(-b \cdot NBO)$$

Tableau 19 Quelques corrélations réalisées en interne à l'IFSTTAR entre NBO et IRI

Gamme de NBO	Valeur de a	Valeur de b	Coefficient R ²	Auteur IFSTTAR
NPO	8.18	0.22	0.99	Delanne
NMO	11.0	0.22	0.96	Delanne

Cependant, quelques corrélations n'impliquent pas l'universalité de validité de ces lois. L'IRI étant une donnée d'entrée à laquelle de nombreux indicateurs seront sensibles, nous proposons d'étudier la robustesse d'un calcul d'IRI à partir de mesures de NBO par gamme d'onde afin de décider si les données relevées par les gestionnaires sont suffisantes pour utiliser notre modèle, ou s'il est préférable d'utiliser des données d'IRI.

1.2.1 Sensibilité de l'IRI aux longueurs d'ondes et contribution par gamme

Sayers et Karamihis (1998) ont montré que l'IRI était particulièrement sensible aux longueurs d'onde comprises entre 1.25 et 30m. Néanmoins, l'IRI répond à des longueurs d'onde plus larges, et particulièrement aux longueurs d'onde plus faibles. Selon la caractérisation de l'état de surface en longueur d'onde et en amplitude, on peut donc potentiellement avoir des contributions très variables

¹⁹³ IRI = 8.1801*EXP(-0.2233*NPO)

¹⁹⁴ Document non référencé envoyé par Jean-Marc Martin, dont l'auteur est Yves Delanne, chercheur à l'IFSTTAR maintenant à la retraite

des différentes gammes d'onde d'irrégularité (de grandes amplitudes aux faibles longueurs d'onde pourraient participer autant que de faibles amplitudes aux longueurs d'onde entre 1.25 et 30m).

Vaillancourt et al. (2003) se sont d'ailleurs intéressés à la contribution des NBO par bande d'onde aux valeurs d'IRI. Trois planches ont été analysées, avec chaque bande d'onde des NBO françaises séparée en deux ou 3 sous-bandes. Les résultats sont les suivants et ne montrent pas de tendance de contribution par gamme d'onde :

- Planche 1 : GO 1.4 et 3.6%, MO 11 et 11%, PO 35%, 8% et 2%
- Planche 2 : GO 43 et 12.6%, MO 17 et 25%, PO 15, 4.5 et 3%
- Planche 3 : GO 1.4 et 9.1%, MO 18 et 28%, PO 23, 6 et 2%

En resurfaçant une chaussée dont la contribution des PO à l'IRI est importante, des chercheurs ont montré que l'IRI s'améliorait significativement d'une part, et que d'autre part la contribution des PO à l'IIRI était drastiquement restreinte. Ainsi, un resurfçage va améliorer d'autant plus l'IRI d'une chaussée que cet IRI est élevé du fait de défaut qui ne sont pas relatifs aux couches de chaussées profondes (couche de forme, couche de fondation, et couche de base).

Cette étude montre que, malheureusement, il n'est probablement pas très robuste d'utiliser une loi de calcul d'IRI à partir de la NBO d'une seule gamme d'onde (NPO, NMO ou NGO), à moins que la valeur d'IRI ne soit très majoritairement due aux défauts : soit uniquement de surface, soit uniquement d'assise. Et encore, cela exclut les irrégularités aux longueurs d'onde plus basses que celles des PO et plus hautes que celle des GO.

Pour autant, hors défaut de compactage ou malfaçons, peut-être pourrait-on considérer cette approche comme suffisamment rigoureuse. Pour affiner ces idées, nous avons décidé d'étudier d'autres chaussées françaises.

1.2.2 Vérification : tests de corrélations NBO et IRI

Nous avons effectué de nouveaux tests de corrélations entre IRI et NBO. Pour cela, deux jeux de données de l'IFSTTAR¹⁹⁵ ont été testés. Un premier jeu, basé sur un circuit de référence de routes départementales qui forme une boucle autour du centre de Nantes, a été testé par Martin. Il a l'avantage de disposer de niveaux d'uni variés (En IRI, moyenne à 2.3, minimum à 0.74, maximum à 7.5, intervalle interdécile [0.94 ; 5.25]). La population de l'échantillon comporte 115 individus. La courbe des fréquences cumulées en IRI est présentée en Figure 43.

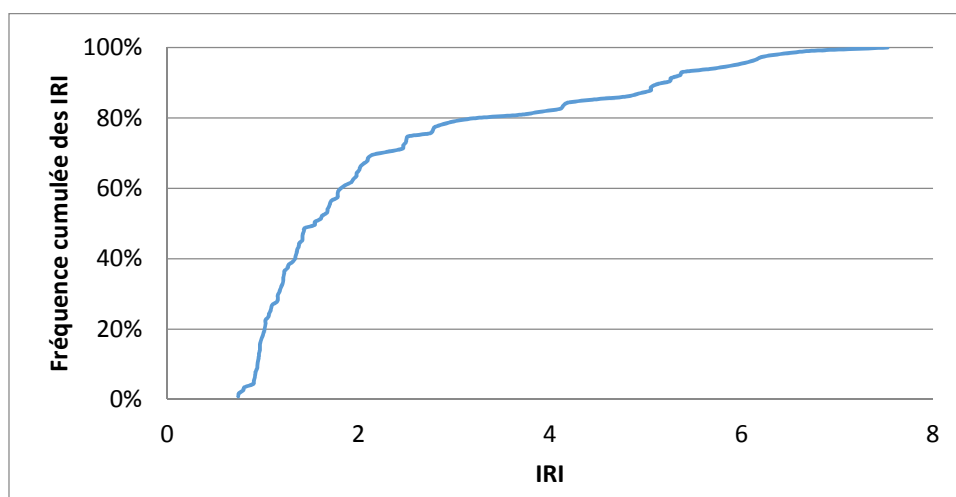


Figure 43 Fréquence cumulée des IRI mesurés sur un circuit départemental nantais

¹⁹⁵ Fournis par JJ Martin

Un second jeu de données de tronçons de chaussées autoroutières mesurés par le multiprofilomètre MLPL de l'IFSTTAR a été testé dans cette thèse. Les mesures sont exploitées avec le logiciel de référence APL2000. La population de l'échantillon comporte 539 individus. Les niveaux d'IRI sont moins dispersés sur ces chaussées autoroutières que sur départementales (moyenne à 1.05, minimum à 0.53, maximum à 5.15, intervalle interdécile [0.74 ; 1.43]).

Les NPO, NMO et NGO étant calculées à partir de relevés d'état de chaussée en bi-trace (i.e. dans les bandes de roulement des véhicules lents, i.e. trace de gauche et trace de droite de la voie lente) à des pas différents, respectivement tous les 20, 100 et 200m, tandis que l'uni a été sorti à un pas de 100m, nous avons effectué des corrélations sur NPO moyennées sur 100m (5 mesures à chaque fois) et sur NGO dédoublés, à partir des notes moyennées sur les indicateurs des deux traces.

Les résultats des tests de corrélations exponentielles sont présentés dans le Tableau 20.

Tableau 20 Étude des corrélations exponentielles entre indicateurs de Notation par Bande d'Onde moyennés bi-traces et IRI moyenné bi-trace

Type de route	Gamme de NBO	Valeur de a	Valeur de b	Coefficient de détermination R ²	Auteur
(a) Départementales	NPO	13.6	0.25	0.83	Martin
(a) Départementales	NMO	7.50	0.20	0.92	Martin
(a) Départementales	NGO	6.60	0.20	0.52	Martin
(b) Autoroutes	NPO	7.80	0.21	0.29	de Bortoli
(b) Autoroutes	NMO	7.32	0.21	0.75	de Bortoli
(b) Autoroutes	NGO	2.92	0.12	0.28	de Bortoli

On remarque que si les corrélations NBO-IRI sont correctes en petite et moyennes ondes sur le circuit nantais (R²=0.83 et 0.92 respectivement), elles ne sont correctes qu'en moyennes ondes sur le tronçon autoroutier étudié. Les corrélations NMO-IRI étant les meilleures en termes de coefficient de détermination, nous proposons de réaliser des corrélations plus fines sans moyenner les indicateurs de NBO et d'IRI en bi-traces. Les corrélations réalisées par trace (gauche et droite) sont présentées en Tableau 21.

Tableau 21 Étude de corrélations entre Notation en Moyennes Ondes et IRI

Trace	Fonction	Valeur de a	Valeur de b	Coefficient R ²
Droite	$a \cdot \exp(-bx)$	7.41	0.21	0.72
Gauche	$a \cdot \exp(-bx)$	5.92	0.19	0.70
Droite	$b - a \cdot \ln(x)$	2.38	6.34	0.81
Gauche	$b - a \cdot \ln(x)$	2.07	5.63	0.76
Droite	$-a \cdot x + b$	0.32	4.01	0.76
Gauche	$-a \cdot x + b$	0.27	3.56	0.69

Les résultats sont surprenants : non seulement les corrélations à partir de mesure moyennées semblent meilleurs (R²=0.75 en indicateurs moyennés bi-traces contre 0.70 ou 0.72 selon la trace considérée sans moyenne), mais en plus la forme exponentielle n'offre pas les meilleures corrélations contrairement aux études préliminaires brièvement menées à l'IFSTTAR : les données par trace ont les meilleures corrélations NMO-IRI en logarithme (R²=0.81 et 0.76 respectivement pour la trace droite et la trace gauche). Pourtant, passer par la moyenne agrège l'information donc devrait faire perdre en qualité de donnée. On pourrait l'expliquer par un effet lissant de la moyenne. Les NMO sont arrondies au demi-point contrairement à l'IRI. En moyennant droite et gauche, on atténue l'effet de cet arrondi. Les corrélations en logarithme sont effectivement un peu meilleures sur cet exemple particulier : il

faudrait le confirmer en disposant de jeux d'essais présentant des unis moins bons que sur autoroute pour disposer de plus de points en notes très faibles (et IRI élevés).

Données d'état de surface routière à utiliser

Dans le cadre de notre méthode de quantification, cette vérification nous pousse à préconiser dans la mesure du possible l'utilisation de données d'état de surface dans le format « IRI » plutôt que de passer par les NBO pour estimer l'IRI. Néanmoins, dans le cas où les données sous format IRI n'existeraient pas, il pourrait être possible faute de mieux d'utiliser des valeurs de NMO afin d'estimer un IRI. Nous proposons la relation $IRI = 7.7 \exp(-0.21NMO)$ issue de la bonne corrélation sur le circuit départemental nantais, très semblable à la bonne corrélation trouvée sur les indicateurs moyennés bi-traces sur tronçon autoroutier. Il convient tout de même de garder à l'esprit la fragilité de cette relation.

Il faut également se poser la question de l'aspect « bi-trace » de la relation véhicule-chaussée : nous considérerons que la moyenne des IRI bi-trace en un point d'abscisse détermine la surconsommation et la sur-usure du véhicule. Cependant, c'est une approximation, chaque roue étant affectée par l'IRI au contact pneu-chaussée. De plus, il peut également y avoir des variations d'IRI sur la largeur de balayage de la chaussée par les pneumatiques. Un test sur réseau autoroutier montre toutefois des écarts d'indicateurs bi-trace en moyenne assez faibles (0.14 m/km) avec un écart maximal de 1.4 m/km.

1.3 Loi d'évolution de l'IRI

À partir des valeurs d'IRI à t0 de la chaussée étudiée, nous avons besoin de connaître l'évolution de la surface de cette chaussée sur la période d'évaluation choisie. Pour cela, nous avons procédé à une revue de littérature sur le sujet ainsi qu'à quelques tests succincts sur des données de gestionnaire.

1.3.1 Revue de littérature

1.3.1.1 Modèles statistiques : dépendance au temps

Durant la dernière décennie, une dizaine d'études académiques se sont intéressées à l'effet de l'état de surface des routes sur la résistance au roulement. Plusieurs d'entre elles proposent des lois d'évolution de l'IRI en fonction du temps, parfois à type de climat ou de chaussée fixés. Le Tableau 22 recense les lois et les principales caractéristiques de ces études pour les chaussées bitumineuses.

Tableau 22 Synthèse des études d'évolution de l'IRI

Pays	Méthode	Pop. (nb)	Forme de régression	Pente de l'IRI (m/km.an) (XXa = période d'observation)	Référence	commentaires
Virginie (USA)	Mesures en 1998 et 2005 et pente moy.	47	a + bt	+ 0.019 (7a)	(McGhee et Gillespie 2006)	IRI(t=0)=1.4 ou 1.27 m/km
Californie (USA)	BDD Caltrans et régressions	?	a + bt	+0.033 à +0.13 (4a)	(T. Wang, Lee, Harvey, et al. 2012)	Routes I-5 South et SR-70 West
Californie (USA)	BDD Caltrans et régressions	?	a + bt ^c (c ≤ 1)	+ 0.047 à + 0.089 (30a)	(Tseng 2012)	Selon climat, trafic lourd, et surface (ESU/enrobé)
Californie (USA)	BDD Caltrans et régressions	?	a + bt ^c (c > 1)	+ 0.23 (10a)	(T. Wang, Harvey, et Kendall 2013)	Très forte pente
Illinois (USA)	Chatti et Zaabar 2012 ?	?	1,1 + 0.055t	+ 0.055 (5a)	(Yang 2014)	Données : 14miles, I-90 (2000-2005). R ² ?
Virginie (USA)		?	at ² + bt + c		(Bryce et al. 2014)	
Portugal	PSI => IRI => régression	?	at ² + bt + c	<u>Entretien lourd</u> : 0.035 (10a), 0.076 (30a), 0.12 (50a) <u>Entretien léger</u> : 0.19 (10a), 0.35 (20a), 0.50 (30a), 0.65 (40a), 1.0 (50a)	(Santos 2015)	R ² ?
Illinois (USA)	Données internes (Illinois ?)	?	a + bt	+0.093 (15a)	(Yang et al. 2015)	R ² ?

VR : voie rapide ; VL : voie lente ; PSI : Pavement System Index ; moy : moyenne ;

Ainsi, l'Équation 4 permet de calculer l'évolution de l'IRI (en m/km) des chaussées en enrobés en fonction de l'IRI après travaux (Wang et al. 2013).

Équation 3 Formule générique d'évolution de l'IRI en-dehors de travaux routiers selon l'étude bibliographique réalisée

$$IRI(t) = a. (t + b)^c$$

Notons également que les résultats de dégradation d'IRI au cours du temps montrés dans l'étude de Tseng (2012) sont contre-intuitifs dans la mesure où l'on obtient une dégradation environ deux fois plus rapide de l'IRI des enrobés (fourchette haute des pentes, environ +0.08 m/km.an) que de celui des chaussées traitées aux ESU (environ +0.05 m/km.an). Or, les techniques d'ESU améliorent l'imperméabilité et l'adhérence de la route, mais elles ne reprofilent pas la chaussée : l'épaisseur des techniques est d'environ 10mm selon notre enquête auprès des gestionnaires, elles ne viennent donc pas gommer les déformations aux longueurs d'onde sur l'IRI (>5cm). Si l'IRI a une évolution convexe au temps comme l'a montré Wang et al. dans leur étude de 2013 (T. Wang, Harvey, et Kendall 2013), resurfacer une chaussée à l'ESU ne devrait pas avoir un grand impact sur l'IRI, et devrait même s'ensuivre d'une accélération de la dégradation de l'IRI avant prochain resurfacement, comparé au cycle précédent.

Le second modèle de Wang et al. (2013) montre également que l'IRI se dégrade d'autant plus vite que le climat est rude ($c=1.44$ pour un climat rude, contre 1.35 pour un climat doux).

Ces lois empiriques ont toutes été réalisées sur données américaines. De plus, certains auteurs (Trupia et al. 2017) estiment que ces modèles empiriques sont spécifiques à chaque site et qu'en l'absence de lois spécifiques à la route étudiée, il convient de réaliser des analyses de sensibilité sur les pentes de dégradation d'état de surface des routes. Il est vrai que les lois de la littérature varient, autant dans leur forme (lois linéaires, lois polynomiales d'ordre deux ou encore lois de puissance) que dans les pentes d'évolution d'IRI moyennes qu'elles mettent en évidence, variant du simple (+0.02 m/km.an dans (McGhee et Gillespie 2006)) au décuple (+0.23 m/km.an dans (T. Wang, Harvey, et Kendall 2013)) sur des périodes d'observation relativement similaires (0 à 7 ans Vs 0 à 10 ans). Un échange par e-mail avec John Harvey, ayant piloté au UC Pavement Research Center les études de Tseng (2012) et Wang (X. C. Wang et Sanders 2012; T. Wang, Lee, Kendall, et al. 2012; T. Wang, Lee, Harvey, et al. 2012; T. Wang, Harvey, et Kendall 2013, 2014a, 2014b) nous précise d'ailleurs que les modèles évoluent rapidement selon la qualité des données routières mises à disposition et qu'un nouveau modèle californien devrait aboutir en automne 2017 grâce à de nouvelles données fournies par Caltrans, le DoT de Californie. En bref, ces modèles statistiques restent très fragiles mais néanmoins majoritairement utilisés.

1.3.1.2 Dépendance au trafic

L'étude académique semblant la plus détaillée est présentée dans un article de Wang et al. (T. Wang, Lee, Kendall, et al. 2012) assorti de deux rapports complémentaires (T. Wang, Harvey, et Kendall 2013; T. Wang, Lee, Harvey, et al. 2012). Selon Wang et al. (2013), pour les chaussées en enrobé, la progression de l'IRI dépend principalement du niveau de trafic lourd : elle va ainsi être différente sur chaque voie pour une liaison multivoie (e.g. 2x2 voies, 2x3 voies ou 2x4 voies).

L'Équation 4 permet de calculer l'évolution de l'IRI (en m/km) des chaussées en enrobés en fonction de l'IRI après travaux (T. Wang, Harvey, et Kendall 2013).

Équation 4 Formule générique d'évolution de l'IRI en-dehors de travaux routiers selon l'étude bibliographique réalisée

$$IRI(t) = IRI(t = 0) + a. t^b$$

Avec $t=0$ le moment de mise en service après resurfacement, a coefficient dépendant de la technique de resurfacement, du trafic lourd et du climat (sur les données de calage : de 5.9 en trafic inférieur à 100 000 essieux de 8t équivalent à l'année, hiver doux et épaisseur de resurfacement moyenne (3 à 7.5cm), à 6.8 en hiver rigoureux et plus de 500 000 essieux lourds équivalents par an), et b dépendant uniquement

du climat (1.35 si climat doux, 1.44 si climat sévère, selon groupement par l'auteur de la classification de Caltrans¹⁹⁶).

Après avoir testé les variables explicatives d'évolution de l'IRI par probabilité critique (p-value ou niveau de signification observé), Tseng (2012) a réalisé ses corrélations temporelles à type de climat et classe de trafic lourd fixés, en modifiant les types de climat selon ses résultats de probabilité critique, par type de resurfaçage. Ce sont ces modèles que Wang (T. Wang, Harvey, et Kendall 2013) réadapte avec de nouvelles données¹⁹⁷.

1.3.1.3 Modèles mécaniques-empiriques

Selon Haider et al. (2016), une loi de prédiction d'IRI peut se déterminer selon 4 paramètres (dont trois relatifs à des dégradations de surface) et 4 coefficients de calage, comme indiqué sur l'Équation 5.

Équation 5 Loi de prédiction d'IRI peut se déterminer selon 4 indicateurs de dégradation

$$IRI = IRI(t_{R+}) + c_1 \cdot P_{Orniérage, moy} + c_2 \cdot S_{fissuration, \% / m} + c_3 \cdot L_{fissuration\ transversale, \% / m} + c_4 \cdot FS$$

Avec $P_{Orniérage, moy}$ profondeur d'orniérage moyenne, $S_{fissuration, \% / m}$ pourcentage surfacique de chaussée fissurée en bande de roulement¹⁹⁸, $L_{fissuration\ transversale, \% / m}$ longueur de fissuration transversale (en pied par mile) et FS facteur de site. Les auteurs proposent une formule de calcul du facteur de site qui se calcule selon l'âge de chaussée, l'indice de plasticité du sol, les précipitations annuelles moyennes et un indice de gel annuel. Ils spécifient néanmoins que le DoT du Michigan utilise une autre formule.

Ce modèle va à l'encontre de l'affirmation de Yang (2014) qui, sur la base de données d'une route en Illinois, déclare qu'il ne semble pas y avoir de loi permettant de relier travaux d'entretien de routine (pontage de fissure, rebouchage des nids de poule) et évolution de l'IRI. En effet, traiter les fissures réduirait logiquement $S_{fissuration, \% / m}$ et $L_{fissuration\ transversale, \% / m}$, donc l'IRI.

1.3.2 Tests basiques français : corrélation entre IRI et âge de couche de surface autoroutière

Les observations statistiques et mécaniques-empiriques ne coïncidant pas, nous avons décidé de mener quelques tests simples complémentaires afin de statuer sur la meilleure approche d'évolution de l'IRI à adopter dans notre méthode.

Un premier test a été mené sur un tronçon d'autoroute anonymisé que nous appellerons A00 du réseau Cofiroute, afin de croiser indicateurs d'IRI calculés à partir des NMO (relation préconisée précédemment) et des NPO et durée écoulée depuis le dernier resurfaçage. Notons que le climat est homogène sur le tronçon, de même que le niveau de trafic lourd. Les tests ne montrent pourtant aucune corrélation entre NBO et âge de la couche de surface, quelle que soit la NBO choisie pour calculer l'IRI, et que l'on fasse une différenciation par type de technique de resurfaçage ou pas.

Nous avons réalisé un second test, sur un tronçon d'autoroute d'environ 90 kilomètres (population de 9309 individus). À nouveau, aucune corrélation ne peut être effectuée entre âge de la couche de surface et IRI calculé à partir des NMO.

Plusieurs hypothèses pourraient expliquer cette absence de corrélation. D'abord, nous n'avons pas tenu compte des valeurs d'IRI après construction de la chaussée ou après resurfaçage : nous avons considéré les valeurs d'IRI de tout le linéaire de chaussée à un instant t donné et l'âge de la couche de surface à cet instant. Or, comme nous l'avons précédemment expliqué, le resurfaçage ne va jouer que sur les faibles longueurs d'onde de l'uni. Aussi, si les valeurs d'IRI à t_0 présentent des valeurs trop

¹⁹⁶Reflète les températures, les précipitations, le gel/dégel, et l'irradiation solaire

¹⁹⁷ Selon nos échanges par e-mail avec John Harvey

¹⁹⁸ Incluant faïençage, fissuration longitudinale et fissuration de réflexion (pour chaussées béton : quand la couche de surface en enrobé se casse du fait de joints de dalles béton qui se décèle par exemple ou de rupture de la dalle

dispersées, cela ne permet pas d'obtenir une corrélation tangible entre IRI(t) et l'âge de la couche de roulement. Il faudrait pour vérifier cette hypothèse récupérer les valeurs d'IRI à réception du chantier. La deuxième hypothèse serait que le calcul d'IRI à partir des NBO pourrait être trop mauvais, tout comme l'échantillon de données. Nous avons donc testé des corrélations entre NBO et âge de la couche de surface, sans résultat de nouveau. En principe, la valeur des NPO (et NMO aux petites longueurs d'onde) est uniquement relative à la qualité des couches de chaussées superficielles (Cerema 2014), et donc, hors malfaçon de chantier (ce qui est vérifié à réception), les NPO devraient être corrélées à l'âge de la couche de roulement. Or, encore une fois, nous ne trouvons aucune corrélation entre ces deux variables.

1.4 Effet de la technique de resurfaçage sur l'IRI

L'IRI après travaux dépend de l'IRI avant travaux et de la technique de resurfaçage (T. Wang, Harvey, et Kendall 2013; Yang 2014). En particulier, à dire d'experts, plus l'on utilise une technique épaisse, plus il est potentiellement possible d'améliorer l'IRI. Wang et al. (2013) suggèrent une loi générique présentée par l'Équation 6, où $IRI(t_{R+})$ est l'IRI après resurfaçage, $IRI(t_{R-})$ est l'IRI avant resurfaçage, et a et b sont des coefficients qui dépendent de la technique de resurfaçage.

Équation 6 Loi d'effet d'un resurfaçage sur l'IRI

$$IRI(t_{R+}) = a \cdot IRI(t_{R-}) + b$$

Les coefficients (et hypothèses) sont disponibles p36-37 du rapport pour un resurfaçage d'épaisseur moyenne, soit 3 à 7.5 cm environ (0.1 à 0.25 pieds). Transformés dans le système international d'unités, ils valent $a=0.4$ et $b=6.70^E-1$ m/km.

Lois d'évolution de l'état de surface routière appliquées à l'IRI

L'IRI d'une chaussée dépendrait de 5 variables explicatives : état de surface après travaux (construction originelle ou resurfaçage), temps écoulé depuis les derniers travaux et techniques d'entretien utilisées, trafic lourd et climat. Ces variables ont été mises en évidence par plusieurs études américaines utilisant les bases de données routières de DoT et des tests de probabilité critique. À climat et trafic fixés, la forme de la fonction d'évolution de l'IRI en fonction du temps après construction varie selon les auteurs, de même que les évolutions moyennes sur le même temps : elles varient grossièrement de +0.02 m/km.an à +0.2 m/km.an. Cependant, le coefficient de détermination R^2 des corrélations avancées n'est jamais indiqué dans les publications, et les tests partiels réalisés sur deux jeux de données françaises n'ont pas permis de valider ces corrélations. Certains auteurs préconisent simplement d'effectuer des analyses de sensibilité locales sur ce paramètre d'évolution de l'IRI. Faute d'obtention de données pour pousser plus avant l'étude statistique des évolutions d'IRI en France, nous choisissons donc de reprendre une évolution linéaire de l'IRI à l'âge du revêtement après derniers travaux de +0.05 m/km.an (valeur moyenne des études bibliographique hors valeurs extrêmes) et nous réaliserons des analyses de sensibilité sur la pente considérée. Notons que l'évolution de l'IRI est plus lente également sur voie rapide que sur voie lente : en première approche nous ne ferons pas de différence, ce qui impactera néanmoins les résultats du fait de la répartition des trafics sur les routes multivoies, approximation dont nous reparlerons lors du traitement de l'étude de cas.

2 Indicateurs usuels d'évaluation de la performance routière

L'évaluation de la performance routière nécessite de définir cette performance – soit les impacts que l'on souhaite évaluer – et d'en donner une représentation chiffrée simple sous la forme d'un indicateur, calculé selon une méthode de quantification rationnelle et transparente. Nous avons passé en revue dans le chapitre 2 les impacts qualitatifs des pratiques de resurfaçage. Nous présentons maintenant les principaux indicateurs et méthodes afférentes utilisées pour évaluer la performance

routière. Il existe des procédures d'évaluation de la performance socioéconomique et environnementale des projets neufs d'infrastructures de transport, et des normes qui cadrent l'évaluation de la performance des ouvrages de génie civil en termes de développement durable, la dernière en date étant la norme ISO EN 15804+A1 (AFNOR 2014). Celle-ci renvoie à d'autres normes, par catégorie de performance : ISO 14040 et 14044 pour l'environnement (AFNOR 2006a, 2006b), ISO 15932 (Hetzl 2009) pour les principes généraux de performance sociale, et ISO 15686-5 (AFNOR 2016) pour la performance économique fondée sur le coût et la valeur financière. Ces normes ne sont néanmoins pas relatives à la question précise du resurfacement routier. Par ailleurs, les gestionnaires routiers utilisent également des indicateurs de performance pour surveiller et gérer leur patrimoine. Nous présentons maintenant ces indicateurs.

2.1 Planification publique des transports et protocoles d'évaluation

En France, la planification des transports s'effectue à plusieurs échelles (Figure 44) donnant lieu à des documents supports qui doivent être cohérents entre eux : l'échelle nationale avec les schémas nationaux ou commissions nationales (dernier exemple en date : rapport Mobilité 21, aussi appelé rapport Duron (Duron et Ministère des transports, de la mer et de la pêche 2013)), à l'échelle intercommunale avec le Schéma de Cohérence Territoriale, à l'échelle de l'agglomération avec le Plan de Déplacement Urbain, puis à l'échelle du projet de transport (Avant-projet sommaire : études d'opportunité, de faisabilité et études préliminaires, puis avant-projet détaillé et exécution du projet). Le processus d'arbitrage ou de priorisation s'appuie de manière obligatoire ou volontaire sur des outils d'évaluation, dont certains propres à l'environnement. Quelle que soit l'échelle de planification, les incidences environnementales des plans et programmes doivent être évalués (Article L122-4 du code de l'environnement¹⁹⁹). Le dossier d'enquête publique remis à la fin de l'avant-projet sommaire contient en particulier les résultats de deux évaluations incluant des considérations environnementales – l'ESE et l'EIE – auxquels s'ajoutent un dossier « loi sur l'eau » et une éventuelle étude d'incidence Natura 2000. En revanche, il n'y a pas de tel protocole pour l'entretien routier.

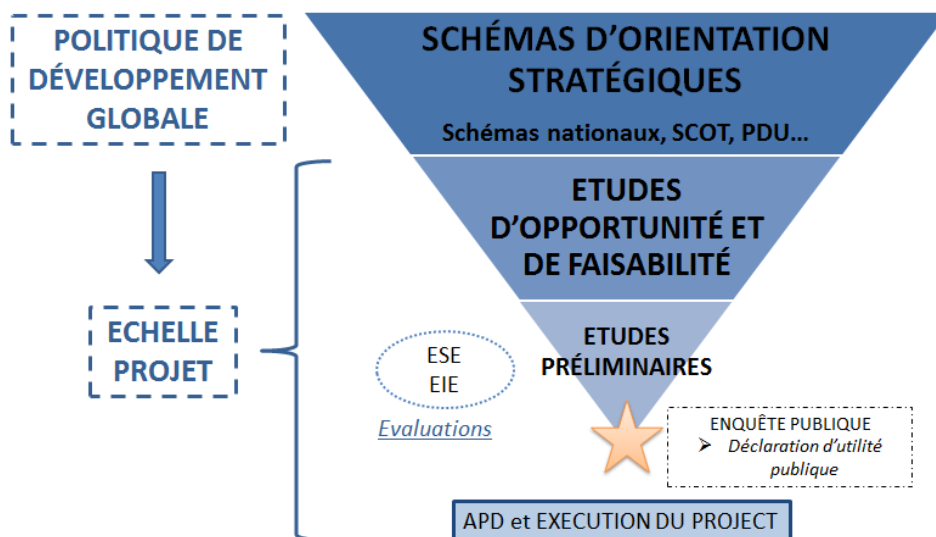


Figure 44 Processus de développement de l'offre de transport en France (ESE = évaluation socio-économique, EIE = Étude d'Impact Environnemental, APD = Avant-Projet Détaillé)

2.1.1 Évaluation socioéconomique

L'ESE évalue les effets socioéconomiques d'un projet et s'appuie sur un calcul aussi appelé ACB (ou calcul socioéconomique) : issu des sciences économiques, le calcul d'une rentabilité strictement financière est venu s'enrichir d'externalités sociales et/ou environnementales monétarisées et

¹⁹⁹legifrance.gouv.fr/affichCodeArticle.do?cidTexte=LEGITEXT000006074220&idArticle=LEGIARTI000006832889&dateTexte=&categorieLien=cid

ajoutées au bilan financier. L'ESE a été introduite dans les processus de décision d'abord aux USA, dans le cadre des Grands Travaux du New Deal lancés par le Président Roosevelt en 1936. En France, on commence par évaluer les projets d'investissement routiers à la fin des années 1950, évaluation qui devient obligatoire pour l'ensemble des infrastructures de transport fin 1982 avec la Loi d'Orientation des Transports Intérieurs (LOTI). Les règles d'évaluation ont évolué au fil des instructions du point de vue de l'obligation d'évaluation (passage d'un seuil d'investissement à une obligation de l'ESE pour tout projet financé sur deniers étatiques selon un principe de progressivité en 2014) comme de celui du périmètre d'évaluation et des externalités prises en compte. Cependant, cette méthode n'est globalement pas utilisée pour l'entretien des infrastructures.

En France, les externalités dont on doit tenir compte selon l'évaluation socioéconomique prescrite par le MEDDE sont les impacts d'un projet sur les temps de parcours, la pollution atmosphérique et son impact sanitaire, le changement climatique, les nuisances sonores et leur impact sanitaire, les risques d'accidents (corporels et matériels) et l'économie de la mobilisation des finances publiques pour le projet public. Lorsque les données sont disponibles ou « si des méthodes éprouvées permettent de les quantifier et monétariser », on intègre aussi les composantes optionnelles suivantes : fiabilité des temps de parcours, confort du transport, effets amont-aval, effets macroéconomiques (i.e. croissance et développement du territoire), effets redistributifs (accessibilité, urbanisation) et ressources rares. Dans la pratique, cette seconde liste est peu prise en compte.

2.1.2 Études environnementales

2.1.2.1 Étude d'Impact Environnemental

L'impact des projets de développement et d'aménagement des territoires sur l'environnement a été porté à l'agenda politique à divers niveaux depuis 1969 : « National Environmental Policy act », Conférence des Nations Unies sur l'Environnement humain de 1972, Charte Mondiale de la Nature en 1982, loi sur l'eau en 1992, loi Barnier sur le principe de précaution en 1995, loi sur l'air et l'utilisation rationnelle de l'énergie en 1996 et circulaire du 3.12/1996 sur les sites et sols pollués (Branchu et al. 2013)... La loi française du 10 juillet 1976 relative à la protection de la nature a ouvert la voie aux EIE obligatoires dans le cadre des procédures d'autorisation de certains projets, loi ensuite déclinée au niveau du droit européen²⁰⁰. Par la suite, leur cadrage a été progressivement et successivement modifié. Les textes en vigueur sont aujourd'hui la loi du 10 juillet 1976, celle du 12 juillet 2010 portant engagement national pour l'environnement, la directive du 16 avril 2014 modifiant la directive concernant l'évaluation des incidences de certains projets publics et privés sur l'environnement (eur-lex.europa.eu) et l'ordonnance du 3 août 2016 portant réforme des procédures destinées à assurer l'information et la participation du public à l'élaboration de certaines décisions susceptibles d'avoir une incidence sur l'environnement. Le détail de l'EIE est précisé dans le Code de l'Environnement aux articles R122. Le dossier inclut entre autres des analyses qualitatives et quantitatives des impacts écologiques potentiels d'un projet sur son environnement. Pour les projets d'infrastructure de transport, il doit également reprendre les coûts collectifs des pollutions et nuisances et des avantages induits pour la collectivité de l'analyse socio-économique, et une évaluation des consommations énergétiques résultant de l'exploitation du projet.

Ainsi, l'EIE est une procédure de droit public qui requiert l'utilisation de méthodes d'évaluation, au choix du maître d'ouvrage qui porte l'étude. Elle ne constitue donc pas une méthode d'évaluation en tant que telle.

2.1.2.2 Dossier « loi sur l'eau » et évaluation des incidences Natura 2000

Tout projet ayant un impact direct ou indirect sur le milieu aquatique doit voir cet impact évalué relativement à l'application de la Loi sur l'eau. Depuis 2010, le dossier doit obligatoirement inclure une

²⁰⁰ <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/evaluation-environnementale>

évaluation d'incidences Natura 2000²⁰¹ (article L414-5 du code de l'environnement). D'autre part, les projets d'activités, de travaux, d'aménagements, d'ouvrages ou d'installations susceptibles d'affecter un site Natura 2000 doivent faire l'objet d'un dossier spécifique d'évaluation (Article L414-4²⁰²). Comme l'EIE, ce dossier n'est pas assorti d'une méthode d'évaluation : les « fiches procédures » mises à disposition par les autorités conseillent le recours à des bureaux d'études spécialisés²⁰³.

2.1.3 Synthèse

De cette lecture des textes législatifs et des documents supports pour mener à bien les procédures d'évaluation demandées dans le cadre des projets d'aménagement – qu'il s'agisse d'ESE, d'EIE, de dossiers Loi sur l'Eau et d'étude d'incidence Natura 2000 – nous retenons quelques points saillants. D'abord, la constitution du dossier s'appuie davantage sur une obligation de résultats – l'exhaustivité des impacts environnementaux doit avoir été passée en revue, analysée et quantifiée quand cela est possible – que sur une obligation de moyen puisque l'aspect méthodologique des évaluations quantitatives n'est pas réglementé. Cela permet une adaptation au cas par cas mais cela peut nuire à l'homogénéité de la qualité des études. Ensuite, le recouvrement des évaluations entre les différentes procédures a été minimisé par la réforme de l'évaluation environnementale de 2016²⁰⁴ (ordonnance n°2016-1058 et décret n°2016-1110). Néanmoins, le principe général de proportionnalité de la finesse des études à l'ampleur du projet ne paraît pas simple à jauger. L'harmonisation des principes d'évaluation est toutefois un des objectifs européens²⁰⁵ (directive 2011/92/UE). Enfin, les frontières du système évalué dans le cas d'une infrastructure de transport et les aspects environnementaux quantifiés manquent d'exhaustivité malgré les possibilités offertes par des méthodes d'évaluation plus récentes, telle que l'Analyse de Cycle de Vie dont nous parlerons plus en détail. Pourtant, l'importance de la prise en compte au moins qualitativement du cycle de vie complet des projets – incluant phases de construction, fonctionnement et si besoin démolition – a été notée au point (22) de la directive 2014/52/UE²⁰⁶. Sur l'aspect quantitatif, la réglementation européenne exige simplement des estimations de « types et quantités de résidus et d'émissions attendus [...] et types et quantités de déchets produits durant les phases de construction et de fonctionnement.

2.2 Indicateurs financiers

Les indicateurs les plus classiques et les plus évidents pour supporter les choix de politiques d'infrastructures routières sont les indicateurs financiers. Ils sont de plusieurs sortes, et nous en dressons ici le tableau. Différents indicateurs de dépenses routières peuvent être pertinents pour évaluer les stratégies d'entretien routier : classiquement on s'intéressera au coût pour les gestionnaires d'infrastructure, mais on peut aussi considérer un indicateur de dépenses pour d'autres parties prenantes – classiquement usagers ou riverains dans le calcul socioéconomique français – voire tout comptabiliser dans un indicateur de coût global.

2.2.1 Définitions et calculs

2.2.1.1 Coût global (étendu) et rentabilité

Le coût global correspond à l'addition de tous les coûts correspondant à un projet sur son cycle de vie, de la phase de planification et de construction des biens matériels à leur fin de vie éventuelle (démantèlement, passation). Une évaluation strictement financière correspond à une évaluation du

²⁰¹ loire-atlantique.gouv.fr/Politiques-publiques/Environnement/Eaux-et-milieux-aquatiques/Dossiers-Loi-sur-l-eau/Natura-2000#

²⁰² legifrance.gouv.fr/affichCodeArticle.do?cidTexte=LEGITEXT000006074220&idArticle=LEGIARTI000006833746&dateTexte=&categorieLien=cid

²⁰³ gers.gouv.fr/content/download/6412/39450/file/01FichesProcedure_juin2012.pdf

²⁰⁴ lemoniteur.fr/media/FICHIER/2017/09/04/FICHIER_20170904_34799322.pdf

²⁰⁵ eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=CELEX%3A32014L0052

²⁰⁶ <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2014/52/oj>

« coût global strict », le « coût global étendu » se calculant en y ajoutant le coût des externalités environnementales, sociales et/ou économiques générés par le projet. Ces coûts externes sont calculés en monétarisant les impacts physiques par le biais de valeurs tutélaires. Le calcul socioéconomique évoqué ci-dessus débouche sur un indicateur de coût global étendu, appelé Valeur Actualisée Nette Socioéconomique (VAN-SE). Indicateur de rentabilité financière de référence, la Valeur Actualisée Nette ou Valeur Actuelle Nette (VAN) est quant à elle la somme des flux financiers – recettes et dépenses – qui sont actualisés année par année, sur toute la durée du projet. Elle sert à estimer l'intérêt financier pour un acteur d'un projet : plus elle est importante, plus le projet est financièrement intéressant. Elle est en particulier utilisée par les décideurs et gestionnaires routiers pour motiver leur décision. La formule générique de calcul de coût est présentée dans l'Équation 7, avec D_t les dépenses prévues à l'année t et R_t les recettes, a le taux d'actualisation, T l'année d'actualisation, N l'horizon d'évaluation, X l'année de valeur des coûts en euros constants, et x le taux de croissance des coûts d'investissement en euros constants.

Équation 7 Formule de calcul d'une Valeur Actualisée Nette

$$VAN = \sum_{t=1}^N \frac{R_t - D_t}{(1 + a)^{t-T}} \cdot (1 + x)^{t-X}$$

2.2.1.2 Actualisation des flux

A/ Principe et calcul

Actualiser, c'est chercher la valeur d'aujourd'hui d'une somme future. L'actualisation permet de comparer aujourd'hui des flux qui ne transitent pas au même moment. Quand on actualise une dépense future, on la diminue. En effet, la somme afférente à cette dépense future pourra être placée pour fructifier jusqu'à la réalisation de cette dépense, ce qui réduit le montant effectif à prévoir pour cette dépense. Pour actualiser, on applique au flux de demain un coefficient multiplicateur inférieur à 1. Ce coefficient est appelé coefficient d'actualisation. Le fondement de l'actualisation est la valeur donnée au temps. La formule de l'actualisation est celle indiquée dans l'Équation 8.

Équation 8 Formule de l'actualisation en euros €N0 d'un flux prévu à l'année N

$$\text{Valeur actualisée en année } N_0 = \text{Valeur future en année } N * \frac{1}{(1 + \text{taux d'actu})^{N-N_0}}$$

Dans la formule précédente, $\frac{1}{(1 + \text{taux d'actu})^{N-N_0}}$ est le coefficient d'actualisation.

B/ Taux d'actualisation et taux d'intérêt

On peut définir le taux d'actualisation comme le « taux d'intérêt implicite de l'économie » (Quinet et al. 2013), parfois également appelé « préférence au présent » ou « taux d'escompte psychologique des individus » (Bureau, Picard, et Salanié 2007) ou encore comme le coût moyen pondéré du capital²⁰⁷. Le coût du capital dépend notamment de la structure du financement du projet et de la probabilité d'occurrence des flux futurs. Plus le risque sur le capital est élevé, plus le coût du capital est élevé et plus le taux d'actualisation est élevé. Plus le taux d'actualisation est élevé, plus le coefficient d'actualisation est faible, donc plus le mécanisme d'actualisation réduit la valeur du flux futur. Le taux d'actualisation permet la comparaison des valeurs économiques qui s'échelonnent dans le temps (Quinet et al. 2013), mais reste complexe à appréhender et différente pour chaque agent économique, ce qui rend difficile d'en fixer le niveau. Le taux d'actualisation s'exprime en général en déduisant l'effet de l'inflation (Blanquier 1984). Le taux d'intérêt mesure à la fois la rentabilité pour le prêteur et

²⁰⁷ Explication du coût moyen pondéré du capital (CMPC, WACC, ou ROCE): <https://creation-entreprise.ooreka.fr/astuce/voir/453679/cmpe>

le coût pour l'emprunteur²⁰⁸ : le taux d'intérêt d'un prêt ou d'un emprunt fixe la rémunération du capital prêté versé par l'emprunteur au prêteur, en pourcentage du montant prêté. Selon Bureau et al. (2007), on peut assimiler le taux de rendement des marchés et l'escompte psychologique à condition que les « marchés fonctionnent efficacement ». Toutefois, la plupart des auteurs font la différence entre taux d'actualisation et taux d'intérêt, le premier incluant l'autre : « le taux d'intérêt est le prix du capital sur le marché (taux de crédit ou taux de placement), autrement dit la valeur de l'argent [...] le taux d'actualisation se définit comme la valeur du temps (Charlot-Valdieu et Outrequin 2013). Selon Ramsey, le taux d'actualisation dépendrait du taux de croissance de la consommation par tête g , de l'élasticité marginale de la consommation à son utilité u , et de la préférence au présent p selon la formule $p + u.g$ (Ramsey 1928).

Aux USA, deux taux d'actualisation sont utilisés dans l'évaluation socioéconomique des projets : l'un de 3 % correspond au rendement moyen des obligations d'État à 10 ans, et l'autre de 7 %, égal au rendement moyen avant impôt du capital privé (\approx coût d'opportunité du capital)²⁰⁹. Au Royaume-Uni, la règle de Ramsey est en vigueur : le taux se porte à 3.5% avec préconisation de diminution pour un horizon d'évaluation dépassant 30 ans²¹⁰. L'OCDE dénonce d'ailleurs une « dérive de la préférence au présent », portant des taux d'actualisation toujours trop élevés, qui ne donneraient pas assez de poids à la situation économique et environnementale (risque climatique) future : en janvier 2018, l'OCDE relevait le fort écart entre un retour sur investissement des fonds propres de 12% et un taux d'intérêt de la dette publique à 1.2%²¹¹.

2.2.1.3 Inflation, prix courants, prix relatifs et prix constants

A/ Définitions

i. Prix et coûts

En comptabilité analytique, on peut définir le coût comme « la somme des charges relatives à un élément (produit, activité, fonction...) », ou encore du point de vue de l'entreprise comme « la somme des ressources consommées par les activités nécessaires à la mise en œuvre du processus d'élaboration et d'exploitation d'un produit ou d'un service »²¹². Du point de vue du consommateur, usager ou gestionnaire routier, le coût à un instant t est la somme des produits des volumes de bien ou produits achetés par leur prix unitaire. Le coût annuel de l'utilisateur routier intègre toutes les dépenses engendrées par l'utilisation de ce véhicule à l'année donnée. Du point de vue du gestionnaire, le coût de resurfacement routier à un instant donné est celui du prix des travaux, également appelé par l'INSEE « prix d'acquisition »²¹³. Ces coûts s'inscrivent ensuite dans une dimension temporelle qui change leurs valeurs selon la référence choisie, comme expliqué ci-après. Finalement, un coût se calcule sur un périmètre donné, par opposition à un prix qui est le résultat de l'offre et de la demande sur un marché. Le coût n'est donc pas la valeur, qui se définit par la valeur marchande²¹⁴.

ii. Prix : courants, constants, ou relatifs

L'INSEE donne les définitions suivantes des prix et euros courants et constants : « Les prix courants sont les prix tels qu'ils sont indiqués à une période donnée, ils sont dits en valeur nominale. Les prix

²⁰⁸ <https://www.lafinancepourtous.com/decryptages/finance-perso/banque-et-credit/taux-d-interet/le-prix-de-l-argent-et-du-temps/>

²⁰⁹ <http://www.strategie.gouv.fr/debats/taux-dactualisation-levaluation-projets-dinvestissement-public>

²¹⁰ <http://www.strategie.gouv.fr/debats/taux-dactualisation-levaluation-projets-dinvestissement-public>

²¹¹ http://www.lepoint.fr/invites-du-point/patrick-artus/artus-ocde-la-derive-de-la-preference-pour-le-present-trop-elevee-30-01-2018-2190852_1448.php

²¹² http://unt.unice.fr/auneg/Comptabilite_analytique_L2/html/lecon_02.html

²¹³ <https://www.insee.fr/fr/metadonnees/definition/c1992>

²¹⁴ http://unt.unice.fr/auneg/Comptabilite_analytique_L2/html/lecon_02.html

constants sont les prix en valeur réelle c'est-à-dire corrigés de la variation des prix par rapport à une donnée de base ou de référence. On utilise de la même façon les termes euros constants et euros courants »²¹⁵. Calculer l'évolution du prix d'un bien ou d'un produit sur plusieurs années et connaître sa valeur réelle nécessitent la conversion de sa valeur en prix courants (ou en euros courants) à sa valeur en prix constants (ou en euros constants). Pour apprécier correctement l'évolution de la valeur d'un bien ou d'un produit, il faut donc raisonner en euros constants, c'est-à-dire corrigés de la variation des prix par rapport à une donnée de base ou de référence. Dans nos calculs, nous utiliserons en référence l'euro constant 2017 notés « €2017 » pour calculer des prix constants à une date ultérieure. Nous faisons ce choix original en fonction de l'année de développement de notre méthode de calcul, l'INSEE utilisant quant à elle plusieurs euros constants de référence selon ses études (e.g. l'index TP09 raisonne en €2010 tandis que les indices de prix à la consommation considèrent aujourd'hui des euros €2015). Néanmoins, se représenter le poids réel de la dépense en utilisation véhiculaire pour les usagers selon une référence temporelle nécessite selon nous de faire appel à une troisième notion, plus complexe que celles d'euros constants ou courants : le prix relatif. Il permet de tenir compte de l'effet des variations de prix d'un bien particulier sur le budget des ménages via la prise en compte de l'évolution des salaires et des prix des divers biens et produits de consommation²¹⁶.

B/ Calcul de prix indexé : application de l'inflation ou calcul des coûts annuels à euros courants

L'inflation fait référence à l'augmentation du prix de types de dépenses spécifiques, par exemple celui d'une matière première. Le prix de cette matière première dépend de l'offre et de la demande. L'inflation a pour conséquence de faire perdre une partie de sa valeur à la monnaie : ce phénomène est appelé « érosion monétaire ». Pour tenir compte de l'inflation sur un type de bien et anticiper sa valeur en euros courant, on peut utiliser plusieurs types de déflateurs selon le cas. L'un d'entre eux est l'IPC de l'INSEE²¹⁷. Selon l'INSEE, « L'Indice des Prix à la Consommation (IPC) est l'instrument de mesure de l'inflation. Il permet d'estimer, entre deux périodes données, la variation moyenne des prix des produits consommés par les ménages. C'est une mesure synthétique de l'évolution de prix des produits, à qualité constante »²¹⁸. Il est publié chaque mois au Journal Officiel. À partir de la valeur du bien en année de référence, de l'IPC de l'année de référence et de celui de l'année i , on obtient la valeur du bien en euros courants en année i en utilisant la formule de l'Équation 9²¹⁹.

Équation 9 Estimation d'un prix futur en euros courants²²⁰

$$\text{Prix}_{\text{Année}(i)} = \text{Prix}_{\text{€2017}} \times \frac{\text{IPC}_{\text{Année}(i)}}{\text{IPC}_{2017}}$$

Dans le cas où une dépense est soumise à une augmentation de prix (en euros courants) différente de l'inflation, on déflate en fonction de V cette dépense en euros constant, de p le taux d'augmentation ou de baisse de la recette ou dépense en pourcent, de a l'inflation (%) et de N la période annuelle selon la formule de calcul de valeur actualisée P de l'Équation 10 (Charlot-Valdieu et Outrequin 2013).

²¹⁵ <https://www.insee.fr/fr/metadonnees/definition/c1086>

²¹⁶ http://www.ipubli.inserm.fr/bitstream/handle/10608/4172/MS_1990_5_476.pdf?sequence=2

²¹⁷ L'INSEE relève les indices des prix à la consommation en fin d'année pour calculer l'inflation. Dans notre méthode, nous préférons considérer le début d'année, ce qui reste équivalent

²¹⁸ <https://www.insee.fr/fr/metadonnees/definition/c1557>

²¹⁹ <http://www.scienceseconomiquesetsociales.fr/ressources/methodes/valeurs-et-volumes/>

²²⁰ Plutôt que l'IPC, on aurait aussi pu choisir de sélectionner le déflateur du PIB, qui s'écarte de l'IPC notamment en tenant compte de l'évolution des prix des importations, des exportations et de la FBCF. Notons que l'IPC sert à indexer le SMIC selon l'INSEE.

Équation 10 Calcul de la valeur d'un produit dont le prix se comporte différemment de l'inflation

$$P = V \cdot \frac{1+p}{a-p} \cdot \left(1 - \frac{(1+p)^N}{(1+a)^N}\right)$$

2.2.2 Approche par acteur

2.2.2.1 Règles de calcul

Le Calcul de rentabilité économique des projets d'infrastructure doit être fait par catégorie d'agent : usagers, entreprises, État (Blanquier 1984). Les indicateurs historiques du calcul de rentabilité sont le bénéfice actualisé (i.e. VAN), le Taux de Rentabilité Interne (TRI), et la date optimale de mise en service pour le projet neuf, que l'on peut étendre à la date optimale de travaux (pour l'entretien) (Blanquier 1984). Il peut être intelligent de considérer la variable « taux d'actualisation » comme paramètre (donc qui peut varier) dans l'analyse (Blanquier 1984). En calcul de surplus (évaluation d'une modification marginale, le cas adapté à l'entretien d'un tronçon routier), on utilise les prix à la production HT pour calculer le surplus des entreprises de production, les prix TTC pour celui des usagers, et les recettes fiscales de l'État (Blanquier 1984).

2.2.2.2 Bilan des dépenses et recettes pour chaque acteur d'un programme d'entretien routier

Dans ce bilan (voir Tableau 23), les taxes payées par les ménages et les gestionnaires et les recettes de l'État s'annulent : on peut donc ne considérer que le prix HT des dépenses des ménages et du gestionnaire routier dans le bilan global. En revanche, dans une approche par acteur, on considérera les taxes.

Tableau 23 Bilan des dépenses et recettes pour chaque acteur du programme d'entretien routier dans le calcul de coût global (non étendu)

ACTEUR	DEPENSES	RECETTES
MENAGES	Carburant, entretien des pneumatiques et suspensions	
ETAT		TICPE, taxes sur l'entretien routier et véhiculaire (TVA)
GESTIONNAIRE ROUTIER	Travaux de resurfaçage	

2.2.2.3 Taux d'actualisation par acteur

Les SCA présentent un coût moyen pondéré du capital (WACC) de 6.1% +/-0.7% selon les experts mandatés par la DIT²²¹.

Le taux d'emprunt d'État à 10 ans n'a cessé de diminuer depuis 1982 en France comme aux USA²²² : alors d'une valeur supérieure à 16%, il a chuté à moins d'1% en mai 2018. Toutefois, une crise financière nationale a pour effet de voir s'envoler les taux d'emprunts comme l'a montré la Grèce en 2012. En considérant un avenir stable, nous proposons arbitrairement de retenir un taux d'intérêt de la dette publique à 1% sur le long terme.

Pour une VAN-F tous acteurs, il est conseillé de prendre un taux d'actualisation unique. Selon la norme ISO 15686-5 (AFNOR 2016), le taux d'actualisation réel (i.e. hors érosion monétaire) doit être choisi entre 0 et 4% (Charlot-Valdieu et Outrequin 2013). Selon la commission Quinet (2013), le taux d'actualisation d'un investissement public se formulerait selon deux composantes additionnelles, r_f le taux d'actualisation sans risque et $\phi\beta$ la prime de risque. La commission Quinet propose si l'on souhaite fixer un taux d'actualisation unique avant 2070 de prendre un taux d'actualisation sans risque à 2.5%

²²¹ NB : taux de référence du secteur retenu lors des négociations (post privatisation) des contrats de plan ASF et ESCOTA en 2007 et lors de la négociation du 12ème avenant de COFIROUTE, fixé à 6.7 % / taux négocié dans le cadre du deuxième cycle de négociation du « Paquet vert » (6.44 % pour ASF, COFIROUTE et ESCOTA et 6.39 % pour SANEF et SAPN) (source : Autorité de la concurrence 2014 - <http://www.autoritedelaconcurrence.fr/pdf/avis/14a13.pdf>)

²²² http://france-inflation.com/taux_10ans.php

et une prime de risque à 2%, pour un taux total de 4.5%. Néanmoins, on pourrait envisager de considérer un taux d'actualisation avec une prime de risque à 0% dans le cas de l'entretien routier qui est une opération non seulement nécessaire mais dont les revenus sont assez sûrs, dans la mesure où les niveaux de trafic routier sont peu élastiques à la croissance (ou son absence), et où pour l'État d'une part, la TICPE rapporte des subsides importants, et pour la SCA d'autre part, les péages augmentent plus fortement que la croissance.

Enfin, il n'est pas évident de proposer un taux d'actualisation pour les flux financiers des ménages. En théorie, il faudrait calculer une moyenne pondérée par les volumes financiers des taux de rémunération du patrimoine mobilier et immobilier des ménages et des taux d'emprunts de leurs crédits. En pratique, obtenir l'ensemble de ces chiffres relève d'un travail très poussé, dans l'hypothèse où il serait possible. Nous proposons donc de nous inspirer des taux de rémunération des dépôts bancaires des ménages calculés par la Banque de France chaque mois. Entre juin 2015 et avril 2018, ce taux est passé de 1.02%²²³ à 0.66%²²⁴. Il a donc fortement décru ces dernières années, malgré une croissance du taux du PIB en légère hausse. De manière arbitraire, nous proposons de fixer le taux d'actualisation à 1%, ce taux incluant donc une légère préférence au présent. Notons cependant que la croissance de la consommation des ménages en biens sur la même période a augmenté à 2.1% selon les chiffres de l'INSEE²²⁵.

Le niveau des taux d'actualisation est aussi crucial dans les résultats de l'analyse financière ou socioéconomique que difficile à déterminer, malgré les approches théoriques sur le sujet. Les approches nationales et par type d'agent économique diffèrent, impliquant une réalité du coût de l'argent différente à prendre en compte, réalité qui reste multiple y compris pour un agent économique unique dans la mesure où l'évaluation du risque ou la préférence au présent reste une notion hautement subjective. Après analyse des différents positionnements possibles, nous proposons dans notre méthode les taux d'actualisation par défaut par agent économique indiqués dans le Tableau 24. Un parti pris plutôt fort a été choisi pour l'agent « société » en choisissant le taux d'actualisation proposé par la commission Quinet sans prime de risque, et ce afin de ne pas encourager les prises de décision à court terme. Ce parti pris est en accord avec les préconisations des travaux du CAS pilotés par Lebègue en 2005 de retenir une préférence au présent de 0%, équivalant à donner le même poids aux générations présentes et futures selon un objectif de développement durable et sous la menace d'une dégradation environnementale croissante (CAS 2005; Charlot-Valdieu et Outrequin 2013). Ces taux sont néanmoins discutables et peuvent être spécifiés dans chaque cas d'évaluation. Il est d'autre part globalement préconisé d'effectuer des Analyses de Sensibilité (AS) sur la valeur de ces paramètres.

Tableau 24 Taux d'actualisation proposé par défaut selon l'agent économique ou l'approche considéré

AGENT ECONOMIQUE	TAUX D'ACTUALISATION PROPOSE PAR DEFAUT (%)
SOCIETE	2.5
ÉTAT	1
MENAGE	1
SCA	6.07

La valeur de l'argent change au cours du temps selon deux principes : celui de l'augmentation ou la réduction du prix d'un produit spécifique et celui du coût du capital. On répond au premier principe par application de l'inflation et au second par l'actualisation. Nous allons maintenant définir plus précisément les notions fondamentales et les étapes de calcul financier de notre indicateur.

²²³ https://www.banque-france.fr/sites/default/files/webstat_pdf/tau_rem_dep_ban_2153_fr_ws_taux-de-remuneration-des-depots-bancaires_2016-06.pdf

²²⁴ https://www.banque-france.fr/sites/default/files/webstat_pdf/tau_rem_dep_ban_2185_fr_si-tauxinteretdepots_201804_fr.pdf

²²⁵ <https://www.insee.fr/fr/statistiques/2107840>

2.2.2.4 Différentes approches du coût global

On pourrait calculer un coût global direct (life-cycle cost en anglais) de l'entretien de surface de chaussée et des dépenses véhiculaires qui en dépendent (Charlot-Valdieu et Outrequin 2013), afin d'évaluer la "performance collective" économique de différentes stratégies d'entretien. Ce coût global direct est à différencier du coût global élargi (whole life cycle cost) qui inclut davantage de coûts dont ceux d'externalités monétarisées (environnementales et/ou sociales) (Charlot-Valdieu et Outrequin 2013). Il existe plusieurs modèles de calcul en coût global direct, citons par exemple celui de la norme ISO 15686-5 (AFNOR 2016), la méthode du MIQCP²²⁶, ou encore le modèle CoParCo du bureau d'étude La Calade²²⁷, qui incluent les coûts du berceau à la tombe, pour l'ensemble des acteurs concernés par le projet évalué en coût global direct (Charlot-Valdieu et Outrequin 2013). Dans leur ouvrage dédié au coût global, Charlot-Valdieu et Outrequin (2013) listent pour les projets de bâtiments ou d'aménagement les coûts d'exploitation technique à prendre en compte : énergie et autres fluides. Nous considérerons pour une route que l'exploitation technique compte les consommables des véhicules y roulant, soit l'énergie et les composants à maintenir.

Un calcul en coût global nécessite en principe de tenir compte de la valeur résiduelle du projet évalué en fin de période d'analyse. Dans notre cas, considérant que la chaussée doit être refaite, on la considèrera nulle.

Dans le calcul de VAN-F (approche financière), selon la fiche-outil du Ministère (MEDDE 2014), on calcule la somme des flux financiers en euros courants actualisés. En revanche, pour calculer une VAN-SE (approche économique), on considère les flux financiers en euros constants (Blanquier 1984; Quinet et al. 2013). Certains auteurs proposent également un calcul financier en monnaie constante en utilisant un « taux d'intérêt réel » ou taux d'actualisation a calculé à partir du taux d'intérêt nominal i et du taux d'inflation f selon la formule $a = (1+i)/(1+f)-1$ (Charlot-Valdieu et Outrequin 2013) ?

2.2.3 Conclusion

Il est nécessaire de distinguer inflation et actualisation pour modéliser des flux lointains de dépenses. Actualisation et inflation coexistent et sont complémentaires. En simplifiant, on peut dire que le principe de l'actualisation tend à nous faire repousser les dépenses, car plus elles arrivent tard, moins elles coûtent cher (car la somme pourra être placée en attendant d'être dépensée) ; au contraire, le principe de l'inflation tend à nous faire effectuer les dépenses dès que possible, car demain tout (ou presque) coûtera plus cher.

En général, pour une modélisation de flux financiers lointains, la méthode est celle décrite sur la Figure 45.

²²⁶ http://www.miqcp.gouv.fr/images/Guides/documentPDF/COUT_GLOBAL_p.1_A_p.100-2.pdf

²²⁷ <http://www.suden.org/fr/la-calade/>

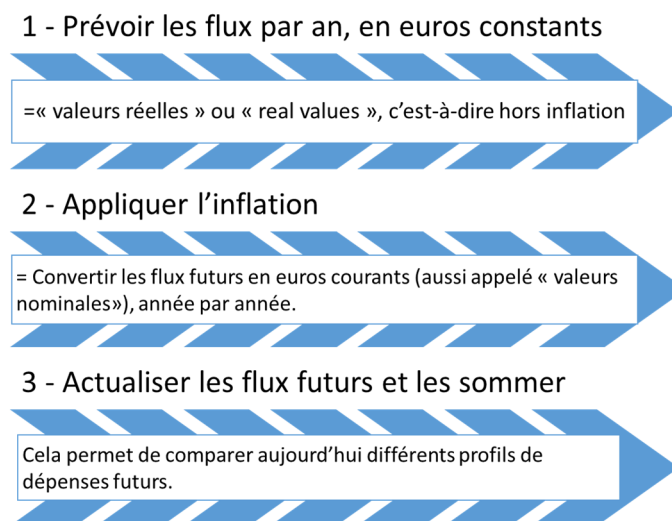


Figure 45 Méthode de modélisation de flux lointains afin de calculer une VAN pour un investisseur

2.3 Indicateurs macroéconomiques

Les modèles économiques classiques utilisés en politique économique nationale sont de deux types. D'un côté, les modèles économétriques monosectoriels de type MESANGE en France (Allard-Prigent et al. 2002) qui permettent de simuler un « choc économique », soit un investissement sectoriel. De l'autre, le modèle entrées-sorties ou input-output, qui, s'appuyant sur des données de comptabilité nationale, permet de caractériser les liens entre secteurs d'activité (Védie 2011). Ils peuvent être utilisés dans le secteur des transports.

2.3.1 Le modèle MESANGE

Mésange – pour Modèle Économétrique de Simulation et d'ANalyse Générale de l'Économie – est le modèle macroéconomique développé par l'INSEE et la direction du Trésor pour quantifier l'impact sur l'économie française de mesures telles que des investissements sectoriels. C'est un modèle néo-keynésien inspiré de l'approche de la Cowles Commission²²⁸ qui présenterait l'avantage d'un bon équilibre « entre degré d'ancrage à la théorie et qualité d'ajustement aux données » (Cabannes et al. 2012).

Ce modèle peut en particulier être utilisé à deux effets : pour étudier l'effet d'un choc (demande, offre, variables d'environnement international tel que taux de change, mesure politique (fiscale par exemple), innovation technique, etc.) sur l'économie à court, moyen (2 à 5 ans) ou long termes, et pour vérifier les prévisions conjoncturelles à l'aide de données récentes. Les résultats obtenus sont l'impact du choc sur le PIB, la consommation des ménages, les investissements, l'exportation, l'importation, et les prix de la consommation des ménages (en différentiel par rapport à un scénario de référence). Des indicateurs désagrégés telle que perte de compétitivité-prix peuvent également être calculés.

Il contient trois branches – branche manufacturière, non manufacturière et non marchande et 500 équations :

- une quarantaine d'équations de comportement réel (estimations économétriques) qui traduisent des comportements économiques : dépenses des ménages (consommation finale et investissement), demandes de facteurs (emploi et investissement des entreprises),

²²⁸ Programme de recherche réalisé à l'Université de Chicago entre 1943 et 1950 qui a développé les premiers modèles macro-économiques structurels, suivi par de nombreux travaux (Christ 1994, Charemza et Deadman 1997, Pirote 2004, Malinvaud 1991 et 2007)

variations de stocks, échanges extérieurs (volumes et prix des exportations et importations), boucle prix-salaire (salaires, prix de production) et prix de demande

- des identités comptables relatives aux agrégats de la Comptabilité Nationale (les 5 mêmes agents représentatifs (i.e. moyennés) sont considérés : ménages, administrations publiques, sociétés financières, sociétés non financières, instituts sans but lucratif au service des ménages + le reste du monde)
- des équations techniques (e.g. coefficients techniques)

Il contient des variables observables endogènes et exogènes ainsi que des variables aléatoires inobservées. L'économie française « est modélisée comme une « petite économie ouverte au sens où l'environnement international y est supposé exogène ». La population active, le progrès technique ainsi que la demande publique sont aussi des variables exogènes.

La limite principale de ce modèle consiste en la non-représentation de l'hétérogénéité intraclasse d'agents économiques. Ainsi, les questions de répartition, et in fine d'équité, ne sont pas traitées. Des modèles à agents hétérogènes ont pourtant été développés avec le progrès informatique dès les années 1980.

Une limite encore plus importante dans le cadre du problème de quantification des impacts de la fréquence de l'entretien routier est que le choc simulé est monosectoriel : on va calculer l'impact d'un surinvestissement ou sous-investissement en génie civil par exemple, en passant à côté de la relation entre état de surface de chaussée et coûts d'exploitation par exemple, donc impact sur l'économie des garages, de la production de pneumatiques, etc.

2.3.2 Analyse entrées-sorties

La comptabilité nationale est une représentation schématique de l'activité économique d'un pays : elle quantifie les flux monétaires circulant entre agents économiques, et les présente sous forme d'agrégats nourrissant des tableaux de synthèse, afin d'en sortir des indicateurs économiques par le biais d'une méthode de calcul appelée analyse input-output. Cette méthode, en exploitant les données des « tableaux entrée-sortie » de la comptabilité nationale et d'autres données relatives aux comptes de la nation comme le contenu en équivalent temps plein (ETP) des secteurs économiques, permet de calculer l'effet de politiques publiques sur les grands agrégats économiques nationaux tels que l'emploi ou le PIB.

2.3.2.1 Comptabilité nationale

La méthodologie est basée sur des matrices de Leontief (W. W. Leontief 1936). Des tableaux dits « tableaux entrées-sorties » ou « TES » compilent les données relatives à l'économie d'un espace géographique (par exemple national), et en particulier à l'impact de la production de produits et leur devenir. En France, l'INSEE se charge de collecter les données et produire ces tableaux. Eurostat et l'OCDE (dernier en date en 2005 selon nos recherches) produisent de tels tableaux à l'échelle européenne et mondiale.

Plusieurs types d'agents économiques sont pris en compte : les ménages, les sociétés non financières, les sociétés financières, les administrations publiques, les Institutions à but non-lucratif au service des ménages, et le « reste du monde ».

Il existe plusieurs niveaux d'agrégation des secteurs industriels. En France, cela va théoriquement de 17 à 735 classes. L'INSEE diffuse à des niveaux agrégés (17 ou 38 classes) deux types de tableaux de synthèse économique : le Tableau Économique d'Ensemble (TEE) et les TES. Ils rassemblent les opérations économiques et financières d'une année, par catégorie d'agents et par comptes.

Le TES se compose de plusieurs tableaux – tableau des emplois intermédiaires, tableau des emplois finaux, tableau des comptes de production, tableau total des ressources – que nous ne détaillerons que partiellement. Le tableau « ressources en produits » décrit les produits en fonction de leur origine

– production intérieure ou importations, marges de commerce et de transport, impôts sur les produits, subventions, ainsi que la correction « CAF/FAB » qui permet de s'affranchir d'un double compte relatif aux importations. Le deuxième tableau appelé « entrées intermédiaires » indique, par produit, les consommations intermédiaires des différentes branches. Le troisième tableau détaille les autres emplois de la production, c'est-à-dire les emplois finaux : dépense de consommation finale et formation brute de capital fixe par secteur institutionnel, acquisitions moins cessions d'objets de valeur, variation des stocks, exportations. Enfin, le dernier cadre présente les éléments du compte d'exploitation par branche. En déduisant de la valeur ajoutée brute, la rémunération des salariés et les autres impôts sur la production, et en lui ajoutant les subventions d'exploitation, on fait apparaître l'excédent brut d'exploitation et le revenu mixte brut de chaque branche. Le TES donne ainsi une représentation cohérente de la production nationale et permet de représenter les branches qui contribuent le plus à la production nationale (Védie 2011).

2.3.2.2 Limites méthodologiques

La principale limite de ce modèle est qu'il s'appuie sur une hypothèse d'équilibre général et néglige les rétroactions macroéconomiques (Quirion 2013) et des données représentant une réalité productive statique. Cette réalité varie dans le temps : si les coefficients techniques peuvent être considérés constants à court terme (conventionnellement entre 1 et 5 ans), une hypothèse de constance des coefficients techniques est critiquable pour une analyse prospective de long terme (Quirion 2013). Les évolutions qui apparaissent concernent les fonctions de production, les changements technologiques, la hausse possible des niveaux de qualification de la main d'œuvre, etc. Ces facteurs entraînent une modification des besoins en consommations intermédiaires des branches, et un effet global encore plus important. Enfin, la simplification de l'économie en un nombre de branches limité suppose évidemment une homogénéité intrasectorielle fautive par essence. On peut considérer que plus le nombre de branches augmente, plus la qualité représentative de la décomposition de l'économie nationale sera élevée.

2.3.2.3 Utilisation pour les transports

La méthode I/O a été utilisée à plusieurs occasions dans le but d'évaluer l'impact économique des investissements dans le domaine des infrastructures de transport. Récemment, un travail de thèse a évalué les retombées économiques de la construction du tronçon Tours-Bordeaux de la LGV SEA (Fouqueray 2016). Aux USA, des études I/O ont été réalisées afin d'évaluer l'impact macroéconomique de la construction de l'Highway 17 (Wubneh 2008) et de ceux d'infrastructures de diverses natures – transports, énergie, eaux, santé... – avec un focus routier (Cohen et Danech-Pajouh 2000). Dans le domaine des transports mais côté véhicules cette fois, une étude de Leurent et Windisch (Leurent et Windisch 2013) a utilisé cette méthode dans le but d'évaluer l'intérêt macroéconomique des véhicules électriques. Enfin, le rapport Quinet (Quinet et al. 2013) propose des valeurs relatives à la retombée en emplois des investissements en transport pour la France. En construction d'infrastructure, il indique environ 5 emplois directs par an et millions d'euros 2010 HT d'investissement, contre 4.2 en emplois indirects. En matériel roulant, il annonce 2.3 emplois directs / an.M€₂₀₁₀HT d'investissement contre 3.1 emplois indirects. Pour la partie infrastructure, ces données ont été calculées sur la base des données de la comptabilité nationale réalisée par l'INSEE en 2010 sur les secteurs d'activité « génie civil » pour les emplois directs, et sur la branche BTP (TES en 35 branches) pour les emplois indirects. Pour le matériel roulant, nous ne savons pas d'où viennent les données.

2.4 Indicateurs de performance routière

En dehors des indicateurs financiers, on retrouve divers indicateurs de performance utilisés ou préconisés pour les infrastructures routières. Ils peuvent concerner leur construction comme leur gestion.

2.4.1 Gestion des routes

Les indicateurs de performance pour la gestion routière sont très variés et déclinés chez les différents gestionnaires et les différentes administrations. Ils déterminent les niveaux de service, contractualisés de la part du gestionnaire envers le propriétaire pour l'usager. Fixer un niveau de service combine deux objectifs: assurer un service public de qualité et préserver la santé physique et mentale des agents d'entretien. La qualité du service public va dépendre de la qualité de diverses actions : entretien courant, viabilité du réseau, surveillance des voies (information des usagers, intervention en cas d'accident, etc.) et entretien du patrimoine routier. Préserver le bien-être des agents nécessite de garantir des conditions de travail qui respectent la réglementation (temps de travail, prévention des risques professionnels). De nombreux pays utilisent des indices de niveaux de service, appelés « Present Serviceability Index » (PSI) en anglais, développés d'abord aux USA.

Depuis la mise en place de la LOLF, les SCA en France doivent rendre compte régulièrement de la performance de leur gestion autoroutière sur une liste d'indicateurs contractuels, appelés en anglais Key Performance Indicators, dont les objectifs sont fixés officiellement par le contrat de plan avec l'État. À titre d'exemple, le contrat de plan de la Sanef inclut 12 indicateurs qui concernent tant la chaussée et les Ouvrages d'Art que la rapidité d'interventions ou la qualité des aires de repos (voir Annexe 55). Certains indicateurs s'appuient sur des données patrimoniales dont la procédure de mesure est dans le principe identique à l'IQRN, à la différence d'une auscultation souvent plus régulière, tous les ans plutôt que tous les 3 ans.

Sur RRNnc, les DIR organisent l'auscultation des voies lentes tous les 3 ans, afin de renseigner les BDD patrimoniales de l'IQRN, présentée au chapitre 1. Ce système d'évaluation et de suivi des chaussées du réseau routier permet d'attribuer trois notes aux infrastructures routières par tronçon de 200m tous les trois ans : une note de surface N_s dépendant des défauts de surface et du niveau d'adhérence, une note de patrimoine N_p concernant le potentiel structurel de la chaussée, et enfin une note globale N_g correspondant à la note la plus basse entre N_p et N_s . Les notes sont attribuées ainsi:

1. est estimé le pourcentage de dégradations sur chaque section élémentaire de 200m, par des appareils de mesure sur voie et par l'étude de photos de la chaussée par des analystes du CEREMA.
2. Ensuite, à chaque section est affectée une solution conventionnelle de travaux nécessaire pour ramener la chaussée à l'état de référence,
3. et une estimation du coût des travaux conventionnels de remise à l'état de référence en est déduite, fournissant une note entre 0 et 20 à chaque section, à partir de l'éventail des coûts.

Sur réseau départemental, la mise en place de recueil de données pour le suivi d'indicateurs de performance reste ponctuelle et/ou récente.

2.4.2 Performances normalisées

2.4.2.1 Normes successives d'évaluation environnementale des routes

Les normes auxquelles se rattacher pour l'évaluation environnementale des routes ont évolué ces dernières années : les trois normes successives NF P 01010 (2001, 2002, 2004) (AFNOR 2004b) sur la qualité environnementale des produits de construction et les déclarations environnementales ont laissé place à la norme NF EN 15804 d'août 2012 (AFNOR 2012b) sur la contribution des ouvrages de construction au développement durable complétée pour la France avec d'autres indicateurs dans la NF EN 15804+A1 d'avril 2014 (AFNOR 2014). Ces normes avaient toutes pour but d'homogénéiser les pratiques d'évaluation environnementale des ouvrages de construction. La première norme, la NF P 01010 (AFNOR 2004b) sur la qualité environnementale des produits de construction, a été développée principalement par et pour le secteur du bâtiment. Les indicateurs ne sont pas tous adaptés aux transports, mais étaient ceux demandés dans les Fiches de Déclarations Environnementales et Sanitaires (FDES). Elle a été annulée en août 2016. La norme ISO 15804 sur la

« Contribution des ouvrages de construction au développement durable » est sortie en août 2012 (AFNOR 2012b), suivi de la norme NF EN 15804+A1 qui la réactualise en avril 2014 (AFNOR 2014). Elle fournit les recommandations pour les déclarations environnementales de Type III relatives à tout produit et service de construction (DEP). L'expression « ouvrages de construction » peut sembler peu précise : la norme la définit comme l'ensemble de l'environnement bâti – bâtiments, ouvrages de génie civil, ouvrages extérieurs, infrastructures associées et autres ouvrages de construction. Les ouvrages de génie civil sont quant à eux explicités comme « ouvrage construit comprenant une structure, telle qu'un barrage, un pont, une route, une voie ferrée, une piste d'aéroport, des équipements d'exploitation, des conduites ou un système d'assainissement, ou le résultat d'opérations telles que du dragage, du terrassement, des travaux géotechniques, mais excluant un bâtiment, et les travaux qui lui sont associés ». Enfin, la norme NF EN 15643-1 (AFNOR 2010b) s'applique quant à elle à l'évaluation de la performance de la contribution des ouvrages de construction au développement durable.

2.4.2.2 Norme EN 15643-1 (AFNOR 2010b)

Les catégories d'indicateur demandées par cette norme englobent plusieurs types de performance : l'accessibilité, l'adaptabilité, la santé et le confort, la charge sur l'environnement, y compris la perturbation due au trafic piétonnier et à la circulation, le bruit et les vibrations, les questions de sûreté et sécurité, l'origine des matériaux et services, l'implication des parties prenantes, la création d'emplois, le changement démographique, ainsi que les éléments d'héritage culturel.

Les catégories d'indicateurs économiques demandées par la norme comprennent à la fois les coûts globaux, les coûts externes, la considération de l'urbanisme et de la planification territoriale, et enfin les effets sur l'économie locale.

Plusieurs catégories d'indicateurs environnementaux doivent être utilisées pour quantifier la performance environnementale des ouvrages de génie civil, incluant les routes, sur leur cycle de vie. Parmi eux, on retrouve des catégories classiques de l'ACV : consommation en eau²²⁹, consommation d'énergie, utilisation des ressources²³⁰, production de déchets, pollutions et émissions dans les 3 compartiments naturels (air, sol, eau). La référence à la norme NF EN ISO 14044 (AFNOR 2006b) est d'ailleurs spécifiquement donnée comme référence obligatoire. D'autres catégories sont également citées : bruit et vibration, impact sur le paysage (fragmentation de l'habitat, valeurs esthétiques créées et héritage), risques et résilience (i.e. particulièrement adaptation et atténuation du changement climatique), biodiversité (i.e. impacts du type effet de barrière, mortalité, perturbations, espèces invasives, disparition de biotopes, ce dernier effet pouvant être capté en ACV également).

2.5 Indicateurs environnementaux par analyse du cycle de vie

Les indicateurs des normes abordant la performance environnementale des ouvrages construits, dont les routes, font appel à la méthode d'ACV. Cette méthode est utilisée en dehors de ces prescriptions sur les objets du transport, notamment dans la recherche publique, privée, ou sous partenariat public-privé. Nous expliquons ici davantage ce qu'est cette méthode, et comment elle a pu être utilisée sur les objets du transport routier.

2.5.1 ACV : définition et protocole normalisé de la méthode

L'ACV est une méthodologie d'évaluation environnementale portant sur un produit, un projet, un service ou un procédé, dont on quantifie les impacts environnementaux sur cycle de vie, i.e. « du berceau à la tombe ». Cette méthode est encadrée par les normes ISO 14040 (AFNOR 2006a) et ISO 14044 (AFNOR 2006b) et son protocole, fixé par cette première norme et illustrée par la Figure 46, consiste en plusieurs étapes. D'abord, la définition des objectifs et du champ d'étude explique le but

²²⁹ De quelle qualité, en quelle quantité

²³⁰ Renouvelables, non renouvelables, substances toxiques

de l'étude, les frontières du système, la fonction²³¹ et l'unité fonctionnelle. L'unité fonctionnelle se rapporte à une quantité unitaire de fonction apportée par le système étudié, prise comme référence pour la comparaison d'impacts. La performance unitaire ainsi définie sert de référence pour comparer l'impact environnemental de deux systèmes (AFNOR 2006b). On définit ici également les types d'impact que l'on veut étudier, les hypothèses, la qualité des données et si l'étude a fait l'objet d'une revue critique ou pas. Cette première étape est suivie du développement des Inventaires de Cycle de vie (ICV), du système : il inclut un schéma des procédés, ainsi qu'une liste quantifiée des flux d'énergie et de substances entrant et sortant de la technosphère (ressources/émissions) au cours de la vie du système évalué. La troisième étape est l'évaluation des impacts du système sur cycle de vie : on choisit les catégories d'impacts, les indicateurs de catégories, et les méthodes de caractérisation (voir un tableau récapitulant les principales méthodes de caractérisation jusqu'à 2017 et leurs caractéristiques en Annexe 56). Les méthodes de caractérisation, aussi appelées méthodes de calcul d'impact ou encore méthodes d'analyse de l'impact, sont des méthodes modélisant les voies d'impact des différentes substances et reliant, autant que possible, chaque donnée d'inventaire à ses dommages environnementaux potentiels, sur la base de ces voies (Jolliet, Saadé, et Crettaz 2005). Il est tout à fait possible, et même fréquent d'utiliser plusieurs méthodes de caractérisation dans une même ACV afin de constituer un set d'indicateurs couvrant l'ensemble des catégories d'impacts que l'on veut analyser. Enfin, la dernière étape de l'ACV est l'interprétation des résultats : elle consiste à la fois, quand c'est possible, à vérifier les ordres de grandeur des résultats, les contributions aux impacts, et à essayer de les comprendre au regard de l'expertise industrielle ou environnementale relative à l'étude effectuée.

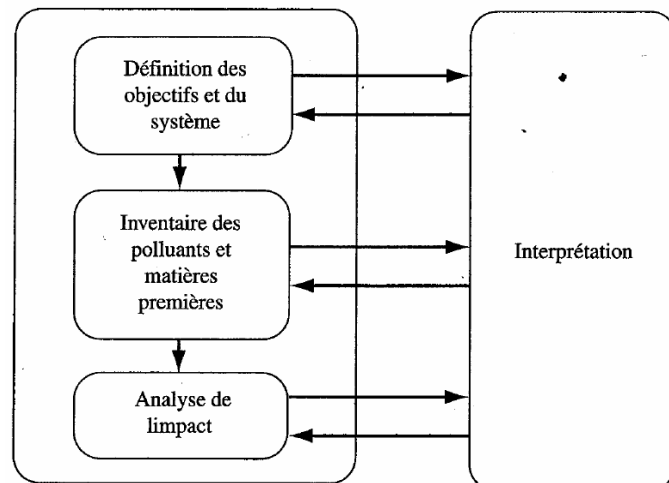


Figure 46 Phases de l'ACV selon la norme ISO 14040 (AFNOR 2006a)

2.5.2 Méthodes de caractérisation

Différentes méthodes de caractérisation calculant un indicateur d'une même catégorie d'impact ou sur un même dommage²³² ne calculeront bien souvent pas l'impact de la même manière (European Commission, Joint Research Centre, et Institute for Environment and Sustainability 2011). Selon l'ILCD handbook (European Commission, Joint Research Centre, et Institute for Environment and Sustainability 2011), elles peuvent varier sur de nombreux points, qui peuvent être reliés ou non, dont en voici quelques-uns : les processus physiques et chimiques pris en compte, les substances comptabilisées, leurs temps de demi-vie, les lois de réponses épidémiologiques selon les doses

²³¹ Rappelons que selon la norme NF EN 16271 (AFNOR 2013), une fonction est une action d'un produit ou de l'un de ses constituants exprimée exclusivement en termes de finalité. On pourrait donc définir une fonction de service comme l'action du produit avec son milieu extérieur contribuant à la satisfaction du besoin

²³² Indicateurs pouvant même bien souvent porter le même nom

d'exposition, etc. Nous proposons un tableau comparatif des principales méthodes de caractérisation en Annexe 56.

Il existe deux grands « niveaux » de caractérisation des impacts environnementaux potentiels (voir Figure 47) : la caractérisation intermédiaire ou *midpoint* et la catégorie *endpoint* ou orientée dommage. Le premier niveau permet de pondérer les émissions et extractions au sein de chaque catégorie intermédiaire auxquelles elles contribuent (les catégories intermédiaires groupant les substances répertoriées dans l'inventaire ayant des effets similaires (par exemple tous les flux de substances qui influencent la concentration d'ozone stratosphérique)) et la caractérisation des dommages qui permet d'évaluer la contribution des catégories intermédiaires à une ou plusieurs catégories de dommages sur un sujet à protéger, par exemple la santé humaine, les écosystèmes... Un indicateur *endpoint* représente tous les impacts à une des trois aires de protection définie en ACV : santé humaine, biodiversité et ressources naturelles.

Une catégorie d'impact intermédiaire peut être représentée par plusieurs indicateurs d'impacts, évalués à des horizons temporels éventuellement différents. Par exemple, l'écotoxicité peut être découpée en écotoxicité aquatique marine, écotoxicité aquatique d'eau douce, écotoxicité sédimentaire terrestre et écotoxicité terrestre, à horizon 20 ans, 100 ans, 500 ans, ou infinie

Par exemple, la méthode ReCiPe calcule un indicateurs *midpoint* de toxicité humaine tenant compte des effets liés à l'inhalation et à l'ingestion de plus de 1000 substances (métaux, produits chimiques et substances organiques à des concentrations différentes et par des voies différentes). Le phénomène d'ingestion (ou d'absorption) tient compte de la consommation de racines et de feuillages des végétaux, de viande, produits laitiers, œufs, poissons et eau par les êtres humains. Par comparaison, un autre modèle (TRACI) ne tient compte que d'environ 380 substances (ILCD 2011). L'ILCD handbook a proposé en 2011 une analyse croisée des 12 méthodes principales d'analyse d'ICV comprenant 156 modèles de caractérisation, et in fine des indicateurs pouvant être calculés (European Commission, Joint Research Centre, et Institute for Environment and Sustainability 2011). Il propose une sélection des meilleurs modèles de caractérisation de l'époque (p688) après avoir détaillé au chapitre V les modèles de calcul entre catégories d'impacts et indicateurs.

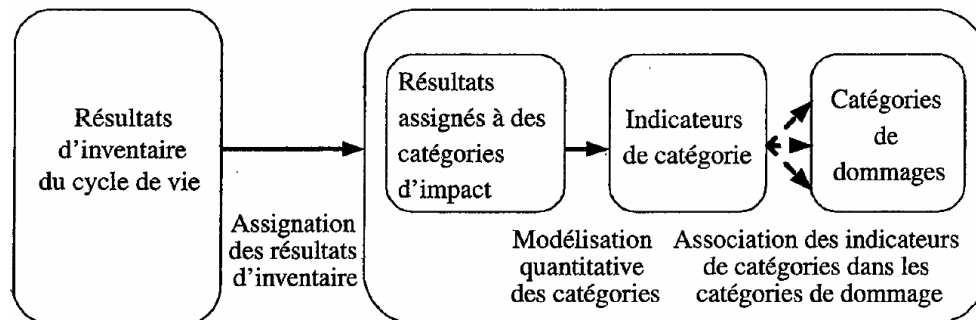


Figure 47 Démarche générale de l'analyse de l'impact des émissions sur les sujets à protéger selon la norme ISO 14042 (annulée) (AFNOR 2000a)

2.5.3 Ancrage disciplinaire, typologie et bases de données

Méthode développée dans les années 1990 et rattachée à la discipline de l'écologie industrielle, l'ACV s'appuie également sur l'écotoxicologie²³³, discipline qui mêle écologie (i.e. étude des milieux et relations avec les êtres vivants), toxicologie (i.e. étude des effets néfastes de produits chimiques sur les organismes vivantes) et chimie de l'environnement (i.e. étude des composés chimiques dans l'environnement).

Plusieurs auteurs (Jolliet et al. 2016; Weisser 2007; Yu et Lu 2012) distinguent 3 types d'ACV : l'ACV procédés, la méthode input-output (I/O) et l'ACV hybride. La première serait la plus détaillée selon

²³³ Science relativement nouvelle, introduite en 1969 par Truhaut

Jolliet et al. (2005) car l'inventaire environnemental, donnée support primordiale à l'évaluation, se base sur les procédés (i.e. flux physiques) inclus dans le périmètre du système étudié. Parfois appelée ACV entrées-sorties ou « Environmental Input-output », le deuxième type d'ACV se base sur des tableaux entrées-sorties nationales qui relient les flux économiques par secteur à leurs impacts environnementaux (émissions et extractions). Le troisième type d'ACV complète les données manquantes pour réaliser une ACV procédés par la méthode I/O. On différencie ensuite ACV attributionnelle (ACVa) qui réalise un bilan environnemental et permet de comparer par exemple deux produits de l'ACV conséquentielle (ACVc) qui évalue les impacts environnementaux relatifs à une prise de décision.

Pour réaliser une ACV, on n'est rarement (voire jamais) en possession de données d'inventaires complètes : on s'appuie toujours sur des données de référence, qui permettent de connaître les substances entrantes et sortantes au cours des processus industriels que l'on n'étudie pas mais qui interviennent à un moment au cours de la vie du système. Il existe plusieurs bases. Ecoinvent²³⁴ est une des bases les plus utilisées en Europe, qui contient des données industrielles internationales d'inventaires du cycle de vie sur l'approvisionnement énergétique, l'extraction des ressources, l'approvisionnement en matériel, les produits chimiques, les métaux, l'agriculture, les services de gestion des déchets, et les services de transport. Néanmoins, son utilisation dans le contexte français est parfois critiqué car certaines données telles que celles du béton ne correspondent pas au cas français : les bétons suisses et français sont par exemple très différents, et certaines données devraient être spatialisées.

2.5.4 Application au transport routier et choix d'indicateurs

L'ACV a été largement utilisée depuis les années 1990 pour évaluer la performance environnementale de l'objet routier. Nous détaillerons largement les travaux qui abordent de près ou de loin la question des couches de surface routière et de leur entretien d'une part, et des pièces détachées des véhicules dont l'usure dépend de l'état de ces couches de surface d'autre part, au chapitre 4. Notons également que la méthode I/O a été très utilisée dans le domaine du transport routier aux États-Unis en particulier, ce qui n'est pas le cas en France où l'on ne dispose pas de base territorialisée.

Nous ne notons aucun consensus en termes d'indicateurs de performance environnementale routière dans la littérature. Les indicateurs midpoints sont globalement utilisés, plutôt que les indicateurs endpoints.

2.6 Conclusion

Nous venons de faire un tour d'horizon des grandes méthodes et des indicateurs existants pour caractériser les performances de l'objet routier. De ce travail émergent plusieurs constats.

D'abord, certaines méthodes sont adaptées à l'évaluation des projets de construction routière mais pas aux opérations d'entretien, comme l'ESE et l'EIE préconisées par le Ministère de l'Écologie.

Ensuite, les indicateurs de performance classiquement utilisés dans les méthodes d'aide à la décision en entretien routier sont assez diffus entre gestionnaires. Ils restent principalement techniques – indicateurs sur les dégradations physiques de l'infrastructure avec IQRN et ses déclinaisons sur réseaux non concédés, comme dans les contrats de plan État-SCA – et financiers : indicateurs d'investissement (€/km), de remise en état (IQRN), VAN pour les projets de construction ou de concessions. Certains indicateurs de niveau de service – disponibilité de l'infrastructure, délai de remise en circulation de l'infrastructure après accident, etc. – sont également classiquement demandés dans les contrats de plan État-SCA.

De plus, certaines méthodes sont incomplètes sur les impacts et parties prenantes considérés :

²³⁴ <https://www.ecoinvent.org/>

- L'ACV est spécifique aux impacts environnementaux (Jolliet et al. 2016)
- L'ESE tient compte du gestionnaire, en partie de l'usager et du riverain (bruit et pollution), mais pas encore de tous les impacts environnementaux ni des impacts macroéconomiques (Quinet et al. 2013)

Enfin, certaines méthodes sont incomplètes sur la prise en compte de toutes les étapes du cycle de vie :

- L'ESE tient globalement compte de la phase d'exploitation du point de vue environnemental et socioéconomique, et de la phase de construction du point de vue financier (Quinet et al. 2013)
- On sait aujourd'hui à peu près comment calculer les indicateurs de la norme ISO 15804+A1 sur la phase de construction des ouvrages, plus difficilement sur l'ensemble du cycle, en particulier pour la phase d'exploitation des routes (Santero, Masanet, et Horvath 2011a, 2011b)

Nous pouvons donc conclure que ces méthodes et indicateurs sont fondamentalement parcellaires : aucune méthode « clé en main » n'est adaptée à une évaluation des politiques d'entretien au prisme du développement durable et de l'intérêt collectif.

Néanmoins, il nous semble possible de recombinaison ces méthodes, et de les compléter, pour doter les décideurs d'un outil d'évaluation complet de leurs politiques d'entretien routier, permettant de quantifier de manière multicritère et sur cycle de vie la distribution des avantages et inconvénient relative à une politique, dans un but final comparatif et in fine d'amélioration de la décision publique.

3 Conclusion : nécessité d'une nouvelle méthode combinatoire d'évaluation des stratégies d'entretien routier

Ce chapitre contribue de deux manières à la construction d'une méthode d'évaluation équitable et durable des programmes d'entretien des routes. Dans un premier temps, il décrit précisément des indicateurs d'état de surface des routes qui existent – NBO et IRI – et propose des lois de comportement et des liens entre les deux. Rappelons que l'IRI est l'indicateur de déformation des routes utilisé à l'international et les NBO des indicateurs utilisés en France, dont la gamme de longueur d'onde de déformation ne coïncide pas exactement. Toutefois, les lois de passage entre NBO et IRI et d'évolution d'état de surface proposées, si elles ne sont pas parfaites, mettront à la fois en capacité un gestionnaire français d'utiliser ses données sous format NBO pour évaluer la performance de programmes d'entretien, et de comprendre, d'interpréter et de simuler l'évolution de ces indicateurs dans le temps, hors travaux et sous travaux de resurfaçage.

Ensuite, ce chapitre met en évidence un nombre conséquent de méthodes et procédures d'évaluation de la performance des routes ou de l'utilité publique de projets d'infrastructures. Néanmoins, s'il existe de nombreux indicateurs qui permettent d'évaluer la performance des routes ou de leur gestion, nous avons vu qu'ils ne sont pas toujours très spécifiques, voire qu'ils sont inadaptés, à une vision globale et étendue de l'impact des stratégies d'entretien de resurfaçage sur toutes les parties prenantes. S'il est possible de s'inspirer de certains indicateurs vus précédemment, la prise en compte des effets systémiques décrits au chapitre 2 nécessite de sélectionner, recombinaison ou compléter les indicateurs et leurs méthodes de calcul, de façon à ce qu'ils répondent au mieux à la question de la performance des programmations de resurfaçage des routes interurbaines en France. Sur la base des impacts relatifs à l'entretien des routes mis en évidence au chapitre précédent, nous proposons donc une analyse des indicateurs et méthodes pouvant quantifier les impacts les plus importants par partie prenante.

Enfin, il mène à la conclusion qu'une méthode compréhensive d'aide à la décision dans le processus de développement de stratégies d'entretien des routes nécessite d'être sélective. Le chapitre 2 a permis d'établir plusieurs types de parties prenantes de l'entretien des routes : côté géophysique et écologique il s'agit de l'environnement, côté socioéconomique ce sont les usagers, les riverains, le gestionnaire, et la nation au sens large. Évaluer l'ensemble des impacts engendré par les stratégies d'entretien routier sur ces parties prenantes peut rapidement mener à un set d'indicateurs très touffus. Nous avons par exemple vu que les méthodes d'ACV utilisent souvent une dizaine d'indicateurs. Dans tout développement d'une méthode d'évaluation ou toute lecture de ses résultats, il faut garder en tête plusieurs limites importantes des indicateurs. D'abord, le résultat brut d'évaluation est insuffisant à sa compréhension : il doit être contextualisé et interprété. Ensuite, le calcul des indicateurs dépend des données disponibles et de leur qualité. Ils ne peuvent renseigner tous les sujets, d'abord parce que tout ne peut pas être quantifié, et que la réalité est d'une telle complexité que pour obtenir une vision d'ensemble d'une problématique, son évaluation pourrait nécessiter un nombre d'indicateur élevé. Or, un nombre trop important d'indicateurs peut générer un phénomène de saturation cognitive informationnelle, provoquant le doute sur la conduite à tenir et pouvant finalement aboutir à l'inaction ((Levrel 2006). On peut réduire de deux manières le nombre d'indicateurs d'une méthode : en utilisant un indicateur composite ou en élaborant un jeu cohérent d'indicateurs.

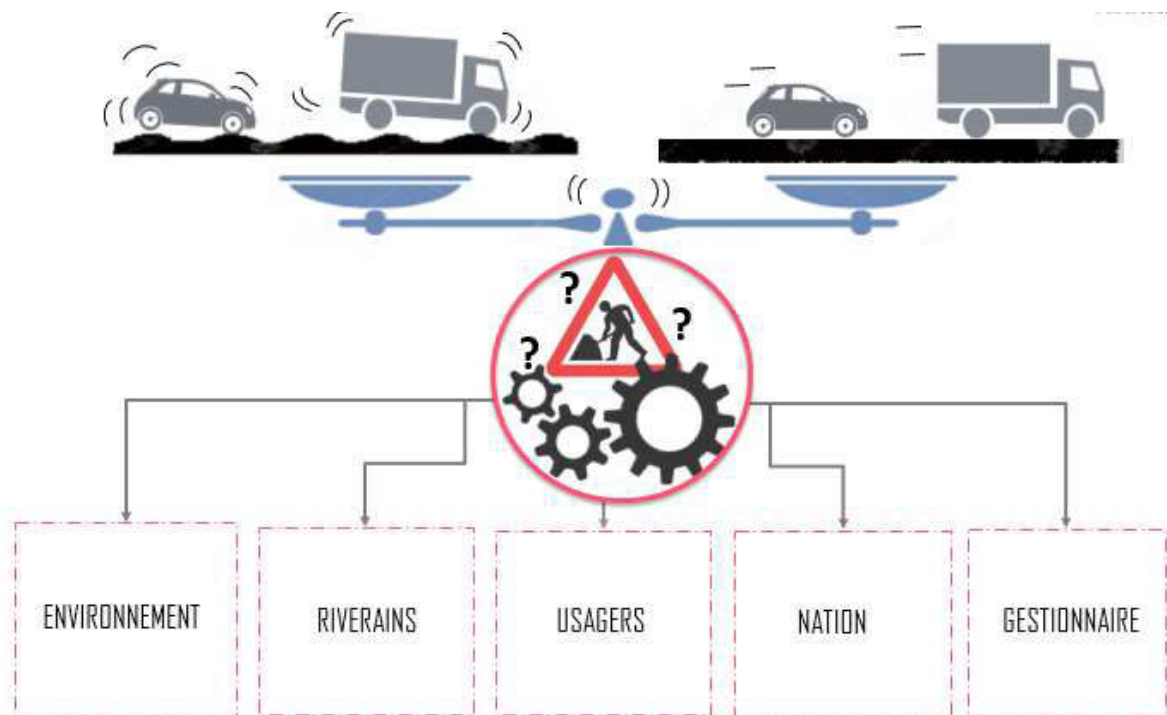


Figure 48 Illustration compréhensive d'une démarche de quantification comparative des conséquences holistiques de l'état de déformation des routes sur la performance du système de transport routier

Après avoir étudié finement les conséquences qualitatives de la déformation de surface des routes sur toutes les parties prenantes du transport routier au chapitre 2, et avoir dans ce chapitre 3 étudié et critiqué les méthodes de quantification qui existent pour le calcul de la déformation d'une part et des performances durables des routes d'autre part, nous souhaitons maintenant construire une méthode d'évaluation adaptée au jugement de la performance durable des politiques de resurfacement. Concrètement, nous souhaitons déterminer précisément les éléments indiqués en rouges sur la Figure 48 : d'une part les indicateurs à calculer par partie prenante – environnement, riverains, usagers, Nation et gestionnaire ; d'autre part la mécanique de calcul de ces indicateurs d'évaluation holistique durable des politiques de resurfacement. La mécanique générale du modèle d'évaluation devra

évidemment être complétée par une construction et justification détaillée des sous-modèles servant au calcul spécifique des indicateurs choisis dans le cadre de l'entretien des routes interurbaines en France.

4 Bibliographie

AFNOR. 2000. « NF EN ISO 14042 Mai 2000 (ANNULÉE le 05/10/2006) - Management environnemental - Analyse du cycle de vie - Évaluation de l'impact du cycle de vie ». <https://www.boutique.afnor.org/norme/nf-en-iso-14042/management-environnemental-analyse-du-cycle-de-vie-evaluation-de-l-impact-du-cycle-de-vie/article/880315/fa049132>.

— — —. 2004. « NF P01-010 Décembre 2004 (ANNULÉE le 06/08/2016) - Qualité environnementale des produits de construction - Déclaration environnementale et sanitaire des produits de construction ». <https://www.boutique.afnor.org/norme/nf-p01-010/qualite-environnementale-des-produits-de-construction-declaration-environnementale-et-sanitaire-des-produits-de-construction/article/663460/fa136284>.

— — —. 2006a. « NF EN ISO 14040 Octobre 2006 - Management environnemental - Analyse du cycle de vie - Principes et cadre ». <https://www.boutique.afnor.org/norme/nf-en-iso-14040/management-environnemental-analyse-du-cycle-de-vie-principes-et-cadre/article/704298/fa140281>.

— — —. 2006b. « NF EN ISO 14044 Octobre 2006 - Management environnemental - Analyse du cycle de vie - Exigences et lignes directrices ». <https://www.boutique.afnor.org/norme/nf-en-iso-14044/management-environnemental-analyse-du-cycle-de-vie-exigences-et-lignes-directrices/article/651688/fa138266>.

— — —. 2010. « NF EN 15643-1 Décembre 2010 - Contribution des ouvrages de construction au développement durable - Évaluation de la contribution au développement durable des bâtiments - Partie 1 : cadre méthodologique général ». <https://www.boutique.afnor.org/norme/nf-en-15643-1/contribution-des-ouvrages-de-construction-au-developpement-durable-evaluation-de-la-contribution-au-developpement-durable-des-ouvrage/article/713907/fa160585>.

— — —. 2012. « NF EN 15804 Août 2012 (ANNULÉE le 26/04/2014) - Contribution des ouvrages de construction au développement durable - Déclarations environnementales sur les produits - Règles régissant les catégories de produits de construction ». <https://www.boutique.afnor.org/norme/nf-en-15804/contribution-des-ouvrages-de-construction-au-developpement-durable-declarations-environnementales-sur-les-produits-regles-re/article/753567/fa165263>.

— — —. 2013. « NF EN 16271 Février 2013 - Management par la valeur - Expression fonctionnelle du besoin et cahier des charges fonctionnel - Exigences pour l'expression et la validation du besoin à satisfaire dans le processus d'acquisition ou d'obtention d'un produit ». <https://www.boutique.afnor.org/norme/nf-en-16271/management-par-la-valeur-expression-fonctionnelle-du-besoin-et-cahier-des-charges-fonctionnel-exigences-pour-l-expression-et-la-validation/article/669103/fa164075>.

— — —. 2014. « NF EN 15804+A1 Avril 2014 - Contribution des ouvrages de construction au développement durable - Déclarations environnementales sur les produits - Règles régissant les catégories de produits de construction ». <https://www.boutique.afnor.org/norme/nf-en-15804a1/contribution-des-ouvrages-de-construction-au-developpement-durable-declarations-environnementales-sur-les-produits-regles-re/article/819047/fa184203>.

— — —. 2016. « F EN 13108-8 Octobre 2016 Mélanges bitumineux - Spécifications pour le matériau - Partie 8 : agrégats d'enrobés ». <https://www.boutique.afnor.org/norme/nf-en-13108-8/melanges-bitumineux-specifications-pour-le-materiau-partie-8-agregats-d-enrobes/article/814543/fa179879>.

Agence Européenne de l'Environnement. 2005. *EEA Core Set of Indicators: Guide*. Luxembourg: Publications Office. http://www.eea.europa.eu/publications/technical_report_2005_1/at_download/file.

- Allard-Prigent, Céline, Cédric Audenis, Karine Berger, Nicolas Carnot, Sandrine Duchene, et Fabrice Pesin. 2002. « PRESENTATION DU MODELE MESANGE - Modèle Econométrique de Simulation et d'Analyse Générale de l'Economie ». Document de travail. Ministère de l'Economie, des Finances et de l'Industrie. <https://www.tresor.economie.gouv.fr/Ressources/file/326640>.
- Bertrand, Thomas, Laure Martel, William Margheriti, et Aurianne Vienney. 2015. « Analyse des coûts d'exploitation des véhicules pour les usagers ». Archives de l'ENPC. Analyse des coûts d'exploitation des véhicules pour les usagers. France: Ecole des Ponts ParisTech.
- Blanquier, A. 1984. *Sélection des investissements aux niveaux national et régional*. Sciences économiques. Paris: Dunod.
- Branchu, P, A.L Badin, B Béchet, L Eisenlohr, T Le Priol, F Marseille, et E Trielli. 2013. « Pollution d'origine routière et environnement de proximité ». *Vertigo*, n° Hors Série (février).
- Bryce, James, Joao Santos, Gerardo Flintsch, Samer Katicha, Kevin McGhee, et Adelino Ferreira. 2014. « Analysis of Rolling Resistance Models to Analyse Vehicle Fuel Consumption as a Function of Pavement Properties ». In *Asphalt Pavements*, par Y Kim, 263-73. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b17219-39>.
- Bureau, Dominique, Pierre Picard, et Bernard Salanié. 2007. *Développement durable, Majeure d'Eco-Sciences, Année 3, ECO565*. Palaiseau: École polytechnique.
- Cabannes, Pierre-Yves, Hélène Erkel-Rousse, Caroline Klein, Guy Lalanne, Olivier Monso, Erwan Pouliquen, et Olivier Simon. 2012. « Survol de Mésange : un modèle macroéconomique à l'usage du praticien ». *Economie et Statistique*, n° n°451-453.
- CAS. 2005. « Révision du taux d'actualisation des investissements publics ». Commissariat Général du Plan. http://metroauxrigollots.fr/archives/pdf/SW54/Rapport_Lebegue_Revision_Taux_Actualisation_Investissements_Publics.pdf.
- Cerema. 2014. « Uni longitudinal - Etat de l'art et recommandations ».
- Charlot-Valdieu, Catherine, et Philippe Outrequin. 2013. *Coût global des bâtiments et des projets d'aménagement mode d'emploi*. Paris: Ed. Le Moniteur.
- Cohen, Simon, et Mehdi Danech-Pajouh. 2000. « Initiation à l'ingénierie du trafic routier ». Support de cours.
- Daniel, Geoffrey, Vianney Behaghel, Quentin Deslot, et Farcette. 2017. « Infrastructures routières et critères de performance environnementale dans les marchés publics ». Archives de l'ENPC. Rapport de Groupe d'Analyse de l'Intervention Publique pour le Mastère PAPDD. Ecole des Ponts ParisTech.
- Delanne, Yves. 2008. « Mesure et analyse de l'uni des chaussées ». LCPC.
- Duron, Philippe, et Ministère des transports, de la mer et de la pêche. 2013. « Mobilité 21 - « Pour un schéma national de mobilité durable » ». Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie. http://www.ladocumentationfrancaise.fr/docfra/rapport_telechargement/var/storage/rapports-publics/134000396.pdf.
- European Commission, Joint Research Centre, et Institute for Environment and Sustainability. 2011. *International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook: Framework and Requirements for Life Cycle Impact Assessment Models and Indicators*. Luxembourg: Publications Office.

Fouqueray, Etienne. 2016. « Evaluation de l'impact économique de court terme et de moyen terme des chantiers de grandes infrastructures de transport - Le cas de la LGV SEA Tours-Bordeaux ». Université de Poitiers - Faculté de Sciences économiques.

Greene, Suzanne, Mehdi Akbarian, Frank-Josef Ulm, et Jeremy Gregory. 2013. « Pavement Roughness and Fuel Consumption ». MIT - Concrete sustainability hub.

Haider, Syed Waqar, Wouter C. Brink, et Neeraj Buch. 2016. « Local Calibration of Flexible Pavement Performance Models in Michigan ». *Canadian Journal of Civil Engineering* 43 (11): 986-97. <https://doi.org/10.1139/cjce-2015-0556>.

Hetzel, Jean. 2009. *Indicateurs du développement durable dans la construction*. La Plaine-Saint-Denis: AFNOR.

Jolliet, Olivier, Myriam Saadé-Sbeith, Shanna Shaked, Alexandre Jolliet, et Pierre Crettaz. 2016. *Environmental life cycle assessment*. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group.

Jolliet, Saadé, et Crettaz. 2005. *Analyse du cycle de vie - Comprendre et réaliser un écobilan*. Gérer l'environnement. Presses polytechniques et universitaires romandes.

Leontief, Wassily W. 1936. « Quantitative Input and Output Relations in the Economic Systems of the United States ». *The Review of Economics and Statistics* 18 (3): 105. <https://doi.org/10.2307/1927837>.

Leurent, Fabien, et Elisabeth Windisch. 2013. « Electric vs. Gasoline-powered vehicles: the effects on a nation's economic production and public finances ». *Routes/Roads*, n° n°357. <https://routesroadsmag.piarc.org/en/Routes-Roads-Magazine-Issue-357-Climate-Change/1685,Routes-Roads-Magazine-Electric-Vs-Gasoline-Effects-Economy-Finances#c3e63u7JL70>.

Levrel, Harold. 2006. « Biodiversité et développement durable : quels indicateurs ? » EHESS. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00128430/document>.

McGhee, Kevin, et James Gillespie. 2006. « Impact of a Smoothness Incentive/Disincentive on Hot-Mix Asphalt Maintenance Resurfacing Costs ». FHWA/VTRC 06-R28, VTRC 06-R28. <https://ntl.bts.gov/lib/37000/37300/37317/06-r28.pdf>.

Quinet, E, et al. 2013. « L'évaluation socioéconomique des investissements publics - Rapport final ». Tome 1.

Quirion, Philippe. 2013. « L'effet net sur l'emploi de la transition énergétique en France : une analyse input-output du scénario négaWatt ». Document de travail No 46-2013. CIRED. <http://www2.centre-cired.fr/IMG/pdf/CIREDWP-201346.pdf>.

Ramsey, F. P. 1928. « A Mathematical Theory of Saving ». *The Economic Journal* 38 (152): 543. <https://doi.org/10.2307/2224098>.

Santero, Nicholas J., Eric Masanet, et Arpad Horvath. 2011a. « Life-Cycle Assessment of Pavements. Part I: Critical Review ». *Resources, Conservation and Recycling* 55 (9-10): 801-9. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.03.010>.

———. 2011b. « Life-Cycle Assessment of Pavements Part II: Filling the Research Gaps ». *Resources, Conservation and Recycling* 55 (9-10): 810-18. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.03.009>.

Santos, Joao. 2015. « A comprehensive life cycle approach for managing pavement systems ». Portugal: Universidade de Coimbra. <https://estudogeral.sib.uc.pt/bitstream/10316/30093/1/A%20Comprehensive%20Life%20Cycle%20A%20pproach%20for%20Managing%20Pavement%20Systems.pdf>.

Sayers, Michael, et Steven Karamihas. 1998. « The little book of profiling - basic information about measuring and interpreting road profiles ». The Regent of the University of Michigan. <http://www.umtri.umich.edu/content/LittleBook98R.pdf>.

Trupia, Laura, Tony Parry, Luis C. Neves, et Davide Lo Presti. 2017. « Rolling Resistance Contribution to a Road Pavement Life Cycle Carbon Footprint Analysis ». *The International Journal of Life Cycle Assessment* 22 (6): 972-85. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1203-9>.

Tseng, Ester. 2012. « Construction of Pavement Performance Models for Flexible Pavement Wheelpath Cracking and IRI for the California Department of Transportation New Pavement Management System ». Thèse de Master. California, USA: UC Davis. <https://search.proquest.com/openview/c0d1baa8afc851c4962b1399cc5d5b3b/1?pq-origsite=gscholar&cbl=18750&diss=y>.

UICN. 2014. *Indicateurs de biodiversité pour les collectivités territoriales: cadre de réflexion et d'analyse pour les territoires*. Paris: Comité français de l'UICN.

Vaillancourt, Michel, Daniel Perraton, Pierre Dorchies, et Guy Doré. 2003. « Décomposition Du Pseudo-Profil et Analyse de l'indice de Rugosité International (IRI) ». *Canadian Journal of Civil Engineering* 30 (5): 923-33. <https://doi.org/10.1139/I03-070>.

Védie, Henri-Louis. 2011. *Macroéconomie*. Paris: Dunod.

Wang, Ting, John Harvey, et Alissa Kendall. 2013. « Network-Level Life-Cycle Energy Consumption and Greenhouse Gas from CAPM Treatments ». Research Report UCPRC-RR-2014-05. University of California Pavement Research Center UC Davis, UC Berkeley.

———. 2014a. « Supplementary material for “Reducing greenhouse gas emissions through strategic management of highway pavement roughness” ». UC Davis.

———. 2014b. « Reducing greenhouse gas emissions through strategic management of highway pavement roughness ». *Environmental Research Letters* 9 (3): 034007. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/3/034007>.

Wang, Ting, In-Sung Lee, Alissa Kendall, John Harvey, Eul-Bum Lee, et Changmo Kim. 2012. « Life Cycle Energy Consumption and GHG Emission from Pavement Rehabilitation with Different Rolling Resistance ». *Journal of Cleaner Production* 33: 86-96. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.05.001>.

Wang, Ting, I-S Lee, John Harvey, Alissa Kendall, E.B Lee, et C. Kim. 2012. « UCPRC Life Cycle Assessment Methodology and Initial Case Studies on Energy Consumption and GHG Emissions for Pavement Preservation Treatments with Different Rolling Resistance ». UCPRC-RR-2012-02. California, USA: University of California Pavement Research Center UC Davis, UC Berkeley. <http://www.ucprc.ucdavis.edu/PDF/UCPRC-RR-2012-02.pdf>.

Wang, X C, et L Sanders. 2012. « Energy Consumption and Carbon Footprint of High-Speed Rail Projects: Using CAHSR and FHSR as Examples ». *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit* 226 (1): 26-35. <https://doi.org/10.1177/0954409711404641>.

Weisser, Daniel. 2007. « A Guide to Life-Cycle Greenhouse Gas (GHG) Emissions from Electric Supply Technologies ». *Energy* 32 (9): 1543-59. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2007.01.008>.

Wubneh, M. 2008. « US Highway 17 and its impact on the economy of eastern North Carolina ». Urban & Regional Planning Program Department of Geography East Carolina University.

Yang, Rebekah. 2014. « Development of a pavement life cycle assessment tool utilizing regional data and introducing an asphalt binder model ». Urbana, Illinois: University of Illinois at Urbana-Champaign. https://www.ideals.illinois.edu/bitstream/handle/2142/50651/Rebekah_Yang.pdf?sequence=1.

Yang, Rebekah, Seunggu Kang, Hasan Ozer, et Imad L. Al-Qadi. 2015. « Environmental and Economic Analyses of Recycled Asphalt Concrete Mixtures Based on Material Production and Potential Performance ». *Resources, Conservation and Recycling* 104 (novembre): 141-51. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.08.014>.

Yu, Bin, et Qing Lu. 2012. « Life Cycle Assessment of Pavement: Methodology and Case Study ». *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 17 (5): 380-88. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2012.03.004>.

5 Annexes

Annexe 55. Indicateurs de performance du contrat de plan Sanef-État 2010-2014

Type d'indicateur	Nombre d'indicateurs	Mesure conduite
Indicateur de chaussée	1	Etat des chaussées évalué selon une méthode décrite dans une fiche méthodologique
Indicateurs d'ouvrages d'art	3	Etat, fonctionnalité et sécurité des ouvrages
Indicateurs de la qualité des aires de repos	1	Qualité du service jugé d'après une grille de notation réalisée par l'Etat
Indicateur de surveillance du réseau	1	Respect du délai de passage des patrouilles
Indicateurs de délai sur message évènement	2	Délai de traduction, par message radio 107.7 et par Panneau à Message Variable (PMV), d'un évènement grave mettant en
Indicateur de gêne au péage	1	Temps d'attente aux 4 principaux péages des usagers
Indicateurs de viabilité hivernale	2	Délai de retour de la circulation en condition normale (C1) en cas de verglas et neige
Indicateur de délai de réponse aux réclamations clients	1	Délai de traitement des réclamations (90% des réclamations en 10 jours ouvrés)

Source : contrat de plan sanef-Etat 2010-2014

Annexe 56. Caractéristiques des principales méthodes d'analyse de l'impact actuelles (modifié et complété à partir de Jolliet et al. 2005)

Méthode	IMPACT 2002+	EPS 2000d	EDIP	TRACI	LUCAS	CML 2001	LIME	ReCiPe 2008
Référence académique	Jolliet & al 2003	Steen 1999	Hanschid & al 2003	Bare & al 2003	Toffoletto et al 2007	CML 2001	Itsubo & Inaba 2003	Goedkoop et al 2013
Contexte géographique	Europe ?	Suède ?	Dane-mark	USA	Canada	Euro-pe	Japon	Europe
Niveau d'évaluation : I / D	I & D	D	I	I	I	I	I	I & D
Nombre d'indicateurs	18	6	47	9	10	15	15	18 M 3 E
Catégorie intermédiaires couvertes	Pollution urbaine de l'air, odeur	Point			PM2.5 (1)		Odeur (m ³)	X
	Smog			X		X	X	
	Déchets			X				
	Changement climatique	Point		X	X	X	X	X
	Destruction d'ozone stratosphérique	Point		X	X	X	X	X
	Toxicité humaine	Point		X	X	X	X	X
	Radiations ionisantes	Point						X
	Photo-oxydants	Point		X	X			X
	Acidification	Point		X	X	X	X	X
	Eutrophisation	X (2)		X	X	X	X	X
	Ecotoxicité	Point		X	CTU	X	X	X
	Utilisation des sols et perte d'habitat	Point				X		X
	Extraction d'énergie	Point		X				X
	Extraction de minerais	Point		X				X
	Utilisation d'eau							X
	Ressources biotiques							
Ressources abiotiques			X		X	X	X	
Catégorie de dommages	Santé humaine	Point (1)	ELU		X		X	X
	Environ. nat. biotique	Point	ELU				EINES	X
	Environ. nat. abiotique							
	Ressources nat. biotiques		ELU					
	Resourcs nat. abiotiques	Point	ELU					X
	Environnement anthropique biotique		ELU					
	Environnement anthropique abiotique		ELU					
	Aides sociales						X	
	Production industrielle						X	

I = intermédiaire / D = Dommages

N = normalisation / P = Pondération

CHAPITRE 4 – Méthode d'évaluation équitable et durable du resurfaçage

Table des matières

1	Contexte	26
1.1	La route : brève histoire sociotechnique.....	26
1.1.1	Enjeu de la vitesse de mobilité et réponses technologiques	26
1.1.2	Renouveau du transport routier : automobiles et infrastructures	26
1.1.3	Accroissement des contraintes environnementales et réponse politique internationale 27	
1.2	Bilan holistique de la route et outils d'évaluation rationnelle.....	27
1.2.1	Bilan actuel du transport routier.....	27
1.2.2	Outils de rationalisation des politiques de transport routier et application à l'entretien 28	
1.2.3	Vers une gestion systémique de l'entretien routier ?.....	29
2	Cadrage du mémoire.....	30
2.1	Problématique.....	30
2.2	Objectifs.....	31
2.3	Méthode.....	32
2.3.1	Approches de travail.....	32
2.3.2	Positionnement transdisciplinaire.....	33
2.3.3	Périmètre.....	34
2.4	Contribution	35
2.4.1	Fonctions de la méthode d'évaluation.....	35
2.4.2	Originalité.....	35
3	Plan.....	36
4	Bibliographie.....	38
1	Introduction à la systémique et l'approche intégratrice.....	45
1.1	Systémique : origines et principe	45
1.2	Vers une approche intégratrice.....	45
1.3	Application au système de transport routier	46
1.3.1	Cartographie simplifiée des acteurs de production du transport routier en France	46

1.3.2	La systématique : un prérequis à l'évaluation des systèmes complexes	46
1.4	Focus sur la maintenance routière	47
1.4.1	La maintenance routière : opération d'un système complexe	47
1.4.2	Interactions intra-systèmes et facteurs d'influence.....	48
1.4.3	Dynamique de l'entretien routier	48
2	Infrastructures routières	50
2.1	Caractéristiques fonctionnelles fondamentales.....	50
2.1.1	Fonctions pour l'utilisateur	50
2.1.2	Fonctions pour le territoire	52
2.2	Éléments structuraux	54
2.2.1	Éléments d'une route et terminologie	54
2.2.2	Structure multicouche	55
2.2.3	Corps de chaussée	55
2.3	Techniques routières.....	56
2.3.1	Matériaux de chaussées	56
2.3.2	Familles de chaussées	56
2.3.3	Exemple du réseau national	56
2.4	Conception des chaussées	56
2.4.1	Modèle de dimensionnement	57
2.4.2	Guides techniques	57
2.4.3	Protocole de dimensionnement.....	57
2.5	Géométrie de surface.....	58
2.5.1	Paramètres	58
2.5.2	Segmentations de longueur d'onde : uni, mégatexture, macrotexture, microtexture	58
2.5.3	Indicateurs d'état de surface.....	59
2.6	Conclusion	60
3	Maintenance des infrastructures routières	60
3.1	Complexité de la maintenance.....	60
3.1.1	Terminologie.....	60
3.1.2	Enquête sur le resurfaçage routier en France.....	61
3.2	Détérioration des chaussées	62
3.2.1	Types de dégradations	62
3.2.2	Facteurs d'usure	63
3.2.3	Modélisation prédictive des dégradations.....	65
3.3	Techniques de maintenance	68

3.3.1	Entretien des revêtements.....	68
3.3.2	Système de production des matériaux.....	70
3.3.3	Coûts des techniques	71
3.3.4	Mode opératoire	74
3.4	Pratiques opérationnelles de la maintenance.....	76
3.4.1	RRN non concédé	76
3.4.2	RRN concédé.....	79
3.4.3	Réseau départemental	79
3.4.4	Réseau communal	80
3.5	Outils d'aide à l'entretien routier.....	80
3.5.1	Outils de gestion patrimoniale routière	80
3.5.2	Outils globaux.....	81
4	Véhicules routiers.....	82
4.1	Parc français	82
4.1.1	Typologies.....	82
4.1.2	Inventaires et projections.....	83
4.2	Usure des véhicules	84
4.2.1	Pneumatiques.....	84
4.2.2	Usure des pièces détachées (Odoki et Kerali 2000)	88
4.3	Consommations énergétiques et émissions	89
4.3.1	Déterminants de la consommation.....	90
4.3.2	Éléments quantitatifs de la consommation	93
4.3.3	Émissions	95
4.3.4	Modèles de consommation et d'émission	95
4.4	Bruit du trafic routier	98
4.4.1	Sources de bruit.....	98
4.4.2	Facteurs d'influence pour le bruit	98
4.4.3	Modélisation des émissions sonores (SFA 2010)	99
5	Conclusion	100
6	Bibliographie.....	101
1	Introduction : représentations de l'objet étudié.....	128
1.1	Des impacts hétéroclites	128
1.2	Trois strates représentatives complémentaires.....	128
2	Système géophysique terrestre	129
2.1	Représentation: approche et causalités.....	129

2.2	Capital abiotique	130
2.2.1	Dépenses	130
2.2.2	Recettes	132
2.3	Système climatique	133
2.3.1	Effet de serre	133
2.3.2	Changement climatique : variations de stocks et d'états	134
2.3.3	Émissions de GES	135
2.4	Hydrologie et circulations aériennes.....	135
2.4.1	Circulations aériennes	136
2.4.2	Composition atmosphérique.....	137
2.4.3	Hydrologie	137
2.4.4	Évènements climatiques extrêmes	138
2.5	Températures	139
2.6	Orographie.....	139
2.7	Environnement sonore.....	139
2.7.1	Base de données de l'ex-LRPC de Strasbourg	139
2.7.2	Évolution des propriétés acoustiques des couches de roulement (Bérenghier et al. 2001) 140	
2.8	Synthèse	140
3	Système écologique.....	141
3.1	Ancrage théorique : l'écologie routière (Fourès et Pech 2015)	141
3.2	Processus environnementaux affectés par le transport routier par milieu naturel	142
3.2.1	Atmosphère.....	142
3.2.2	Hydrosphère	143
3.2.3	Lithosphère.....	143
3.2.4	Enjeux principaux dans les écosphères	143
3.3	Approche multi-échelle des impacts de l'entretien routier	143
3.3.1	Différentes échelles en interaction	143
3.3.2	Effets aux niveaux micro-local à local	144
3.3.3	Effets au niveau local étendu	145
3.3.4	Effets au niveau global	145
3.4	Biodiversité et gestion patrimoniale des espèces.....	147
3.4.1	Biodiversité.....	148
3.4.2	Évolutions écologiques.....	148
3.4.3	Préservation de la biodiversité.....	149

3.4.4	Synthèse	151
4	Système socioéconomique.....	151
4.1	Penser le système socioéconomique de l'entretien routier	152
4.1.1	Société : définitions et articulation à l'individu.....	152
4.1.2	Éthique économique et social et notion de vie bonne.....	153
4.1.3	Bien-être sociétal.....	154
4.1.4	Règles fondamentales de la société française	159
4.2	Impacts socioéconomiques de l'entretien routier	160
4.2.1	Individus et parties prenantes.....	161
4.2.2	Impacts par partie prenante.....	165
5	Conclusion	196
6	Bibliographie.....	197
	Annexes	206
1	Indicateurs d'état de surface de chaussée : caractérisation et évolution	229
1.1	Panorama d'IRI français.....	230
1.2	Lien entre NBO et IRI	231
1.2.1	Sensibilité de l'IRI aux longueurs d'ondes et contribution par gamme	231
1.2.2	Vérification : tests de corrélations NBO et IRI.....	232
1.3	Loi d'évolution de l'IRI.....	234
1.3.1	Revue de littérature	234
1.3.2	Tests basiques français : corrélation entre IRI et âge de couche de surface autoroutière	236
1.4	Effet de la technique de resurfaçage sur l'IRI.....	237
2	Indicateurs usuels d'évaluation de la performance routière	237
2.1	Planification publique des transports et protocoles d'évaluation	238
2.1.1	Évaluation socioéconomique	238
2.1.2	Études environnementales.....	239
2.1.3	Synthèse	240
2.2	Indicateurs financiers	240
2.2.1	Définitions et calculs	240
2.2.2	Approche par acteur.....	244
2.2.3	Conclusion	246
2.3	Indicateurs macroéconomiques.....	247
2.3.1	Le modèle MESANGE.....	247
2.3.2	Analyse entrées-sorties	248

2.4	Indicateurs de performance routière.....	249
2.4.1	Gestion des routes.....	250
2.4.2	Performances normalisées.....	250
2.5	Indicateurs environnementaux par analyse du cycle de vie.....	251
2.5.1	ACV : définition et protocole normalisé de la méthode.....	251
2.5.2	Méthodes de caractérisation.....	252
2.5.3	Ancrage disciplinaire, typologie et bases de données.....	253
2.5.4	Application au transport routier et choix d'indicateurs.....	254
2.6	Conclusion.....	254
3	Conclusion : nécessité d'une nouvelle méthode combinatoire d'évaluation des stratégies d'entretien routier.....	255
4	Bibliographie.....	258
1	Architecture globale de la méthode d'évaluation.....	275
2	Indicateur pour le gestionnaire : coût d'entretien.....	277
2.1	Règles de calcul.....	277
2.2	Indexation des prix.....	277
2.2.1	Principe et index privilégié.....	277
2.2.2	Critique des index et formules paramétriques.....	278
2.2.3	Facteurs des coûts de resurfacement identifiés par les gestionnaires routiers français.....	278
2.2.4	Partition des coûts de resurfacement : retour de terrain français.....	279
2.2.5	Synthèse.....	280
2.3	Conclusion.....	281
3	Indicateurs pour l'utilisateur : dépenses et temps.....	281
3.1	Consommation de temps.....	281
3.1.1	Temps perdu pendant les travaux de resurfacement.....	281
3.1.2	Temps de consommation véhiculaire.....	284
3.2	Coûts véhiculaires.....	284
3.2.1	Modèles existants.....	285
3.2.2	Sélection et adaptation de modèles.....	287
3.2.3	Calcul de l'indicateur de coût aux usagers.....	307
4	Indicateurs pour la Nation : production, emplois, recettes publiques et coût global.....	309
4.1	Production et emplois : calcul par analyse entrées-sorties.....	309
4.1.1	Indicateur de production.....	309
4.1.2	Indicateur d'emplois.....	310
4.1.3	Effets multiplicateurs (Fouqueray 2016).....	311

4.2	Recettes fiscales et solidarité sociale	311
4.2.1	Fiscalité des carburants routiers	311
4.2.2	Fiscalité de l'entretien de véhicules	312
4.2.3	Fiscalité de l'entretien des chaussées	312
4.2.4	Discussion du périmètre	312
4.3	Coût global sociétal	313
5	Indicateurs pour les riverains : pollutions des milieux et bruit	313
5.1	Pollution des milieux	313
5.1.1	Typologie d'indicateurs	313
5.1.2	Indicateur de dommage à la santé	314
5.2	Bruit	314
5.2.1	Chaînes de modélisation et indicateurs acoustiques	314
5.2.2	Indicateur « <i>midpoint</i> » de niveau de puissance d'émission	315
5.2.3	Indicateurs « <i>endpoint</i> » d'effet sanitaire du bruit	324
6	Indicateurs complémentaires pour l'environnement : biodiversité et ressources non renouvelables	329
6.1	Dommage à la biodiversité	330
6.2	Consommation de ressources non renouvelables	330
7	Conclusion	330
8	Bibliographie	333
1	Introduction	344
2	ICV des opérations de resurfaçage des routes interurbaines françaises	345
2.1	Resurfaçage : cycle de vie et contributions environnementales	346
2.1.1	Cycle de vie	346
2.1.2	Contributions environnementales majoritaires	347
2.2	Revue de littérature des ICV	348
2.2.1	Procédés EcoInvent	348
2.2.2	Autres études	350
2.2.3	Synthèse	354
2.3	Développement d'Inventaires français	355
2.3.1	Liants	355
2.3.2	Granulats	366
2.3.3	Postes d'enrobage	368
2.3.4	Matériaux de chantier	370
2.3.5	Mise en œuvre	372

2.3.6	Synthèse des inventaires développés	376
3	ICV de maintenance des véhicules routiers	379
3.1	Revue de littérature des ICV.....	380
3.1.1	Modélisation d'EcoInvent.....	380
3.1.2	Autres études	381
3.1.3	Synthèse	384
3.2	Développement d'Inventaires français	385
3.2.1	Locaux de maintenance.....	385
3.2.2	Suspensions	389
3.2.3	Pneumatiques.....	393
4	Conclusion	401
5	Bibliographie.....	403
1	Présentation de l'étude de cas.....	417
1.1	Une autoroute représentative de la France.....	417
1.2	Stratégie d'entretien actuelle.....	417
1.2.1	Durée de vie des revêtements	417
1.2.2	État de surface de l'autoroute.....	418
1.3	Sélection et présentation du tronçon d'étude	419
1.3.1	Structure et état du tronçon	419
1.3.2	Données de trafic	419
2	Opérationnalisation autoroutière de la méthode.....	420
2.1	Définition du système de référence	420
2.2	Scénarisation : programmes de resurfaçage testés	421
2.2.1	Théorie de la scénarisation	421
2.2.2	Scénarios de resurfaçage.....	421
2.3	Paramétrage du calcul.....	422
2.3.1	Gestion des travaux.....	422
2.3.2	Loi d'évolution de l'IRI et effet du resurfaçage	423
2.3.3	Valeurs de paramètres divers.....	424
2.4	Calcul numérique et données complémentaires	425
2.4.1	Environnement de calcul.....	425
2.4.2	Choix et discussion des données macroéconomiques	425
3	Résultats et discussion	426
3.1	Performance des scénarios de resurfaçage : impacts absolus.....	426
3.2	Approche marginale : avantages des programmes d'entretien alternatifs	427

3.2.1	Présentation des résultats holistiques	427
3.2.2	Focus financier.....	430
3.2.3	Tendances des avantages et inconvénients selon la durée des cycles d'entretien	434
3.2.4	Analyse des déterminants des impacts absolus et des gains relatifs aux programmes d'entretien.....	436
3.3	Analyses de sensibilité.....	439
3.3.1	Niveau de trafic	439
3.3.2	Modification de la technique routière de resurfaçage	441
3.3.3	Vitesse de dégradation de la surface de chaussée.....	443
4	Enseignements	449
4.1	Résumé technique des résultats de l'étude de base.....	449
4.2	Résumé technique des résultats d'analyses de sensibilité	451
5	Conclusion	452
6	Bibliographie.....	455
1	Contributions de la thèse à l'évaluation dans le domaine routier	458
1.1	Apports chapitre par chapitre	458
1.2	Enseignements et recommandations sur les pratiques de resurfaçage	459
1.2.1	Vers une mécanique multipartite équitable de l'entretien routier, convergeant vers l'intérêt collectif	459
1.2.2	Des effets de levier financier et sanitaire très forts de l'entretien routier	460
1.2.3	Généralisation autoroutière des résultats par analyses de sensibilité	460
2	Portée et limites	461
2.1	Périmètre.....	461
2.2	Aspect systémique.....	462
2.3	Incertitudes et variabilité	462
2.4	Statique, dynamique et prospective	463
2.5	Calage et validation des modèles.....	463
3	Pistes de recherche	464
3.1	Résilience de la méthode	464
3.1.1	Priorités sociétales	464
3.1.2	Pénétrations et ruptures technologiques	465
3.2	Questionnements d'ordre méthodologique	465
3.2.1	Maille de résolution.....	465
3.2.2	Aspect multicritère.....	466
3.2.3	Représentation de l'impact au climat	467

3.2.4	Classification et pondérations	468
3.3	Approfondissement de la physique routière	468
3.3.1	Lois d'évolution d'état de surface	468
3.3.2	Lois de consommations véhiculaires selon l'état de surface	469
3.3.3	Lois de bruit de roulement	469
3.3.4	Données environnementales	470
3.3.5	Sécurité routière et état de surface	470
4	Bibliographie.....	470

Le chapitre 3 a fait état des méthodes et indicateurs existants, à la fois pour caractériser l'état de surface des chaussées, et pour évaluer la performance durable des programmes d'entretien. Il met en évidence des méthodes et indicateurs pas toujours très spécifiques – voire inadaptes – à une vision globale et étendue de l'impact des stratégies d'entretien de resurfaçage sur toutes les parties prenantes.

Ce chapitre 4 propose une architecture globale d'évaluation de ces stratégies, et détaille la construction et l'aboutissement de notre méthode de quantification des impacts durables des programmes de resurfaçage des routes interurbaines en France. Pour chaque partie prenante de l'entretien routier, nous réalisons d'abord une étude approfondie des méthodes de calcul existantes, étude complémentaire de la pré-étude établie au chapitre précédent. Nous discutons ces méthodes, nous les comparons, avant de retenir ou de développer le protocole de quantification le plus pertinent dans notre contexte. Ce chapitre construit de manière justifiée et explicite l'architecture détaillée de la méthode : quelles données doivent être entrées par les utilisateurs de la méthode, et quels modèles en aval du calcul des indicateurs de performance de la stratégie de resurfaçage sont utilisés. Enfin, il motive également les choix relatifs à la constitution des bases de données supports, à partir d'outils existants ou de démarches originales.

Un modèle est une simplification paramétrique d'une réalité, simplification permettant un diagnostic pour les modèles statiques (i.e. on regarde ce qui est) ou reconstitution simplifiée d'un processus pour réaliser une prévision pour les modèles dynamiques (i.e. on étudie ce qui sera). Notre évaluation nécessite des modèles dynamiques : nous souhaitons prévoir l'évolution du système routier et de ses impacts sur plusieurs décennies. Nous concentrerons également nos efforts sur la prise en compte des phénomènes dynamiques les plus probablement influents dans le bilan durable d'un programme d'entretien.

Dans ce chapitre, nous aborderons successivement l'architecture globale de la méthode d'évaluation, puis le calcul des indicateurs de performance d'une politique de resurfaçage pour le gestionnaire routier, l'utilisateur, la Nation, les riverains routiers, et enfin l'Environnement.

1 Architecture globale de la méthode d'évaluation

Combiné aux connaissances mises en évidence dans le chapitre 2 sur les conséquences de l'état de surface des routes sur toutes les parties prenantes du transport routier, et à l'inadaptation des méthodes et indicateurs d'évaluation pour les politiques d'entretien des routes discutée au chapitre 3, nous aboutissons à une proposition d'architecture de méthode d'évaluation des performances durables de programmes de resurfaçage routier, par recombinaison de méthodes ne couvrant pas l'ensemble des parties prenantes du transport routier ou inadaptes à l'évaluation des opérations d'entretien des routes.

Nous proposons de développer la méthode d'évaluation schématisée sur la Figure 49. En entrée, elle considère des données d'état de surface routière, de préférence au format de l'IRI, ou sinon sous format de NBO. Elle combine ensuite des méthodes d'évaluation qui permettront de couvrir l'ensemble des piliers du développement durable et des parties prenantes : analyse du coût global, évaluations financières et socioéconomiques, analyse de cycle de vie environnemental, et analyse de Leontief. La combinaison de ces méthodes permet ensuite de calculer les principaux impacts qu'une programmation d'entretien déclenche sur ses parties prenantes du fait de la déformation plus ou moins rapide et prononcée de la route au cours de sa durée de vie.

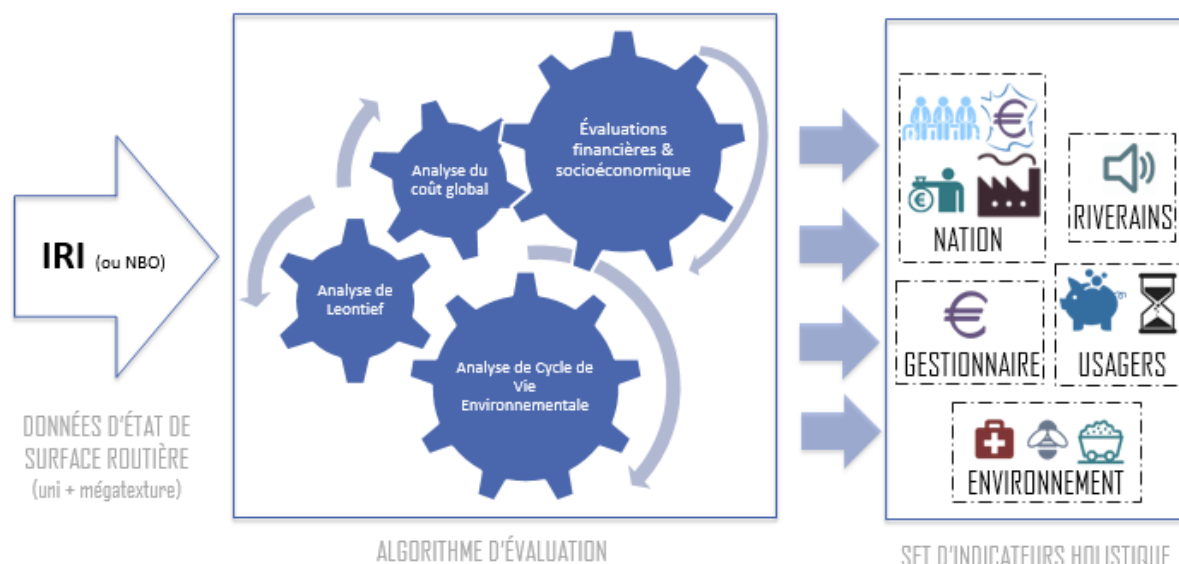


Figure 49 Schéma de fonctionnement de la méthode d'évaluation holistique des programmes d'entretien des routes

L'ensemble d'indicateurs que nous sélectionnons doit à la fois couvrir l'ensemble des impacts et des parties prenantes, et ne pas être en nombre trop élevé. Le riverain routier s'attachera à un indicateur représentant le niveau de bruit routier auquel il est soumis. Le gestionnaire aura besoin d'un indicateur de dépenses en travaux routiers. L'utilisateur voudra connaître les dépenses financières et en temps générées par l'état de la route sur sa consommation de transport routier. Puis, deux acteurs « moraux », la Nation et l'Environnement devront être représentés. Quatre types d'indicateurs étant déjà présélectionnés pour les usagers, le gestionnaire et les riverains routiers, il nous semble qu'il serait peu opérationnel selon les retours d'expérience de sélectionner un nombre d'indicateurs complémentaires supérieur à 10 pour ces deux dernières parties prenantes, bien que nous n'ayons évidemment pas trouvé de préconisation scientifique sur le nombre maximal d'indicateurs à présenter dans un outil d'aide à la décision publique. Nous confronterons les approches et justifierons notre choix dans le chapitre suivant, mais nous nous orientons dès à présent vers des indicateurs agrégés qui permettent, en un nombre restreint, de représenter tous les dommages portés à l'environnement : consommation de ressources non renouvelables, dommage aux écosystèmes et dommage à la santé humaine. Nous avons donc 7 indicateurs, que nous devons compléter par ceux représentant les intérêts de la Nation. Nous avons vu dans le chapitre 2 que le chômage était un facteur de mal-être pour les individus. Nous sélectionnerons donc un indicateur d'emploi dans notre méthode. Les responsables politiques sont également sensibles au dynamisme économique de leur pays : un indicateur de PIB, bien que davantage associé au système de valeur économique actuel qu'à une notion de BE des populations (cf. chapitre 2) nous semble donc important à inclure dans une méthode d'évaluation des stratégies d'investissement public. La solidarité sociale étant, selon la valeur française de fraternité, un des piliers moraux du pays, nous proposons également un indicateur de recettes fiscales relatif aux programmes d'entretien. Enfin, une approche plus générale permettant le bilan financier multiacteur des stratégies d'entretien nous semble correspondre aux enjeux d'utilité publique, et nous réfléchirons à un indicateur adapté pour cela.

Nous sommes donc rendus à un set de 11 indicateurs holistiques représentant l'ensemble des impacts importants de l'entretien. Il est évident que cette sélection comprend une part de subjectivité et un contexte temporel, relatifs à l'identification d'enjeux issus des connaissances scientifiques et sociales actuelles. Néanmoins, dans le cadre d'un travail de recherche individuel s'écoulant sur 3 ans et à la suite d'un recensement déjà complexe par son aspect pluridisciplinaire des connaissances, cette

sélection nous semble aujourd'hui cohérente, bien qu'elle puisse être amendée avec le temps par les progrès de la science et l'évolution des valeurs socioéconomiques.

Nous allons maintenant discuter les méthodes de calcul possibles des types d'indicateurs de performance sélectionnés par partie prenante.

2 Indicateur pour le gestionnaire : coût d'entretien

Nous souhaitons ici discuter le calcul d'un indicateur de coût de resurfaçage pour le gestionnaire du patrimoine routier. Nous utilisons les prix en monnaie 2017 obtenus dans notre enquête et traités statistiquement, indiqués dans le chapitre 1, ainsi que les règles de calcul financier discutées en première partie de ce chapitre.

2.1 Règles de calcul

Nous réutilisons la formule de calcul de VAN présentée au chapitre précédent. Les coûts d'investissements peuvent être présentés hors taxes (HT) et toutes taxes comprises (TTC). Néanmoins, nous ne comptons aucune taxe sur les travaux de voirie. On peut considérer que dans la commande publique de travaux de voirie par les CD ou les DIR, il s'agit d'un simple transfert de fonds au sein de l'État ou des Services Déconcentrés. Dans le cas des SCA, selon le Ministère de l'Écologie, celles-ci récupèrent la TVA sur l'ensemble de leurs dépenses (MEDDE 2014c). Aussi, la TVA ne doit donc pas être prise en compte dans le coût TTC pour les autoroutes concédées non plus (MEDDE 2014c). On fera donc nos calculs HT.

De plus, dans le calcul de VAN-F, selon la fiche-outil du Ministère (MEDDE 2014a), on calcule la somme des flux financiers en euros courants actualisés. Selon cette même fiche, on doit utiliser « un taux d'actualisation financier spécifique à l'acteur considéré », soit un taux égal au coût du financement (i.e. coût moyen pondéré du capital). Nous proposons par défaut les taux d'actualisation indiqués dans le chapitre précédent selon le type de gestionnaire (public ou privé). En revanche, pour obtenir les prix courants, il faut prévoir l'évolution des prix des opérations de resurfaçage, ce dont nous traitons maintenant.

2.2 Indexation des prix

2.2.1 Principe et index privilégié

Cet indicateur, comme tous les indicateurs monétaires, peut nécessiter de recourir à une méthode de mise à jour des coûts « réels » – indexation voire actualisation – décrite dans la section « 3.2.3 Calcul de l'indicateur de coût aux usagers ». Il existe deux manières utilisées dans les marchés publics de mettre à jour le prix de la réponse à appel d'offre selon le délai écoulé entre le chiffrage et le moment de réalisation des travaux : l'indexation via un index ou celle via une formule paramétrique.

Les TP²³⁵ peuvent utiliser en France plusieurs indexes nationaux selon les activités considérées, qui sont des indices composites de coût de production. L'index TP09 correspond plus précisément aux travaux d'enrobés (fabrication et mise en œuvre avec fourniture de bitume et granulats). C'est celui qui correspond le mieux aux travaux de resurfaçage, y compris pour la mise en œuvre d'ESU ou d'ECF. Il est composé des indices suivants, selon une comptabilité analytique : salaire et charges ; matériel ; matériaux ; énergies ; transports ; frais divers. Notons que chacun de ces 6 postes est également indexé selon sa structure de coûts via des indices élémentaires pondérés. Les pondérations sont déterminées avec l'aide du retour de terrain des fédérations professionnelles. On dit que ces index sont des « indices chaînés », ou indice de Laspeyres-prix, car ils prennent les coûts de l'année 0 en référence, et pourraient avoir le défaut de surestimer l'inflation.

²³⁵ <https://www.insee.fr/fr/metadonnees/source/s1324>

Notons qu'entre décembre 2014 et décembre 2017, la valeur de l'index TP09 était sensiblement la même (respectivement 99.3 et 99.8) avec une tendance concave au temps dont le minimum correspond à février 2016 (82.6)²³⁶ (voir Annexe 57).

En décembre 2014, la structure de l'index TP09 était la suivante²³⁷ : 50 % en matériaux (et 35% en bitume²³⁸), 15 % en transport, 14% en salaires et charges, 11 % en matériel, 9 % en énergie et 1 % en services. Dix ans auparavant, les matériaux ne représentaient que 39% du coût et les salaires et charges 24%²³⁹.

2.2.2 Critique des index et formules paramétriques

L'utilisation de l'index n'est pas fiable si les évolutions respectives de chaque type de coûts composant le coût total ne sont pas homogènes : des évolutions hétérogènes génèrent un changement dans la composition du coût total, et in fine dans la pondération qu'il faudrait adopter. La Direction générale de la concurrence, de la consommation et de la répression des fraudes (DGCCRF) a souligné la « nécessité de vérifier consciencieusement que la structure de l'index retenu pour la variation des prix d'un marché correspond bien à la structure des coûts de l'ouvrage à construire »²⁴⁰. C'est pourquoi la structure de l'index a évolué dans le temps, et certains rédacteurs de marché préfèrent même proposer une formule paramétrique du prix, qui est considérée comme plus fiable face aux dérives de prix des marchés, et notamment quand le coût total repose en partie sur le marché du pétrole qui est particulièrement volatile. C'est donc une solution jugée préférable pour une indexation sur temps long ou si les conjonctures économiques sont instables.

Pour déterminer une formule paramétrique adaptée, l'estimation globale des travaux considérés doit être analysée et décomposée en éléments de coût simples, chacun pouvant être représenté par un indice INSEE. La part de chaque élément simple, en pourcentage de la valeur totale de l'ouvrage, sera ainsi le coefficient de pondération de l'indice correspondant, dans la formule paramétrique. Ce pourcentage est arrondi à l'entier. Il est conseillé d'expérience²⁴¹ que cette paramétrisation ne soit pas trop fine (<3% en règle générale) afin d'éviter de possibles distorsions.

2.2.3 Facteurs des coûts de resurfacement identifiés par les gestionnaires routiers français

Notre enquête sur les pratiques de resurfacement compte une question sur les facteurs de prix de ce type d'opération qui a obtenu 30 réponses. Les postes qui reviennent sont la fourniture, le transport et la mise en œuvre ». Il est spécifié que les charges types pour le matériel, la main d'œuvre, et les sujétions d'exploitations restent sensiblement équivalentes pour les différentes techniques. Cependant, une forte variabilité finale des coûts est relevée, avec l'identification des facteurs principaux suivants : technique, travaux préparatoires, économies d'échelles, régie ou forfait, transport, exploitation et gestion du chantier, conjoncture économique et marché local.

Parmi les variabilités techniques, les éléments suivants sont relevés par les répondants : « matériaux, type de bitume, épaisseur », « Nature des composants (nature du bitume, performances des granulats, recyclage ou non) », « épaisseur [...] formulation et dosage des constituants », « épaisseur », « quantité de matériaux mis en œuvre », « Technique mise en œuvre ». Les coûts de mise en œuvre font dépendre des « difficultés de mise en œuvre » et du nombre d'ateliers utilisés sur chantier (« 2e atelier d'application »). Le bitume revient souvent comme facteur de variabilité : « Essentiellement du liant » (réponse brute), « coût et qualité du bitume », « bitume », « type de liant (modifié ou non) », « le

²³⁶ <https://www.insee.fr/fr/statistiques/serie/001710997#Tableau>

²³⁷ https://www.fntp.fr/sites/default/files/content/n133_marches_n36.pdf

²³⁸ <https://www.lemoniteur.fr/articles/comment-echapper-a-la-baisse-des-index-tp08-et-tp09-33419902>

²³⁹ http://www.cohesion-territoires.gouv.fr/IMG/pdf/structure_des_index_tp.pdf

²⁴⁰ <https://www.lemoniteur.fr/articles/comment-echapper-a-la-baisse-des-index-tp08-et-tp09-33419902>

²⁴¹ <https://www.lemoniteur.fr/article/indices-index-comment-actualiser-ou-reviser-les-prix-d-un-marche-6093896>

liant » (réponse brute), « Principalement de la fluctuation du prix du bitume », « Dosage », bien que le granulat ait également été évoqué une fois (« type de granulats »). Les travaux préparatoires sont également cités comme facteur important de variabilité, en fonction de la technique ou pas : « ESU (nécessité de reprofilage préalable ou pas, émulsion modifié ou pas) – ECF (repro[filage] préalable ou pas) », « surtout travaux préalables le cas échéant », « Du niveau de préparation nécessaire », « importance des déformations et de l'uni des chaussées et donc du coût du reprofilage », « l'état de la chaussée », « la dégradation des chaussées », « importance de la dégradation », « Enduits superficiels [...] travaux préparatoires des supports », « travaux annexes », « Les différences de coûts dépendent essentiellement des contraintes d'exploitation », « Pour chaque technique c'est fonction de l'importance des travaux préparatoires », « Pour les BB à chaque cas son coût (peut passer de 18 € à 150 €), sachant que si le fraisage préalable est nécessaire cela le double, en moyenne on compte 35 € / m² ». Les économies d'échelle sont également une réalité de la variabilité du marché, citées dans ces termes « ampleur du chantier », « Surface traitée », « quantité », « le linéaire », « Taille du chantier », « volume global du chantier », « Coûts selon tonnage », « du volume de chaussée à traiter » : « Variable en fonction de la taille des chantiers ». Le fait de posséder un parc d'entretien routier ou pas est également important : « si les travaux sont faits en régie (95% ESU faits par le Parc Routier) cela a un impact direct (mais pas indirect si on y rajoute la Masse salariale) », « part de sous-traitance », « Pour les ES, cela varie entre 1.60 € et 6 €, 90% sont réalisés en régie par le Parc Routier départemental ». Le transport apparaît dans plusieurs occurrences : « situation géographique », « éloignement des postes », « Éloignement du chantier de la centrale (coût de transport) », « éloignement du chantier au site de production [...] gisement de la ressource en granulat », « proximité des centrales d'enrobage », « Quelle que soit la technique BBM, BBTM, GB ou BBSG, prix influencé par le poste transports principalement », « distance de transport surtout pour les enrobés ». L'exploitation et la gestion du chantier a également une grande importance : « difficulté d'exploitation (agglomération, nuit, degré de dégradation de l'assise, emploi de bitume modifié ou pas) », « exploitation », « durée et période des travaux, conditions de balisage », « contraintes d'exploitation (travaux de jour ou de nuit, plage horaire de travail) », « l'urbain, le périurbain », « difficultés de mise en œuvre (travaux de nuit par exemple) [...] difficultés de mise en œuvre », « sujétions particulières de chaque chantier (nuit », « l'élément qui impacte principalement le coût d'entretien, quelle que soit la technique mise en œuvre est la modalité d'exploitation (jour, nuit, week-end) », « exploitation sous chantier ». Enfin, on retrouve comme facteur de variabilité des coûts des techniques de resurfaçage la conjoncture économique et le marché local : « les coûts sont liés aux marchés publics », « mode de mise en concurrence », « niveau de prix général des marchés », « de la concurrence entre les entreprises, « Principalement [...] du plan de charge des entreprises, « Ces prix peuvent varier énormément (à la baisse), car une bataille des prix est déclarée sur la moitié Sud du département en ce moment ».

2.2.4 Partition des coûts de resurfaçage : retour de terrain français

Nous exploitons notre questionnaire, dans laquelle la question de répartition fine des coûts de resurfaçage a été posée et à laquelle 27 gestionnaires de l'interurbain français ont répondu. Sur 27 réponses, plus de 50% des répondants annoncent simplement ne pas pouvoir indiquer de répartition. Deux expliquent que les marchés sont globaux (« bordereaux de prix à coût complet », « prix globaux des marchés », « En tant que maître d'ouvrage, ces éléments ne sont pas connus. Les sous-détails de prix des marchés des opérations de travaux ne permettent pas d'arriver à ce niveau de détail », « La répartition indicative est celle que l'on retrouve dans la décomposition de l'index TP09²⁴² »). La

²⁴² Pour information, la méthodologie indiquée sur le site de l'INSEE est la suivante « Les index travaux publics (TP) sont des indices de coûts des différentes activités du secteur de la construction, appréhendés à partir de 7 postes dans une démarche de comptabilité analytique. Pour l'indice TP09 sur les travaux d'enrobés (fabrication et mise en œuvre avec fourniture de bitume et granulats), la répartition est la suivante : « salaires et charges » =

répartition de l'index TP09 semble uniquement indicative, puisqu'un gestionnaire annonce « Pas d'infos fiables sur ce point ».

Quatre réponses indiquent des éléments indicatifs différents de l'index TP09. Une réponse indique une répartition équitable entre fournitures, moyens techniques et main d'œuvre. Une autre annonce un prix de « 35 à 40 euros la tonne [d'enrobés] en sortie de centrale », le reste couvrant « le transport, les moyens matériels et humains les bénéfices et aléas du chantier ». Un gestionnaire rappelle de nouveau que les coûts sont variables en fonction de la localisation et des quantités commandées. Enfin, une dernière réponse ne dispose d'aucune données pour les enrobés mais annonce pour les ESU 53% en matières premières, 35% en matériel, 2.5% en consommables et 9.5% en main d'œuvre. Cela ne correspond pas à la structure proposée par l'index TP09.

2.2.5 Synthèse

Évaluer le coût des techniques routières de resurfaçage plusieurs années ou décennies avant travaux est un exercice périlleux, qui devrait dans l'idéal tenir compte de nombreuses variabilités, telles que celle des marchés des matières premières (bitume, granulats, proximité de la ressource en), de l'activité des entreprises (concurrence), des contraintes d'exploitation ou encore des travaux préparatoires et des économies d'échelle. L'utilisation d'une formule paramétrique, suggérée par le listage de ces variables de coût, n'est pas une solution puisqu'elle répond à la mise à jour d'un coût à l'instant présent par rapport à un coût passé, et l'utilisation d'un index n'est pertinente que dans le cas où la prolongation des tendances d'évolution des coûts l'est, ce qui n'est pas le cas du fait à la fois de l'importance du marché volatile du pétrole, et récemment du granulats, dans le coût des resurfaçages, mais également du fait des distorsions locales (concurrence, proximité des ressources et particulièrement celle des granulats). On le voit sur l'index TP09, applicable aux travaux des enrobés, et qui a montré toute son instabilité depuis 2014, dans un contexte de secteur du BTP en crise. Les valeurs de cet indice avant 2014 ne sont pas mises à disposition par l'INSEE.

Compte tenu de cette instabilité, d'une croissance ralentie et d'un taux d'inflation français moyen de 0.4% sur les 3 dernières années²⁴³, ainsi que d'une conjoncture économique très incertaine à laquelle se superpose (ou qui trouve sa source dans) une certaine crise environnementale, nous proposons de considérer comme coûts de resurfaçage les coûts actuels des techniques, relevés dans notre enquête auprès des gestionnaires de l'interurbain français. Les résultats obtenus grâce à notre enquête nous semblent de qualité limitée, mais il reste très délicat d'obtenir des données de meilleure représentativité du fait des nombreux paramètres des coûts, temporels et géographiques par exemple. L'utilisation d'une formule paramétrique (avec coûts unitaire stable par poste, à moins que des tendances stables ne se dégagent) serait une variante plus évoluée de notre proposition, avec un paramètre bitume, un paramètre granulats et son transport, un paramètre matériel, un paramètre exploitation et un paramètre main d'œuvre et charge.

Nous considérerons donc les coûts des techniques indiquées dans le Tableau 25.

Tableau 25 Coûts des techniques de resurfaçage en monnaie constante (euros 2017)

COUT	BBSG	BBM	BBTM	ECF	ESU
MOYENNE (€HT/M ²)	18	14	10	5	3

24%, « matériaux » = 39%, « matériel » = 9%, « énergie » = 9%, « transport » = 12%, et « frais divers » = 7% (<http://www.cohesion-territoires.gouv.fr/tp-index-nationaux-travaux-publics>).

²⁴³ <https://france-inflation.com/index.php>

Ce positionnement de ne pas considérer d'évolution du prix en euros constants à moyen-long terme est en accord avec les préconisations de la fiche outil produite par le Ministère de l'Écologie concernant l'estimation des coûts unitaires d'investissement²⁴⁴ (MEDDE 2014c).

En revanche, pour calculer les coûts en monnaie courante, faute d'une tendance qui pourrait se dégager sur l'Index T09 (9), nous retenons l'évolution de l'Indice des Prix à la Consommation (IPC), qui est un proxy à l'inflation pondérée sur le panier de bien moyen des français. Un traitement statistique de la série temporelle de l'IPC entre janvier 1996 et avril 2018 permet de mettre en évidence une tendance très stable d'augmentation mensuelle de l'IPC de 0.118, avec un coefficient de détermination de 0.98, soit une inflation de long terme de 1.4% par an (voir Annexe 58).

2.3 Conclusion

Nous réaliserons donc nos calculs de coût d'entretien selon la formule de VAN avec des prix hors taxes en euros courants avec une inflation de 1.4% (IPC) et un taux d'actualisation selon le gestionnaire.

Deux autres indicateurs pourraient être intéressants pour le gestionnaire : un indicateur d'indisponibilité de l'infrastructure et un indicateur d'état patrimonial. Dans le cas de l'indisponibilité, il s'agit simplement de calculer le temps de fermeture ou d'encombrement de voies. Néanmoins, ils peuvent être redondants avec le temps perdu par la gêne de l'utilisateur par les travaux, que nous calculerons dans la section dédiée à l'utilisateur. Un indicateur patrimonial est moins évident à aborder et reste un sujet de recherche (cf. IREX DVDC présenté au chapitre 1). Dans l'idée, il pourrait s'agir de calculer un indicateur de surcharge dynamique (en fonction du profil longitudinal ?) ou un indicateur relatif à la durée de vie résiduelle (par des lois d'évolution de déflexion par exemple). Aujourd'hui, ces aspects peuvent être abordés par des notes sur l'état de chaussées structurel ou surfacique de chaussée, comme dans l'IQRN. On pourrait déterminer un indicateur d'effet des travaux de resurfaçage par technique, afin de calculer par exemple une note « imperméabilisation » et une note « portance mécanique » en fonction de la durée de vie de chaque technique.

3 Indicateurs pour l'utilisateur : dépenses et temps

Comme nous l'avons vu au chapitre 2, l'utilisateur est principalement sensible à deux éléments : la consommation de temps (passée sur la route ou pour son véhicule) et le coût d'utilisation de son véhicule. Nous construisons ici un indicateur adapté à l'entretien routier pour chacun de ces éléments.

3.1 Consommation de temps

Rappelons comme dit au Chapitre 2 que le temps passé par l'utilisateur pour un déplacement routier va être affecté de trois manières par l'état de surface des routes : la variation des temps de parcours relatifs à l'IRI (modification de la vitesse de conduite), le temps perdu dans la congestion routière du fait des travaux de resurfaçage, et le temps passé pour la consommation véhiculaire d'énergie de traction, de pneumatiques et d'entretien en garage (faire le plein, aller au garage pour changer ses pneumatiques ou réaliser l'entretien). On ne considèrera pas les variations des temps de parcours relatifs à la modification de la vitesse du fait de l'IRI, comme justifié dans le chapitre 2.

3.1.1 Temps perdu pendant les travaux de resurfaçage

3.1.1.1 Approche pratique et résultats d'enquête

Plusieurs cas existent : travaux de jour ou travaux de nuit ; réduction de voie avec ou sans alternat, ou déviation. Dans le cas des travaux de nuit, on considèrera que les pertes de temps pour l'utilisateur sont

²⁴⁴ « À défaut de références pertinentes pour certains postes d'investissement, les coûts unitaires sont supposés constants (en euros constants) en tendance de moyen-long terme »

négligeables (T. Wang, Harvey, et Kendall 2014b). Dans le cas des travaux de jour, la gêne aux usagers peut être calculée par deux approches : microsimulation ou macrosimulation. Les approches les plus précises sont les approches par microsimulation. Le couplage d'un tel modèle à l'ACV de travaux routiers a déjà été réalisé (Huang, Bird, et Bell 2009) mais nécessite un logiciel spécial, tel VISSIM. À défaut de coupler notre modèle à un tel logiciel, nous proposons une approche simplifiée de la gêne au trafic, par macrosimulation.

Selon comment sont gérés les travaux de resurfacement interurbain, le calcul du temps perdu par les usagers du fait de cet entretien doit être fait différemment, les réalités physiques étant différentes, principalement du fait du trafic à gérer. Les travaux peuvent être gérés sous alternat, par basculement, par réduction de voie ou par coupure avec déviation (cf Figure 50). Notre enquête a montré que les SCA gèrent leurs travaux avec réduction de voirie sans alternat. Le basculement du trafic sur autoroutes (contre-sens) reste rare. Les DIR utilisent les coupures avec déviation la nuit de manière quasi-automatique (5 DIR sur 6), tandis que de jour les tendances sont moins claires, avec 40% des répondants citant la coupure avec déviation, 40% l'alternat et 20% la réduction de voirie sans alternat. Les conseils départementaux utilisent principalement l'alternat en travaux de jour (22 occurrences), rarement la coupure avec déviation (3 occurrences). De nuit, les travaux sur départementales sont gérés plutôt sous coupure avec déviation (16 occurrences), mais également sous alternat (8 occurrences).

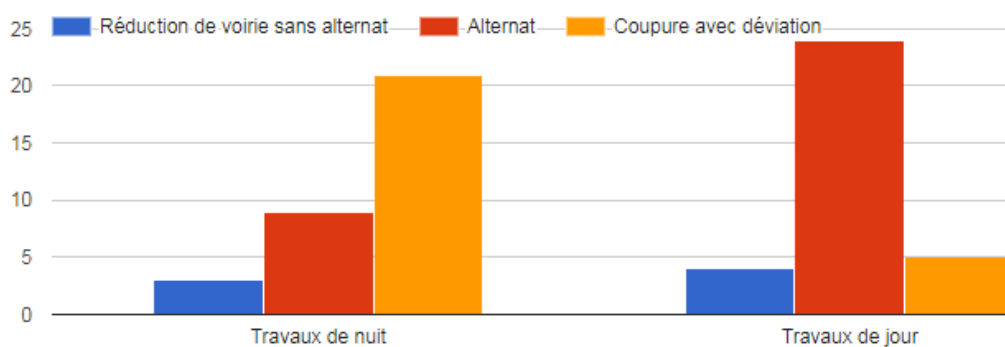


Figure 50 Résultats d'enquête aux gestionnaires routiers de l'interurbain français à la question « quels types de planification mettez-vous en œuvres pour vos travaux de resurfacement ? »

3.1.1.2 Exemple du réseau autoroutier et des routes express : réduction de voirie

Les travaux sont réalisés en coupant l'accès aux voies entretenues, et en transférant tout le trafic sur la ou les voies restantes. De plus en plus, afin d'assurer la sécurité des ouvriers qui ont été 124 à perdre la vie par collision en abord de chantier en 2016²⁴⁵, la vitesse maximale initialement de 110 ou 130 km/h est restreinte. Sur autoroutes, nous avons trouvé des réductions de vitesse maximale allant de 70km/h²⁴⁶ à 110 km/h²⁴⁷. Nous avons d'autre part eu accès aux règles de réduction de vitesse d'une SCA particulière dont nous synthétisons les caractéristiques dans le Tableau 26. La zone de basculement où les véhicules du sens en travaux rejoignent l'autre sens de chaussée est souvent limitée à des vitesses inférieures, par exemple de 50 km/h, mais nous négligerons ce ralentissement très ponctuel (hypothèse sous-jacente : pas de congestion générée par ce goulot). Notons que, selon les observatoires de comportement des usagers autoroutiers dédiés, en France comme aux États-Unis, ces nouvelles limites de vitesse ne sont que partiellement respectées. L'Observatoire des

²⁴⁵ <https://www.20minutes.fr/societe/2094767-20170629-routes-pourquoi-accidents-abords-zones-travaux-progressent-tant>

²⁴⁶ <https://www.ledauphine.com/ain/2011/06/24/un-radar-pedagogique-poste-temporairement-sur-le-viaduc-de-bellegarde>

²⁴⁷ <http://www.sanefgroupe.com/var/sanef/storage/media/presse/DP-observatoire-des-comportements/files/docs/all.pdf>

Comportements sur Autoroute de la SANEF a par exemple annoncé que 75% des conducteurs étaient en excès de vitesse lors d'une réduction de vitesse autoroutière à 110km/h avec neutralisation d'une voie pour cause de travaux, dont plus de 44% à plus de 120 km/h et 14% à plus de 130 km/h (SANEF 2017).

Tableau 26 Synthèse d'un exemple de règles de réduction de vitesse d'une SCA particulière en France

NOMBRE DE VOIES	ZONE	GESTION TRAVAUX	LIMITE VITESSE (KM/H)
2X2	VL	Coupure VL	90
	Toute largeur	Basculement	90
2X3	VL	Coupure VL	110
	Toute largeur	Basculement	110 (2 voies) / 90 (1 voie)

Rappelons que, comme expliqué au chapitre 1, deux types d'écoulement du trafic peuvent exister : l'écoulement libre quand le débit n'atteint pas la capacité, et la congestion au-delà du débit maximum. Nous considérons que les travaux sont planifiés sur autoroute de manière à éviter toute congestion marquée : les temps perdus seront donc considérés par défaut comme relatifs à un abaissement de la vitesse autorisée sur le tronçon entretenu, en écoulement libre. Nous utiliserons la formule de perte de temps d'un véhicule de type *i* – avec 4 types de véhicules ; Voiture Particulière (VP), Véhicule Utilitaire Léger (VUL), Petit Poids Lourd (PPL) ou Gros Poids Lourd (GPL) – passant dans la zone de travaux indiquée dans l'Équation 11²⁴⁸.

Équation 11 Formule de calcul du temps perdu par tous les usagers d'un tronçon routier

$$temps_{perdu,i} = Longueur_{tronçon} \cdot \left[\frac{1}{v_{réduite,i}} - \frac{1}{v_{normale,i}} \right]$$

Cette formule est à appliquer à chaque type de véhicules (chaque type de véhicule correspondant à une vitesse de roulage moyenne différente) par le produit de son trafic, et la somme de ces termes à multiplier par la durée des travaux, selon la formule de l'Équation 12.

Équation 12 Formule de calcul du temps perdu par tous les usagers d'un tronçon routier du fait de travaux

$$temps_{perdu,total} = \sum_i temps_{perdu,i} = N_{heures,travaux} \cdot [q_{VL} \cdot temps_{perdu,VL} + q_{PL} \cdot temps_{perdu,PL}]$$

Cette formule peut s'appliquer avec le nombre d'heures de travaux et les débits de trafic horaires comme indiqué dans l'Équation 12, mais aussi alternativement avec le nombre de jours et les trafics journaliers dans le cas où la situation de dégradation de trafic affecte de la même façon le trafic pendant toute la durée des travaux, que les machines soient en activité ou pas (e.g. travaux sur plusieurs jours réalisés seulement le jour mais dégradant le trafic sur les périodes diurnes et nocturnes de manière identique).

À défaut de données, le calcul des débits horaires se fait à partir du TMJA, de la composition du trafic VL/PL, et d'une répartition horaire de trafic type. Nous proposons de reprendre la répartition horaire proposée par la NMPB (formules en annexe 3 du document selon la route considérée (autoroute de liaison/routes interurbaines, fonction longue distance/régionale) qui donne les répartitions des véhicules sur différentes plages horaires (Sétra 2009c). À titre d'exemple, nous donnons les formules adaptées aux autoroutes de liaison en fonction longue distance dans le Tableau 27.

Tableau 27 Formules de calcul du trafic horaire VL et PL d'une autoroute de liaison en fonction longue distance (Sétra 2009c)

	6H-22H	6H-18H	18H-22H	22H-6H
VL	TMJA(VL)/18	TMJA(VL)/17	TMJA(VL)/19	TMJA(VL)/82
PL	TMJA(VL)/20	TMJA(VL)/20	TMJA(VL)/20	TMJA(VL)/39

²⁴⁸ Formule classique, ici issue du rapport non publié du projet de recherche européen « Isabela »

La question de la durée des travaux est également complexe, dans la mesure où elle dépend des moyens mis en œuvre : rendement des machines (nombre de machines utilisées simultanément, largeurs de mise en œuvre), travail en journée, de nuit, ou en 3x8h... Ceci est à spécifier par le gestionnaire qui souhaite réaliser des travaux.

3.1.1.3 Réseaux national et départemental

Sur réseaux en 2x1 voies, les chantiers sont gérés différemment, soit par déviation, soit par alternat. Le calcul est à effectuer au cas par cas. Selon le MTQ²⁴⁹, il est conseillé pour des vitesses sur routes secondaires de plus de 50 km/h de retrancher 10 km/h par voie obstruée par le chantier à la vitesse maximale autorisée originelle, et de ne pas dépasser 30 km/h de réduction de vitesse. On peut ensuite tenir compte de la congestion par exemple avec un modèle de goulot et une loi de poisson dans le cas de l'alternat.

3.1.2 Temps de consommation véhiculaire

Il n'existe évidemment pas de statistique sur les temps typiques passés pour l'entretien des véhicules ou le temps passé à faire un plein de carburant. Nous proposons des estimations grossières par unité de consommation véhiculaire et par catégorie, que nous pourrions multiplier par le nombre d'unités consommées par l'infrastructure évaluée afin d'estimer le temps passé par les usagers.

Nous considérerons différents temps pour l'entretien d'exploitation des véhicules, synthétisés dans le Tableau 28. Le déplacement au garage prendra 30'. Le temps d'opération de changement de pneumatiques sera fixé à 45' pour 2 pneus VP²⁵⁰, 1h pour 2 pneus VUL ou PPL, 1h30 pour 2 pneus d'un GPL²⁵¹. Les temps considérés pour le changement des suspensions seront de $(1+4^{252})/2$ = environ 2.5h par paire (VL). Enfin, les volumes de réservoirs types et les temps passés pour les remplir en carburant seront de 10' pour les VL et 0' pour les PL pour le déplacement à la pompe, de 10' pour les VL, 6' pour les PPL, 9' pour les GPL²⁵³ pour l'attente, le remplissage du réservoir et le paiement, et les volumes des réservoirs considérés sont les suivants : VP = 50L, VUL = 80L²⁵⁴, PPL = 315L, GPL = 800L²⁵⁵. On obtient les durées en minutes par véhicule pour les différentes opérations considérées indiquées dans le Tableau 28.

Tableau 28 Durées en minutes par véhicule pour les différentes opérations d'exploitation/maintenance

DUREE DE L'OPERATION	VP	VUL	PPL	GPL
CHANGEMENT PNEUS ('/VEH)	120	150	150	480
CHANGEMENT SUSPENSIONS ('/VEH)	330	330	30	30
PLEIN DE CARBURANT ('/100L)	40	25	1.9	1.1

3.2 Coûts véhiculaires

Les coûts véhiculaires affectés par le niveau d'entretien de la route sont relatifs à la consommation de carburant ainsi qu'à la maintenance des pneumatiques et des suspensions.

²⁴⁹ <http://www.bv.transports.gouv.qc.ca/mono/1151295.pdf>

²⁵⁰ Soit deux fois la moyenne du temps maximum garanti pour 2 pneus chez Norauto et feux verts (resp. 1h et 30')

²⁵¹ Le forfait démontage/montage d'un pneu étant 2/3 de celui pour les 2 pneus d'un VP ou VUL selon ce site : http://fntv-services.com/document/Profil_Prestations.pdf on multiplie le temps pour 2 pneus VP par 2/3, on divise par 10/2 pneus, et on retranche 1h correspondant aux économies d'échelle

²⁵² https://conseils.oscaro.com/diagnostic_amortisseur.html

²⁵³ Débit de 150L/min (<https://www.pitpoint.be/fr/faire-le-plein-Ing/>) et paiement et attente de 3'

²⁵⁴ Compromis entre le petit VUL et le gros VUL : [https://www.lacentrale.fr/fiche-technique-voiture-peugeot-expert-ii-\(2\)+fourgon+tole+confort+227+l1h1+2.0+hdi+fap+130-2013.html](https://www.lacentrale.fr/fiche-technique-voiture-peugeot-expert-ii-(2)+fourgon+tole+confort+227+l1h1+2.0+hdi+fap+130-2013.html)

²⁵⁵ <https://fr.answers.yahoo.com/question/index?qid=20130123054541AASek0z>

3.2.1 Modèles existants

Plusieurs modèles reliant coûts aux usagers et état de la route ont été développés depuis les années 60, notamment autour de l'outil HDM dont nous avons déjà parlé aux chapitres 1 et 2.

3.2.1.1 Parangonnage américain récent

Un programme de recherche National Cooperative Highway Research Program (NCHRP n°720, voir montage des projets et imbrication avec les institutions de recherche américaine en Annexe 59) a été mené aux USA par Chatti et Zaabar (Chatti et Zaabar 2012), deux chercheurs de l'Université d'État du Michigan.

L'étude, publiée en 2012 visait à développer un calculateur de coûts d'usage des véhicules liés à l'état de la route. Dans ce cadre, ils ont évalué finement les modèles déjà existants sur la base de leurs caractéristiques générales²⁵⁶ et de leur qualité statistique²⁵⁷ afin de les comparer. L'historique des modèles de la Banque Mondiale et de ceux qui en sont dérivés est également présenté dans leur rapport (p5). Si les modèles purement empiriques comme purement mécanistes ont été jugés de qualité insuffisante, ce sont les modèles mécanistes-empiriques qui se sont avérés les plus adaptés au problème. Chatti et Zaabar ont ensuite calé et éventuellement validé les sous-modèles jugés suffisamment pertinents – par type d'élément qu'ils souhaitaient prendre en compte comme les consommations de carburant et de pneumatiques et l'intensité de l'entretien des véhicules – dans les conditions américaines (flottes de véhicules, chaussées). Dans le cas contraire, ils ont développé leur propre modèle comme c'est le cas pour l'entretien des véhicules. Ils ont ensuite intégré ces sous-modèles à leur calculateur de coûts d'usage des véhicules en fonction de l'état de chaussée.

3.2.1.2 Modèles de consommation en carburant selon état de surface de chaussée

En 2012, il ressort de leur analyse comparative que le sous-modèle de consommation d'HDM-4 dérivé du modèle ARFCOM est le plus adapté quel que soit le contexte d'utilisation, en particulier parce qu'il est le seul à tenir compte de toutes les variables explicatives importantes de la consommation (Annexe 60): force d'opposition au mouvement, forces internes au véhicule, vitesse moteur, accélération. De plus, ce modèle peut considérer l'émergence de nouvelles technologies de véhicules. Calé grâce à des données de terrain, il présente des coefficients de corrélations compris entre 0.82 (petit PL) et 0.90 (VP) selon le type de véhicule. Le calage s'est avéré particulièrement important pour les VP (un véhicule moyen considéré) – le sous-modèle non calé d'HDM-4 sous-estimant de 100% l'impact de l'IRI entre 1 et 6 m/km (+6% avec HDM-4 de base, +12% après calage) – et les SUV (+3% => +9%). La vérification statistique de l'adéquation des modèles aux mesures est très bonne concernant le lien avec l'IRI²⁵⁸ pour tous les véhicules. En revanche le lien à la PMP n'est pas significatif sauf pour les PL à faible vitesse.

Cependant, de manière concomitante à cette étude américaine, le projet de recherche de coopération Europe-USA MIRIAM débuté en 2007 a produit des travaux sur cette même question de la sensibilité de la consommation des véhicules routiers à l'état de surface de la chaussée. Des modèles permettent ainsi de relier un indicateur agrégé de texture (micro- et macro-textures, MPD en anglais), IRI, et consommation, selon la vitesse du véhicule ainsi que des paramètres géométriques de la route tels que sinuosité et profil en long (Hammarström et al. 2012).

Juger lequel de ces 3 sous-modèles de consommation, HDM-4 non calé, HDM-4 calé en conditions américaines ou MIRIAM, est meilleur pour modéliser les consommations françaises est un peu

²⁵⁶ p6 : empiriques ou mécanistes, niveau d'agrégation, paramétrisation des modèles véhiculaire (exploitation, catégories) et de chaussée, ainsi que catégories de coûts prix en compte

²⁵⁷ Fiabilité des données, taille de l'échantillon de base, hypothèses du modèle, formulation techniques d'estimation, corrélation modèle-expérience, erreur, statistique des paramètres - et de leur praticité d'utilisation

²⁵⁸ Néanmoins, Harvey et al. (2015) rappellent que l'IRI n'a pas été développé à l'origine pour capturer les effets de la rugosité de chaussée sur la consommation de carburant, et qu'il est probablement possible que d'autres paramètres soient plus adaptés

hasardeux sans données de terrain. Une première manière pourrait être d'analyser les paramètres du modèle (Annexe 60), ce que nous ferons par la suite.

3.2.1.3 Modèle d'usure pneumatique

Les seuls modèles mécanistes-empiriques sont ceux de la Banque Mondiale : celui d'HDM-3, basé sur le concept d'énergie de glissement (i.e. résistance au roulement), et celui d'HDM-4, plus complet car ajoutant une force de gradient (« force de courbure horizontale ») et une considération de l'interaction au trafic. C'est ce dernier qui a été retenu et que nous adapterons au contexte français dans notre étude.

3.2.1.4 Modèle de maintenance et réparations des véhicules²⁵⁹

Dans leur étude bibliographique, Chatti et Zaabar (2012) n'ont trouvé que des modèles empiriques mis à part le modèle suédois VETO. Parmi ces modèles empiriques – HDM-3, HDM-4, modèle de Saskatchewan, modèle texan du TRDF²⁶⁰ (Zaniewski et al. 1982) et modèle sud-africain – les auteurs en ont jugés deux plus pertinents que les autres dans les conditions américaines (différences de routes, technologies, flottes de véhicules, main d'œuvre et coût des pièces détachées) : le modèle d'HDM-4 et le modèle TRDF.

Dans un premier temps, le modèle d'HDM-4 a été testé sur des données relevées dans les années 2000 fournies par les Départements des Transports du Texas et du Michigan et sur des données reportées dans le rapport NCHRP I-33 (Papagiannakis 2000) : les coûts de R&M ont été tracés selon l'IRI puis comparés aux prévisions d'HDM-4 : il n'y a aucune corrélation entre les IRI et coûts d'une part, et évidemment d'autre part entre nuages de points et prévisions du modèle HDM-4. Ces résultats restent cohérents avec la littérature : la variabilité des coûts de la BDD utilisée est fonction d'IRI inclus dans l'intervalle [1.4 ; 2.4], inférieur à 3 m/km et non représentatif du réseau américain. De plus, les coûts de M&R ne seraient sensibles qu'à des niveaux d'IRI supérieurs à 3 m/km (Bennett et Greenwood 2003; Poelman et Weir 1992). Deux conclusions peuvent être tirées de ce test. D'abord, le modèle HDM-4 semble surestimer complètement les coûts de M&R : celui des pièces, mais encore davantage celui de la main d'œuvre. L'explication des auteurs est que le coût des pièces est différent du fait de l'inflation et de la différence de marchés entre les pays dont étaient issues les données qui ont servi à développer le modèle et les USA. Le temps de travail plus long de la main d'œuvre dans ces pays en voie de développement est également souligné. Secondement, aucune corrélation entre ces coûts et l'IRI n'a été décelée.

Puisque le modèle HDM-4 était inopérant du fait de différences de marchés et que la BDD n'était pas adaptée, Zaabar et Chatti (2012) ont remis à jour macroéconomiquement²⁶¹ les coûts de la dernière étude américaine pertinente, celle du TRDF, pour ensuite recalibrer le modèle d'HDM. Une extraction des seuls dommages dus aux vibrations verticales du véhicule liées à l'IRI a été réalisée dans la base de coûts afin de connaître le coût de base : inspection du bas de caisse, réparation et remplacement des essieux, et remplacement des amortisseurs. Les données macroéconomiques qu'elles contiennent ont

²⁵⁹ Nous nous basons principalement sur le rapport NCHRP 720 de Chatti et Zaabar publié en 2012 et qui contient un certain nombre de coquilles voire d'incohérences apparentes qui ne simplifient pas la compréhension de leur travail : erreurs de n° de figure, omission de certaines hypothèses et détails de calcul du modèle final en particulier. Les coûts totaux de R&M semblent confondus avec ceux uniquement dus à la sollicitation des suspensions (table 5.6), les coûts au kilomètre en utilisation de suspension basés sur les chiffres suggérés par les auteurs dans leur modèle mécaniste-empirique (\$1000 et 160 000 km de longévité) ne confirment pas les coûts avancés dans ce dernier tableau où ils sont 6x plus élevés. Nous délivrons donc notre interprétation de leur travail et notre proposition d'adaptation pour la France, malheureusement en l'absence de confirmation des auteurs, ceux-ci n'ayant jamais répondu à nos demandes de précisions.

²⁶⁰ Ce modèle est une simplification du modèle d'HDM-3, basé sur des études réalisées au Brésil, en Inde, au Kenya et aux Caraïbes

²⁶¹ Application d'un taux d'inflation entre la date d'étude du TRDF (1982) et les dernières données (2007) compris entre

été réactualisées, incluant le coût de la main d'œuvre par véhicule et le coût moyen des pièces d'usure. Les résultats sont accessibles dans les tableaux 5.3 du rapport de Chatti et Zaabar (2012). Le tableau 5.4 présente la sensibilité des coûts de R&M de 9 classes de véhicules déterminées selon le protocole précédent.

Les auteurs ont ensuite développé un modèle alternatif mécaniste-empirique original basé sur une analyse de fatigue (modèle numérique de réponse d'un véhicule aux vibrations dues à l'IRI). Ce modèle calcule le dommage des suspensions. Elles seraient changées aux États-Unis tous les 160 000 km pour les VL et tous les 400 000 km pour les PL (Site internet de Repair Pal²⁶² consulté en 2009 + durée de garantie constructeurs) dans l'état de surface routière actuel (3.7 m/km en moyenne). À partir de 30 profils types retraçant la diversité des IRI aux USA, les auteurs ont calculé les niveaux de dommage des suspensions que l'on peut atteindre par type de véhicule et par vitesse avant de changer les pièces. Les auteurs ont ensuite voulu comparer le modèle d'HDM calé selon les données actualisées du TRDF et le modèle de dommage. Le sur-dommage relatif à l'RI a donc été traduit en coût par rapport au coût moyen de R&M. Les coûts de changement de suspensions ont été pris égaux à 1000 dollars pour les VL, 3000 dollars pour les suspensions pneumatiques des PL et 1500 dollars pour les suspensions mécaniques des PL, incluant main d'œuvre et pièces. Les deux modèles sont, selon les auteurs, très cohérents pour des IRI inférieurs à 5 m/km. Cela nous semble étonnant dans la mesure où, par exemple pour la VP, le coût kilométrique des suspensions en conditions de base serait dans le modèle de dommage égal à 1 000\$/160 000 km soit 6.25×10^{-3} \$/km, contre 1.5×10^{-2} \$/km pour les suspensions et 4×10^{-2} \$/km en coûts de R&M globaux (table 5.6 p50). Pourtant, ces derniers coûts semblent très cohérents avec ceux que l'on peut calculer dans les conditions françaises et que nous développerons dans la partie suivante, consacrée à l'adaptation de modèles au cas français.

3.2.1.5 Synthèse

Nous nous appuyons sur l'étude détaillée de Chatti et Zaabar (2012) pour notre sélection de modèles de consommation de carburant, d'usure pneumatique et de réparation et maintenance des véhicules. Nous sélectionnons, comme eux, les modèles de consommation en carburant et d'usure pneumatique d'HDM-4. Néanmoins, nous allons comparer les sous-modèles de consommation d'HDM-4 aux modèles issus du projet MIRIAM. En ce qui concerne les deux modèles de réparation et maintenance (HDM/TRDF ou simulation de dommage), les résultats sont selon les auteurs sensiblement équivalents jusqu'aux IRI de 5 m/km, puis divergent. Il n'est pas possible de savoir sans données de terrain françaises quel modèle est le mieux. Toutefois, comme nous avons souligné des incohérences possibles dans le modèle de dommage, nous choisirons donc d'adapter le modèle HDM-4/TRDF. Ce choix est basé sur le fait que l'on connaisse des coûts d'entretien et réparation moyens par catégories de véhicules desquels nous pouvons recalculer des surcoûts, méthode qui sera présentée par la suite.

L'utilisation des modèles sélectionnés nécessite donc un certain travail d'adaptation au cas français, que nous allons présenter maintenant.

3.2.2 Sélection et adaptation de modèles

3.2.2.1 Modèle de consommation

Faute de données de terrain et d'une expérimentation pour caler le modèle de consommation d'HDM-4 dans les conditions françaises, la question ici est de savoir s'il est mieux d'utiliser les tendances de sensibilité de la consommation véhiculaire à l'IRI issues du modèle par défaut d'HDM-4 ou du modèle calé dans le Michigan (Chatti et Zaabar 2012), ou encore les modèles de MIRIAM. Ce point est crucial car il va ensuite conditionner une partie non négligeable du bilan financier et environnemental de la fréquence d'entretien. Nous devons donc comprendre d'où viennent les paramètres par défauts du modèle, comment ont été calculés et mesurés ceux de Chatti et Zaabar (2012), et en quoi ils sont

²⁶² <https://repairpal.com/estimator>

adaptés à ou différents de la situation en France. Notons que les résultats du modèle de consommation dépendent à la fois de données d'entrées relatives aux caractéristiques des véhicules (aérodynamisme, masse, moteur, pneumatiques), de la route (pente, état de surface) et du climat. Ce sont donc ces variables auxquelles nous serons sensibles.

A/ Modèle de base d'HDM-4

Selon le rapport de Chatti et Zaabar (2012), les coefficients de base du modèle d'HDM-4 se retrouvent dans le volume 4 de la documentation du logiciel dévolue à l'adaptation des modèles (Bennett et Greenwood 2003). Pourtant, l'achat de la dernière version du logiciel en 2013 ne permet l'accès qu'à la documentation publiée par Bennett et Paterson en 2000. Nous relevons des incohérences entre les dates d'actualisation des paramètres signalées par Chatti et Zaabar d'une part et par Bennett et Greenwood d'autre part. Par exemple, les valeurs des coefficients de raideur des pneumatiques rapportées comme datant de 2003 par les premiers sont référencées comme datant de 1995 par les seconds (référéncée ainsi chez Bennett et Greenwood : « NDLI 1995 »). Nous n'avons pas réussi à trouver le document référencé par les chercheurs américains. Nous allons donc étudier plus finement le modèle de base d'HDM-4.

i/ Paramétrisation et coefficients de calage

Le modèle de consommation en carburant présente des paramètres par défauts relatifs aux véhicules (carcasse (aérodynamisme), moteur, pneumatiques (pression, type), masse..), au climat (température, humidité relative, vent) et à la route (IRI, pente, PMP, type de structure). Il utilise par ailleurs trois coefficients de calage : Kcr2 dans le calcul de facteur de résistance au roulement côté chaussée, KCS dans le calcul de la rigidité des pneumatiques, et KPea dans le calcul de la puissance nécessaire à l'utilisation des auxiliaires.

Paramètres du modèle

En ce qui concerne la route, l'état de surface est un paramètre d'entrées du modèle. Il n'y a donc pas de similarité à chercher, si ce n'est dans la gamme d'IRI testés par Chatti et Zaabar (2012), gamme qui correspond aux IRI que l'on peut également trouver sur les routes en France. Les niveaux de pente sont globalement équivalents entre les deux zones géographiques. Les types de structures testées sont en linéaire à 80% en béton de ciment Portland et seulement à 20% bitumineuses. Les vitesses les plus élevées sont permises sur les tronçons en béton (112 km/h). L'influence de cette caractéristique a été étudiée sur les résultats de consommation : cette variable n'a aucune influence sur les VL mais elle est non négligeable sur les PL (+4% sur chaussée noire) comme déjà évoqué (chapitre 2).

Pour ce qui est des variables climatique, le Michigan présente un climat continental (humide aux étés chauds). Le climat français (métropolitain) est quant à lui tempéré, avec des zones au climat océanique (altéré ou non), d'autres au climat de montagne, une zone de climat méditerranéen, et enfin une zone d'influences continentales sensibles. Les températures, le vent et l'humidité jouant sur le modèle, il serait évidemment préférable de caler le modèle en conditions françaises, néanmoins nous considérerons que les caractéristiques climatiques sont « relativement assez proches ».

Si le parc de véhicules routiers américain peut présenter des différences avec le parc français – nous penserons notamment à la puissance et à la masse des véhicules – l'avantage de l'étude de Zaabar et Chatti est que le modèle de consommation a été calé pour plusieurs types de véhicules. Il faut donc étudier les équivalences des véhicules entre parc américain et parc français.

Cependant, il est plus probable que les coefficients correspondant à une réalité physique des véhicules (régime moteur, consommation, puissance, etc.) calculés ou mesurés par Chatti et Zaabar sur des véhicules plus récents (2005 à 2008) soit plus proches du parc français actuel que ceux rapportés dans la documentation plus ancienne d'HDM-4, qu'elle soit des années 1990 ou 2000. En effet, les véhicules

routiers ont bien changé en l'espace de 10 à 15 ans, ces durées de temps correspondant d'ailleurs au temps de renouvellement des parcs. Les coefficients de Chatti et Zaabar (2012) sont d'ailleurs souvent 2 à 3 fois inférieurs à ceux de Bennett et Greenwood (2003, dans Chatti et Zaabar 2012).

Le modèle de base d'HDM-4 compte 15 catégories de véhicules. Chatti et Zaabar ont utilisés 5 types de véhicules représentatifs du parc américain afin de caler leurs modèles : une voiture moyenne (Mitsubishi Galant 2008), un SUV (Chevrolet Tahoe 2009), un van (Ford E350 2008), un PL léger (GMC W4500 2006), et un PL articulé (International, 9200 6X4, 2005 ; 6 essieux). Ce sont par ailleurs les 5 types de véhicules différenciés dans le modèle par défaut d'HDM-4 (exemple : il n'y a pas de différenciation apportées dans les modèles entre petite, moyenne et grosse voitures : coefficients de calage et caractéristiques par défaut sont identiques).

Par rapport au parc français, nous soulevons plusieurs différences probables.

D'abord, le ratio puissance de friction interne au moteur/puissance des auxiliaires est souvent relatif à la taille du véhicule, et dépend aussi du climat et des comportements de consommation. L'étude de l'ADEME citée au chapitre 1 (Gagnepain 2006) annonçait une surconsommation moyenne des véhicules routiers du fait de la climatisation de 2 à 5% en France. Bien qu'il faille étayer cela par des chiffres, il est probable que l'usage de la climatisation automobile soit plus faible en France qu'aux USA si l'on s'en tient à des observations sur les comportements généraux (la climatisation est responsable de 6% de la consommation d'électricité aux USA²⁶³).

Ensuite, la force de traînée ou résistance aérodynamique s'exprime selon l'Équation 13, avec ρ masse volumique de l'air (en kg/m³), V vitesse du véhicule par rapport à l'air (en m/s), S maître-couple ou surface frontale (en m²), C_x le coefficient de traînée (sans unité).

Équation 13 Formule de calcul d'une force de traînée (ou résistance aérodynamique)

$$F_x = \frac{1}{2} \cdot \rho V^2 \cdot S \cdot C_x.$$

La masse volumique de l'air dépend de la température et l'humidité. On considérera qu'elle est identique au Michigan (lieu de calage du modèle) et en France. Les vitesses des véhicules testées aux USA (56 km/h, 88 km/h et 112 km/h) correspondent aux vitesses pratiquées en agglomération et en routes interurbaines hors autoroutes. Le modèle n'a pas été calé pour des vitesses pratiquées en France sur autoroute par les VL (130 km/h environ). Le maître-couple des VP varie entre 1.5 pour les petites voitures du segment A (exemple : Twingo) et 2.5 pour les grands VP (e.g. Espace) (Leclerc 2008). Aussi, les valeurs des VP américains (1.9m² choisi dans le modèle) sont probablement proches de celles de la France²⁶⁴: une citadine française présente un maître-couple de l'ordre de $S=1.74\text{m}^2$, mais la VP moyenne française est légèrement plus grande, donc son maître-couple l'est probablement aussi (une surface frontale classique pour un SUV trouvée sur internet²⁶⁵ est 2.7m^2). Enfin, les coefficients de traînée des VP ont beaucoup évolué après 1970 (0.45) pour se stabiliser à partir des années 1990 autour de 0.3 (Leclerc 2008). Les PL ont des C_x de l'ordre de 0.6 à 0.9²⁶⁶, chiffres cohérents avec ceux de l'étude américaine. On considérera que les coefficients américains de toutes les catégories de véhicules sont relativement pertinents également pour la France bien que peut-être un peu plus élevés. Un rapide calcul estime pour les VL une surestimation de la résistance aérodynamique français de 30% maximum ($1.74\text{m}^2 \cdot 0.3$ en France Vs $1.9\text{m}^2 \cdot 0.4$ aux USA).

Enfin, la résistance au roulement, dont, dépend les caractéristiques des véhicules selon le modèle d'HDM-4 : masse, pneumatiques (type, diamètre, rigidité, pression), autres facteurs d'ajustement. En

²⁶³ <https://energy.gov/energysaver/air-conditioning>

²⁶⁴

https://fr.wikipedia.org/wiki/A%C3%A9rodynamique_automobile#L.27importance_du_Cx_et_de_la_surface_frontale_sur_la_consommation

²⁶⁵ http://www.wikiwand.com/fr/A%C3%A9rodynamique_automobile

²⁶⁶ <http://www.adilca.com/aerodynamique.pdf>

ce qui concerne la masse des véhicules représentatifs, la voiture moyenne est un peu plus légère en France qu'aux USA. Le gros PLF (44t) présente une masse à vide de 15t proche du gros PLF américain

Coefficients de calage

Parmi les 3 coefficients de calage du modèle, Chatti et Zaabar (2012) n'ont pas calé KCS qui reste égal à 1 quel que soit le véhicule considéré selon les paramètres suggérés par Bennett et Paterson (2000) pour HDM-4. Ils ont par ailleurs adapté la valeur des paramètres par défaut de Bennett et Greenwood (2003) à leurs conditions d'expérimentation dans le Michigan. Ils ont ensuite calculé les coefficients de calage Kcr2 et KPea par itération de manière à réduire la somme des écarts-types.

Ces coefficients de calage viennent corriger le caractère multivarié fini d'un modèle qui ne peut représenter parfaitement une réalité éminemment plus complexe. Sans mesure de terrain, nous ne pouvons être sûrs que les courbes de tendance de la consommation en carburant relativement à l'IRI ainsi calées soient plus proches du cas français que celui du modèle de base proposé par HDM-4. Pour autant, pour une question de cohérence du modèle et du fait de l'argument précédemment avancé sur la meilleure représentativité probable des types de véhicules dans le modèle le plus récent, nous retiendrons les courbes de tendance de Chatti et Zaabar (2012).

Sensibilité à la vitesse

Les caractéristiques des véhicules types et de la route qui ont été utilisés pour calibrer le modèle de consommation d'HDM-4 dans les conditions américaines sont du même ordre de grandeur que celles des véhicules que l'on pourrait considérer comme « types » en France. Toutefois, elles peuvent présenter des variations non négligeables, par exemple des consommations inférieures : -30% d'aérodynamisme, -18% de masse pour la VP moyenne... Cela transparaît d'ailleurs dans les valeurs de consommation moyenne calculées par Chatti et Zaabar (2012) : 7 L/100km à 50 km/h, 8.3 L/100km à 88 km/h, et 11 L/100km à 112 km/h pour une voiture moyenne. Nous comparons par ailleurs ces valeurs aux valeurs de consommation COPERT IV du parc français 2004 (« COPERT 2007 ») (très semblables aux projections futures) et à celles du modèle de base d'HDM-4 sur la Figure 51. À partir de ces simples trois points, les courbes consommation/vitesse des modèles d'HDM-4 (de base et calé) semblent présenter une forme relativement similaire, en V, à celle des courbes COPERT, bien que de valeurs évidemment supérieures. On voit également que le modèle calé par Chatti et Zaabar semble légèrement diverger du modèle COPERT avec l'augmentation de vitesse (à partir de 56 km/h) pour le cas américain, contrairement au modèle de base qui semble converger fortement. Les données des VP montrent que les fortes consommations du VUL représentatif américain viennent amplifier les différences de consommation entre valeurs COPERT et valeurs américaines, tandis que pour le modèle HDM-4 de base, la forme de la courbe est davantage similaire pour le parc que pour la VP.

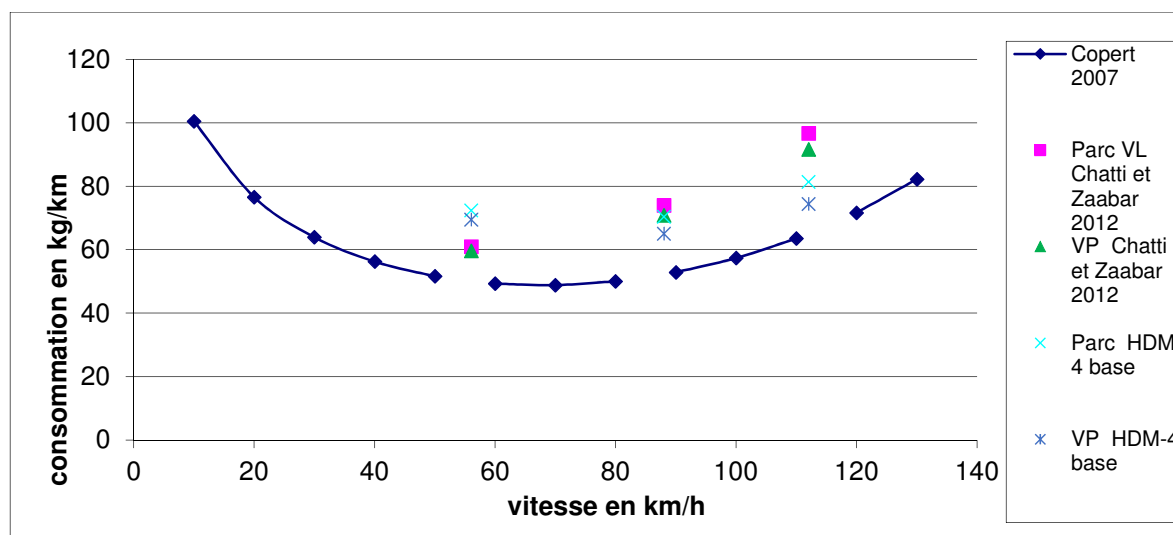


Figure 51 Consommation moyenne parc (77% de VP et 33% de VUL) et VP en fonction de la vitesse : comparaison du modèle Copert et des valeurs du modèle HDM-4 de base ou calé au Michigan (Chatti et Zaabar 2012)

L'enjeu est de sélectionner le modèle qui présente la courbe la plus proche de variation de consommation en fonction de la vitesse sur les plages de vitesses pratiquées sur les routes interurbaines françaises (de 82 à 118 km/h en vitesses moyennes pratiquées par les VL), sans prise en compte de la valeur absolue de consommation. Selon ces critères, nos observations nous confortent dans le choix de retenir les courbes de sensibilité de la consommation des véhicules à l'IRI de l'étude de Chatti et Zaabar (2012). Toutefois, nous gagnerions en exactitude en calant le modèle dans les conditions françaises. Nous n'utiliserons pas directement le logiciel développé sur la base des travaux de Chatti et Zaabar pour plusieurs raisons, liées principalement à l'agrégation de données uniquement monétaires (et non actualisées ni indexées aux inflations), à la limite de plages de vitesses (nos vitesses autoroutières VL sont par exemple trop élevées pour être implémentées dans le logiciel) et d'IRI considérées ($IRI \leq 6$), ainsi qu'aux hypothèses de consommations de base sous-jacentes²⁶⁷. Nous allons exploiter les éléments de leurs modèles disponibles selon les protocoles expliqués ci-après.

B/ Adaptation du modèle HDM-4 calé aux USA aux conditions interurbaines françaises

Sur les cinq catégories de véhicules, nous n'en retiendrons que 4 pour représenter le parc français : les VP, les VUL, les petits PL qui correspondront à la catégorie C1 (=de PTAC entre 3.5 et 7.5t) et les gros PL qui correspondront à la catégorie C pour le transport de marchandise (=PTAC>7.5t) et aux autocars. Nous jugeons que les 4x4 ne sont pas assez représentés dans le parc français pour complexifier notre modèle dans un premier temps.

i/ Vitesses interurbaines

Les conditions de vitesse et les véhicules du parc français sont différents des conditions routières américaines. Nous adaptons donc les modèles américains aux conditions françaises afin d'établir les équations qui nous permettront de calculer la consommation de nos véhicules selon l'IRI.

En France, les limites de vitesses montent à 130 km/h (sur autoroute) mais présentent une variabilité en interurbain : de 70 km/h sur routes nationales ou départementales en zones accidentogènes à 110 km/h sur les voies rapides et routes express, en passant par 90 km/h (80 km/h après le 1^{er} juillet 2018). D'autre part, les vitesses pratiquées ne correspondent pas aux limites de vitesse. Nous avons donc besoin d'être en mesure de calculer une consommation en carburant et son évolution en fonction de l'IRI pour des valeurs de vitesse, sinon continues, a minima discrètes aux vitesses types pratiquées par

²⁶⁷ En revanche l'avantage serait de pouvoir combiner les effets de variations d'IRI et de PTE (+ éventuellement température et type de revêtement – asphalte ou béton) sur les variations de consommations véhiculaires

type de véhicule sur les catégories de routes interurbaines que nous étudions. Le Tableau 29 synthétise les vitesses réelles pratiquées par deux grands types de véhicules – VL et PL lourds (plus de 4 essieux) – selon les campagnes de mesure réalisées en France par l’ONISR.

Tableau 29 Vitesses moyennes pratiquées de jour en France (Source : auteur ; Chiffres : ONISR 2015)

Voie (limite de vitesse VL/PL))	VL	Évolution	Gros PL	Évolution
RA = Autoroutes (130/90)	118	Stable*	88	Stable
Voies Express (110/80)	101	Stable*	84	Stable
RN/RD (90/80)	82	Stable*	79	Stable

Stable*= stabilité relative, baisse générale mais légère hausse récente

Notons que ces vitesses évoluent dans le temps, et peut-être selon la géométrie routière. Ainsi, la SANEF annonçait des vitesses moyennes des VL proches de 130 km/h (entre 127 et 129 km/h) depuis 2012 (SANEF 2017).

Ajoutons que, fautes de données dans l’observatoire annuel de l’ONISR, nous considérons d’une part que les VUL et minibus circulent aux mêmes vitesses moyennes que les VP (l’observatoire utilisant d’ailleurs à la fois la dénomination « véhicule de tourisme » et « véhicules légers » pour les mêmes données), et que les petits PL roulent aux mêmes allures que les gros PL (plus de 4 essieux).

ii/ Loi de sensibilité de la consommation à l’IRI

Pour calculer une consommation en carburant et son évolution en fonction de l’IRI pour des valeurs de vitesse françaises, nous utilisons les données de sensibilité de la consommation de chaque type de véhicule à l’IRI en fonction de la vitesse (Chatti et Zaabar 2012). Une double régression surconsommation-vitesse en conditions américaines, puis surconsommation-IRI en fonction des surconsommations extraites par vitesses types pratiquées en France grâce à la première régression nous permet de déterminer des lois de sensibilité de la consommation de chaque catégorie de véhicules routiers sur chaque catégorie de réseau en fonction de valeurs d’IRI continues. Les courbes de régression des gros PL montrent que plus la vitesse de roulage est élevée, moins la consommation du véhicule va être sensible à l’IRI. Physiquement, cela pourrait s’expliquer par la prépondérance de la résistance aérodynamique à vitesse élevée (Chatti et Zaabar 2012). Nous ne voyons pas apparaître de seuil selon la masse du véhicule. En effet, si les gros PL sont moins sensibles que les autres types de véhicules à l’effet de l’IRI avec l’augmentation de la vitesse dès un IRI de 2, la vitesse n’a en revanche pas d’impact pour la sensibilité à l’IRI potentiellement au-dessous d’un IRI de 3 pour les VP (effet à IRI = 2 mais pas d’effet à IRI = 3 sur le test américain), au-dessous d’un IRI entre 4 et 5 pour les VUL, et au-dessous d’un IRI entre 3 et 4 pour les petits PL.

À titre de comparaison, les paramètres de surconsommation définis ainsi pour le parc français divergent de 2 à 70% en valeur absolue des facteurs de surconsommation de Chatti et Zaabar pour le parc américain sur les lois comparables en vitesses et catégories de véhicule. Zhang et al. (2013) proposent une loi de surconsommation en carburant grossièrement calculée à partir des mesures extrêmes (min/max) faites lors du projet WesTrack sur des PL (Epps 1999). La loi trouvée est celle de l’Équation 14.

Équation 14 Lien entre surconsommation en carburant SC et valeur d’IRI (Epps 1999)

$$SC = 0.0397.IRI + 0.9524$$

La vitesse autorisée pour les camions aux USA étant de 55mph, soit environ 80 km/h, cela correspond aux conditions des PL français sur RN/RD. Le coefficient attribué à l’IRI dans cette loi (0.0397) est environ deux fois plus important que celui que l’on a calculé dans le cas français.

C/ Comparaison du modèle d’HDM-4 français au modèle MIRIAM

Le modèle d'HDM-4 pour la consommation de carburant étant le plus divergeant pour la catégorie des VP après calage en conditions américaines, d'autant plus aux faibles vitesses, nous proposons une comparaison des modèles HDM-4 de base, HDM-4 calé aux USA et adaptée aux conditions françaises, et de MIRIAM pour cette catégorie de véhicules sur RN/RD.

i/ Modèle MIRIAM

La loi de calcul de facteur de consommation des VP développée dans le projet MIRIAM, dérivée du modèle théorique VETO, et calée sur données du projet, est indiquée dans l'Équation 15.

Équation 15 Formule de calcul de facteur de consommation d'un VP en fonction de paramètres routiers et de sa vitesse (Hammarström et al. 2012)

$$FC = 0.286 \cdot (1.209 + 0.000481 \cdot IRI \times v + 0.394 \cdot MPD + 0.000667 \cdot v^2 + 0.0000807 \cdot ADC \times v^2 - 0.00611 \cdot RF + 0.000297 \cdot RF^2)^{1.163} \times v^{0.056}$$

Avec ADC le degré de courbe moyen (soit la sinuosité en radian/km), RF le gradient routier moyen (soit le profil en long m/km), MPD un indicateur de micro- et macro-textures agrégé (en mm), et v la vitesse. Cela correspond aux valeurs des variables des tables de facteurs de surconsommation de Chatti et Zaabar utilisé (MPD= 1mm et RF = 0%). Par défaut les choix de valeurs des paramètres du modèle MIRIAM sont les suivants : MPD = 1mm, ADC = 0rad/km, RF = 0m/km.

ii/ Comparaison graphique

La comparaison des facteurs de surconsommation calculés avec le modèle MIRIAM et le modèle d'HDM-4 calé en contexte américain et adapté aux conditions françaises est présentée en Figure 52. À titre de comparaison, nous faisons également apparaître les facteurs de surconsommation du modèle d'HDM-4 non calé, mais pour des vitesses de 88 km/h au lieu des 82 km/h observés pour les VP sur les RN/RD.

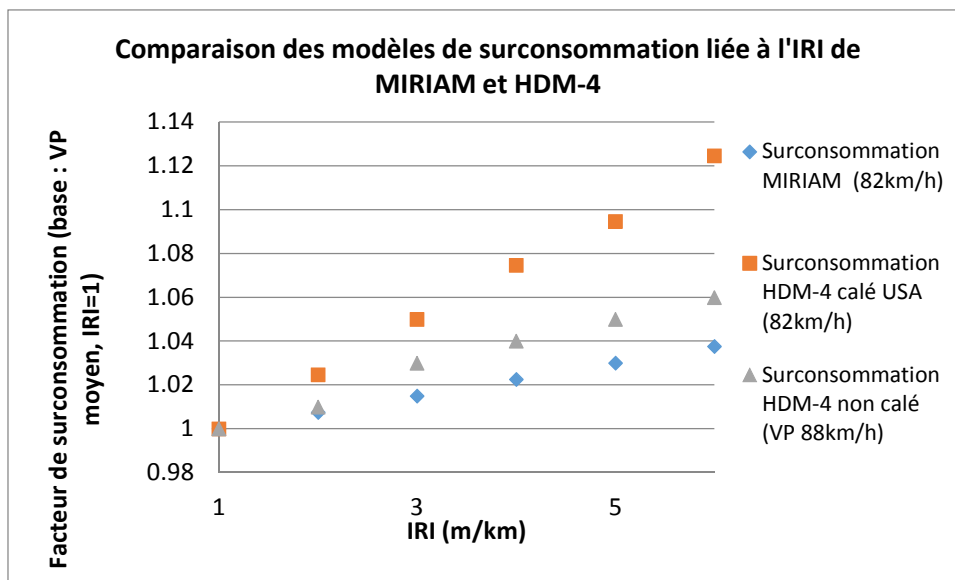


Figure 52 Comparaison des modèles de surconsommation VP liée à l'IRI de MIRIAM et HDM-4

La Figure 52 montre que le modèle MIRIAM est 3 fois moins sensible à l'IRI que le modèle HDM-4 calé en conditions américaines et adapté à la France pour le VP sur RN/RD à IRI = 6 m/km. En jouant sur les paramètres dans notre feuille Excel®, on constate que le modèle est d'autant plus sensible à l'IRI que les valeurs des paramètres MPD, ADC et RF sont faibles. On remarque dans le rapport de Chatti et Zaabar (p24) le même ordre de grandeur de sensibilité à l'IRI entre les modèles HDM-4 calé et de base : quelle que soit la vitesse, le modèle calé est au moins deux fois plus sensible à l'IRI que le modèle non

calé à IRI=6 m/km, le modèle MIRIAM étant encore moins sensible à l'IRI que le modèle d'HDM-4 non calé (attention, le modèle non calé est comparé à vitesse différente (conditions américaines) de celle pour les modèles MIRIAM et HDM-4 calé, néanmoins la sensibilité à l'IRI des VP semble quasiment indépendante de la vitesse avec les modèles d'HDM-4).

Nous ne nous sommes intéressés qu'aux facteurs de surconsommation de Chatti et Zaabar (2012) selon un ensemble de conditions défini (MPD= 1mm et RF = 0%, T = 17°C). Or, ces auteurs ont trouvé que la PMP n'affecte pas la consommation des véhicules en dehors de celle des gros PL (+1mm entraîne +1,5% de consommation à 88 km/h et 2% à 56 km/h). Nous avons donc décidé de comparer les modèles de consommation pour les gros PL. Nous obtenons la Figure 53 (MPD = 1mm). Les modèles se situent de la même manière dans leurs estimations par comparaison des uns aux autres. Notons que si l'on joue sur la valeur de la MPD, cela ne change pas notablement les estimations, comme si l'influence de l'IRI était prépondérante sur les surconsommations estimées avec le modèle de MIRIAM.

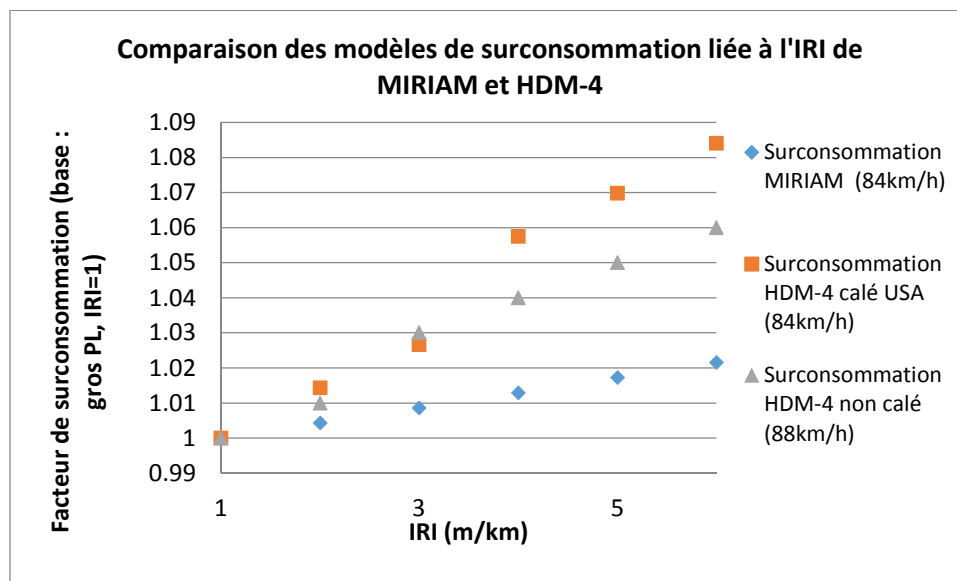


Figure 53 Comparaison des modèles de surconsommation des gros PL liée à l'IRI de MIRIAM et HDM-4

iii/ Choix d'un modèle de surconsommation

Il ne nous est pas possible de trancher quant à la meilleure fiabilité des modèles étudiés. En effet, sans données de consommation réelles géolocalisées en France que nous pourrions croiser avec des estimations de niveaux d'IRI, aucun calcul approximatif ne nous permet de connaître le niveau de sensibilité des véhicules français à l'IRI, et ainsi de choisir en tout état de cause le modèle le plus cohérent. Le modèle VETO repris dans l'étude MIRIAM a été développé sur la base du modèle HDM-3 (datant de 1987) en Suède en 1991 (Hammarström et Karlsson 1991). Le modèle d'HDM-4 a été développé plus récemment, entre 1994 et 2000, sur la base du modèle australien ARFCOM qui serait le plus complet en termes de modélisation paramétrique puisqu'à la différence du modèle d'HDM-3 il tiendrait compte des forces internes au véhicule et qu'il serait « transférable », deux caractéristiques nécessaires à la prise en compte des évolutions technologiques des véhicules (Chatti et Zaabar 2012).

Modèle de surconsommation

Compte tenu des moyens associés au calage du modèle d'HDM-4 aux USA (tests durant 1 an sur une piste d'essai avec 4 catégories de véhicules instrumentés) et au climat continental du lieu de mesure, comparés au projet MIRIAM (mesures en Suède, peu d'informations trouvées dans Hammarström et al 2012), nous choisissons de retenir le modèle d'HDM-4 calé aux USA et que nous avons adapté aux conditions françaises pour des vitesses observées moyennes sur 3 types de réseaux (RA, RE, RN/RD).

D/ Projection de parcs véhiculaires français et modèle de consommation et d'émission

i/ Base de données de consommation et émissions au cours du temps

Nous avons présenté les principaux modèles de consommation et de parc routier français dans le chapitre 1. Nous utilisons le logiciel CopCete pour sa prise en compte du contexte français (parc) ainsi que pour sa meilleure actualisation de COPERT (bien qu'une version V existe maintenant). Il considère 26 substances émises : monoxyde et dioxyde de carbone, oxydes d'azotes, composés organiques volatiles (COV), benzène, particules fines (PM), dioxyde de soufre, plomb, cadmium, méthane, COV non méthanique, protoxyde d'azote, ammoniac, hydrocarbure aromatique polycyclique, cuivre, chrome, nickel, sélénium, zinc, baryum, arsenic, acroléine, formaldéhyde, butadiène, acétaldéhyde, et benzo(a)pyrene. Nous négligeons la pénétration des véhicules GPL dans le parc, ce qui selon nos simulations avec CopCete implique une erreur inférieure à 1% sur les consommations et émissions moyennes. Nous tenons en revanche compte de la pénétration des véhicules hybrides essence et diesel, avec une répartition 2/3 essence et 1/3 diesel stable au cours du temps selon les prévisions du parc IFSTTAR 2013. On peut considérer que les moyennes de consommation française et d'émissions par type de route et de véhicule ainsi obtenues correspondent à un IRI moyen français par type de réseau.

ii/ Lien surconsommation et surémissions

S'il nous est maintenant possible de calculer une surconsommation relative à une détérioration de l'état de surface routière, rien n'indique que ces lois soient applicables pour calculer des surémissions, puisque cela signifierait une linéarité entre consommation et toutes les émissions. Si Simons (2016) classe les émissions en 3 groupes, l'un présentant une linéarité – pour le CO₂, le SO₂, les métaux lourds, le N₂O, l'ammoniac et les HAP – et les deux autres non (CO, NO_x, PM, CH₄, COVNM), l'étude des émissions de deux VP moyens du parc français en 2017, l'un fonctionnant au diesel et l'autre à l'essence, selon le réseau (RD/RN, RE, RA) ne semble pas corroborer ce fait. On montre en effet en Annexe 61 le ratio de la quantité de chaque type d'émission sur la quantité de carburant consommé, normalisé par rapport au ratio sur RD/RN. Ainsi, si pour un type d'émission les 3 barres de l'histogramme de l'Annexe 61 valent 1, cela signifie que la linéarité de l'émission à la consommation est parfaite. Plus le ratio s'élève avec la célérité (plus forte sur RE que sur RD/RN, encore plus forte sur RA), plus l'émission est croissante de la vitesse (c'est le cas des NO_x), et vice versa (c'est le cas des PM). Ainsi, non seulement les groupes de linéarité d'émissions proposés par Simons ne correspondent pas à ce que l'on peut calculer selon COPERT IV V11.4, mais en plus les liens entre consommation et émissions semblent dépendre du type de carburant utiliser, puisque l'on peut constater des monotonies croissantes pour le diésel et décroissantes pour l'essence sur une même émission, par exemple sur CO, voire une non monotonie à la vitesse comme pour les émissions de CH₄ des VP diesel. Ainsi, le lien entre consommation et émissions des véhicules routiers est plus complexe que ce annoncé par Simons. Toutefois, les non-linéarités qui apparaissent peuvent être le fait de la dépendance des émissions à la température moteur par exemple (cas des NO_x), qui augmente avec la vitesse.

Ainsi, si l'on considère que la vitesse de roulage ne dépend pas de la modification de l'état de surface de chaussée, on pourrait faire l'hypothèse d'une linéarité de toutes les émissions à la consommation à réseau et véhicule donné. C'est l'hypothèse que nous retiendrons, à défaut d'un modèle de simulation d'émissions plus fin. Les consommations et émissions de nos différents véhicules – VP, VUL, PL – seront calculés avec le logiciel CopCete paramétré pour correspondre à nos réseaux types. L'évolution des parcs retenue sera celle de l'IFSTTAR, version mars 2013. Notons que toutes les vitesses moyennes constatées sur nos réseaux ont pu être respectées dans le paramétrage à l'exception des PL sur RA, que nous considérerons rouler en moyenne à 86 km/h au lieu de 88 km/h.

3.2.2.2 Modèle de maintenance

Ce modèle inclut l'usure des pneumatiques ainsi que les autres besoins en Réparations et Maintenance (R&M) dans deux modèles distincts. Cependant, la R&M inclut de nombreuses opérations qui ne dépendent pas de l'état des routes, à la différence de l'entretien des suspensions : visites régulières, vidanges, remplacement des plaquettes de frein, du filtre à air, à huile, des bougies, des balais d'essuie-glace, des ampoules, de la batterie, de la courroie de distribution, du silencieux d'échappement voire de l'embrayage, ou entretien de la climatisation.

E/ Coûts de maintenance des véhicules routiers en France

Nous avons besoin dans nos modèles d'une connaissance fine des coûts kilométriques de maintenance des catégories de véhicules routiers que nous considérons, avec une séparation entre coût pneumatique et coût d'entretien et réparation autres. Nous avons repris les coûts présentés au chapitre 2, que nous avons moyennés pour obtenir une catégorie « gros PL » entre longue distance et régional. La catégorie « régional porteur » du CNR a été quant à elle assimilée à la catégorie « petit PL » de notre méthode. Dans la catégorie VP, les données de l'INSEE ne nous permettaient pas de différencier les coûts pneumatiques des coûts du reste de l'entretien. Nous ventilons à 25% sur le 1^{er} poste et à 75% sur le second, selon le prorata retrouvé pour les VP professionnels (OVE 2017). Nous obtenons les chiffres présentés dans le Tableau 30.

Tableau 30 Coûts d'utilisation des véhicules par catégorie et par poste

Caractéristiques	VP	VUL	Petit PL	Gros PL
Coût carburant (€/km)	0.080	0.046	0.23	0.210
Coût pneumatique (€/km)	0.018	0.009	0.024	0.020
Coût R&M hors pneus (€/km)	0.054	0.028	0.095	0.065
Coût total (€/km)	0.267	0.254	0.334	0.421

F/ Modèle de consommation en pneumatiques

i/ Usure pneumatique

Dans le but de calculer des facteurs d'ajustement d'usure de gomme selon la vitesse par type de véhicule et de réseau, nous nous basons sur le modèle d'HDM-4 calé par Chatti et Zaabar, que nous adaptons selon la même procédure que celle réalisée pour calculer nos lois de surconsommation, les facteurs d'ajustement calculés dépendant des vitesses de roulage des véhicules, et nos vitesses moyennes sur routes interurbaines étant différentes de celles pratiquées aux USA. Notons que nous ne considérons en revanche pas de taux d'usure différents entre pneus américains et pneus français, après discussion avec des experts de chez Michelin.

Pour chaque véhicule : après avoir déterminé par régressions la sensibilité de consommation de pneumatiques à la vitesse à IRI constant (de 1 à 6), on calcule les facteurs d'ajustement de consommation de gomme selon l'IRI aux vitesses moyennes de chacun de nos types de réseaux interurbains français, avec comme base comparative l'usure à IRI=1 m/km. On obtient le nouveau Tableau 31 de facteurs d'ajustements.

Tableau 31 Facteurs d'ajustements de la consommation en pneumatique

	Réseau/IRI	1	2	3	4	5	6
VP	RA	1.00	1.01	1.04	1.05	1.06	1.08
	RE	1.00	1.01	1.03	1.04	1.05	1.07
	RN/RD	1.00	1.01	1.02	1.03	1.04	1.05
VUL	RA	1.00	1.01	1.02	1.04	1.05	1.05
	RE	1.00	1.01	1.02	1.03	1.04	1.04
	RN/RD	1.00	1.01	1.02	1.02	1.03	1.03
Petit PL	RA	1.00	1.01	1.02	1.04	1.05	1.06
	RE	1.00	1.01	1.02	1.04	1.05	1.06
	RN/RD	1.00	1.01	1.02	1.04	1.05	1.06
Gros PL	RA	1.00	1.01	1.02	1.03	1.04	1.04
	RE	1.00	1.01	1.02	1.03	1.04	1.04
	RN/RD	1.00	1.01	1.02	1.03	1.03	1.04

À partir de ces facteurs, on trace les régressions par type de réseau et de catégorie de véhicule afin de connaître la surconsommation selon l'IRI. On obtient les lois de surconsommation de pneumatiques du Tableau 32.

Tableau 32 lois de surconsommation de pneumatiques (SP) dans notre modèle français

Réseau	Véhicule	Fonction $SP=f(IRI)$	R ²
Autoroutes (118/88)	VP	$SP = 0.0168 IRI + 0.9812$	0.9854
	VUL/minibus	$SP = 0.0102 IRI + 0.9927$	0.9687
	Petit PL	$SP = 0.0122 IRI + 0.9866$	0.9907
	Gros PL	$SP = 0.0089 IRI + 0.9917$	0.9983
Express (101/84)	VP	$SP = 0.0136 IRI + 0.9856$	0.9884
	VUL/minibus	$SP = 0.0088 IRI + 0.9929$	0.9776
	Petit PL	$SP = 0.0012 IRI + 0.987$	0.9921
	Gros PL	$SP = 0.0085 IRI + 0.9923$	0.9972
RN/RD (82/79)	VP	$SP = 0.0100 IRI + 0.9905$	0.9865
	VUL/minibus	$SP = 0.0073 IRI + 0.9931$	0.9839
	Petit PL	$SP = 0.0117 IRI + 0.9874$	0.9938
	Gros PL	$SP = 0.008 IRI + 0.9931$	0.9949

ii/ Modèle d'usure physique

Ces fonctions de sur-usure de pneumatiques sont à appliquer aux taux d'usure de base des pneumatiques considérés à IRI=1. Nous devons donc maintenant calculer ces taux d'usure. Pour cela, on étudie la relation entre taux d'usure pneumatique et vitesse déterminée aux USA par Chatti et Zaabar, en considérant que les lois d'usure sont les mêmes aux USA et en France. On utilise les corrélations déterminées sur la Figure 54 afin de calculer les taux d'usure aux vitesses moyennes pratiquées sur nos réseaux français interurbains.

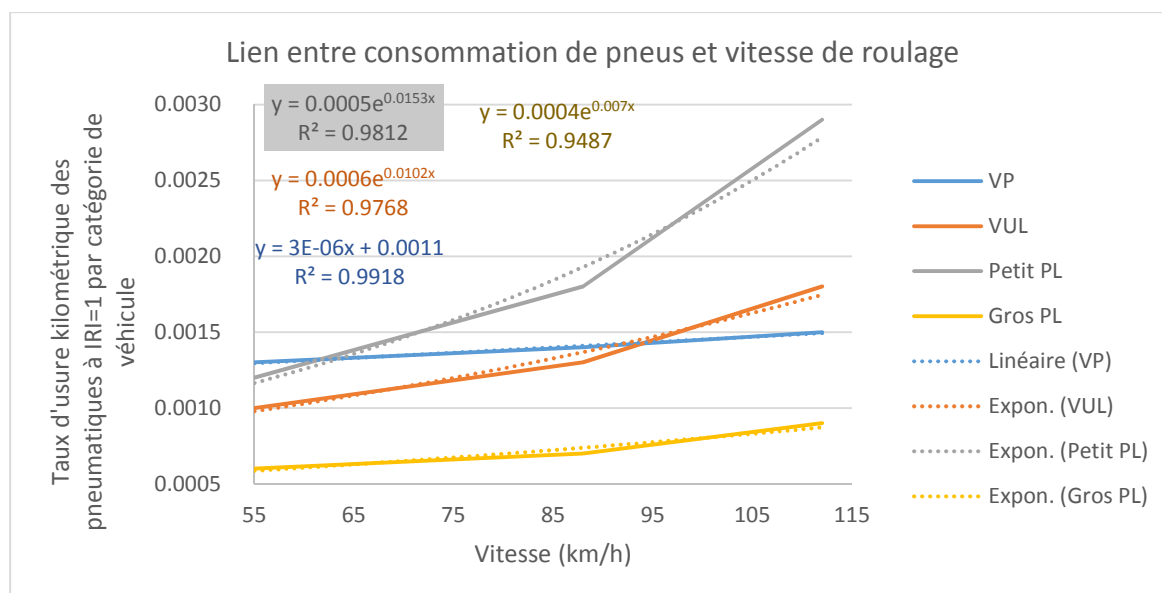


Figure 54 Étude des corrélations entre taux d'usure pneumatique et vitesse déterminée aux USA par C&Z

En inversant ce taux d'usure et en convertissant du pourcent à la pièce pneumatique, on calcule les Durées de Vie Typiques (DVT) des pneumatiques du Tableau 33.

Tableau 33 DVT des pneumatiques selon les lois d'usure calculées

DVT PNEUS USA (C&Z 2013)	AUTOROUTE	ROUTE EXPRESS	RN/RD
VP	67 685	70 623	74 059
VUL	50 019	59 489	72 211
PETIT PL	52 035	55 319	59 717
GROS PL	135 025	138 859	143 805

Ces DVT ne correspondent pas aux chiffres que l'on peut trouver dans la littérature ou auprès des experts. Nous décidons donc de recalculer des taux d'usure qui correspondent davantage aux conditions de roulage et aux pneumatiques en France. Pour recalculer des baselines cohérentes pour le contexte français, nous considérons que les conditions françaises moyennes de transport routier sont à IRI=3 et au roulage en RN/RD (majeure partie du kilométrage français). On considère que les DVT sont de 50 000 km pour les VL et 200 000 km pour les PL. On calcule ensuite les taux d'usure correspondant sur les différents réseaux à IRI=3 m/km (=inverse de la DVT), que l'on corrige des facteurs d'ajustements à l'IRI pour obtenir les taux à IRI=1 m/km selon un produit en croix avec les données américaines. On obtient les taux du Tableau 34, auxquels correspondent les DVT du Tableau 35.

Tableau 34 Correctif des taux d'usure kilométrique

CORRECTIF TAUX D'USURE FRANCAIS A IRI = 1 M/KM	AUTOROUTE	ROUTE EXPRESS	RN/RD
VP	2.11E-05	2.04E-05	1.96E-05
VUL	2.82E-05	2.38E-05	1.97E-05
PETIT PL	5.63E-06	5.29E-06	4.90E-06
GROS PL	5.23E-06	5.09E-06	4.92E-06

Tableau 35 Nouvelles durées de vie typiques des pneumatiques calculées

DVT A IRI=1M/KM EN FRANCE	AUTOROUTE	ROUTE EXPRESS	RN/RD
VP	47383	49116	51125
VUL	35413	41978	50765
PETIT PL	177757	188976	204000
GROS PL	191244	196520	203320

On n'a plus qu'à appliquer les lois de sur-usure pneumatique aux taux d'usure moyens ci-dessus.

Nota Bene : nous pourrions utiliser ces lois pour calculer la variation des émissions d'abrasion de pneumatiques avec l'IRI en même temps que l'intensité d'usure. Ces abrasions sont composées de plomb, de cadmium, de baryum, de nickel, de PM10, de fluoranthène, et de benzo(a)pyrene (ANSES 2004). Cependant, nous avons choisi de les comptabiliser dans notre base d'émissions calculées avec CopCete, et de considérer leur variation selon la variation de consommation en carburant. Si pour les VUL, la sensibilité à l'IRI des modèles de surconsommation et de sur-usure en pneumatiques est la même, ce n'est en revanche pas le cas pour les VP pour lesquels la sensibilité de la consommation en carburant à l'IRI est deux fois plus forte que celle d'usure des pneumatiques à l'IRI. Ce point pourrait être amélioré dans notre modèle, quitte à ne considérer que les émissions à l'échappement dans notre base d'émissions, et à construire un modèle à part pour les émissions hors échappement sensibles à l'IRI, soit seulement celles liées aux pneumatiques. Le rapport de l'ANSES et ses références contiennent les hypothèses pour construire ce modèle amélioré.

iii/ Modèle de coût

On connaît à la fois la longévité kilométrique de nos types de pneumatiques, les coûts moyens en pneumatiques par kilomètre à différentes années que l'on rappelle dans le Tableau 36, coûts que l'on corrige de l'inflation pour obtenir les coûts 2017 présentés dans le Tableau 37. Pour cela, les coûts kilométriques de véhicules que nous avons calculés correspondant à l'année 2013 (VP), 2016 (VUL) ou 2017 (PL), on utilise les séries de l'INSEE d'indice de prix à la consommation en entretien des véhicules pour calculer les coûts kilométriques en 2017 et après. Une régression linéaire montre que la progression est totalement linéaire, avec une augmentation de l'indice d'environ 0.5 par mois (indice 100 en 1998), soit 0.5% par mois (voir Annexe 62). On considère que cette inflation de 6% par an concerne à la fois les véhicules professionnels et personnels.

On obtient les coûts du tableau suivant. Ces coûts, associés aux DVT sélectionnées, donnent les prix d'entretien à la roue également indiqués dans le tableau, en considérant 4 roues pour tous les véhicules hormis le gros PL considérés comme ayant en moyenne 10 roues. Ces coûts paraissent globalement élevés pour toutes les catégories de véhicules à l'exception du VUL pour lesquels ils semblent bas, lorsque l'on considère les prix pièce des pneumatiques entre 50 et 150€ pour les VP²⁶⁸, entre 50 et 100€ pour les VUL²⁶⁹, et entre 250 et 600€ pour les PL quelle que soit leur taille²⁷⁰. Néanmoins, les coûts pneumatiques kilométriques ne correspondent pas qu'au coût des pneus de rechange, mais aussi à la main d'œuvre de dépose et montage, ainsi qu'aux autres opérations relatives à l'entretien des pneumatiques : contrôle de la géométrie des trains roulants avant et arrière, réglage du parallélisme, montage et équilibrage des pneumatiques, permutations éventuelles pneus été/hiver,

²⁶⁸

<https://www.allopneus.com/find?activite=1&marque=&d1=205&d2=55&d3=17&d4=&d5=&variante=&saison=e>

²⁶⁹

<https://www.allopneus.com/find?activite=1&type=5&marque=&d1=205&d2=R&d3=14&d4=&d5=&variante=&saison=e>

²⁷⁰ <https://www.allopneus.com/Profil-7818-x-line-energy-d.html>

gonflage à l'azote, permutation des roues avant et arrière sur les véhicules de tourisme, etc. Selon les tarifs en ligne, le coût de montage de pneumatiques est autour de 18€/pneu en France quel que soit le type de véhicule (chez Feu Vert pour les VL par exemple, mais aussi pour les PL²⁷¹).

Tableau 36 Coûts moyens en pneumatiques par kilomètre à différentes années (euros courants)

CARACTERISTIQUES	VP	VUL	PETIT PL	GROS PL
COUTS PNEUS (€2013/KM)	1.80E-02	8.94E-03	2.40E-02	3.00E-02
COUTS PNEUS (€2017/KM)	1.84E-02	8.99E-03	2.40E-02	3.00E-02
DVT PNEUMATIQUE (KM)	50000	50000	200000	200000
COUT JEU DE PNEUS (€/VEH)	919	449	4800	6000
COUT UNITAIRE (€/ROUE)	229.78148	112.3544274	1200	600

Finalement, les coûts VP, VUL et gros PL sont relativement plausibles : les choix d'entretien des VUL étant réalisés de manière plus professionnelle, il est logique qu'ils soient mieux minimisés que ceux des VP, appartenant plutôt à des particuliers. En revanche, les automobilistes sont principalement des particuliers moins à même de faire les bons choix en termes d'entretien pneumatique. Les coûts petit PL sont très élevés, peut-être représentatifs de conditions de roulage détériorées (on peut faire l'hypothèse que ceux-ci réalisent des déplacements de plus courtes distances que les gros PL, donc sur des réseaux en majorité secondaire, en moyenne en moins bon état que ceux empruntés par les gros PL qui circulent principalement sur réseau structurant mieux entretenu). Dans tous les cas, les coûts des pneus pièces étant les mêmes que ceux des gros PL, nous adopterons les coûts kilométriques à la roue de base des gros PL pour les petits PL également. Nous obtenons les coûts kilométriques de base finaux suivants.

Tableau 37 Coûts moyens en pneumatiques par kilomètre en euros 2017

CARACTERISTIQUES	VP	VUL	PETIT PL	GROS PL
COUT PNEUS (€2017/V.KM)	1.84E-02	8.99E-03	1.20E-02	3.00E-02

En considérant ces coûts pour un IRI=3 m/km et un réseau national/département, en appliquant les correctifs entre réseaux et selon l'IRI, on calcule les coûts du Tableau 38.

Tableau 38 Coût kilométrique 2017 en entretien de pneumatiques – France (€/km)

	IRI	1	2	3	4	5	6
Autoroutes (118/88)	VP	1.94E-02	1.96E-02	2.01E-02	2.03E-02	2.06E-02	2.10E-02
	VUL	1.27E-02	1.29E-02	1.30E-02	1.32E-02	1.33E-02	1.33E-02
	Petit PL	1.35E-02	1.36E-02	1.38E-02	1.40E-02	1.42E-02	1.43E-02
	Gros PL	3.14E-02	3.17E-02	3.20E-02	3.23E-02	3.25E-02	3.28E-02
Express (101/84)	VP	1.87E-02	1.89E-02	1.93E-02	1.95E-02	1.97E-02	2.00E-02
	VUL	1.07E-02	1.08E-02	1.09E-02	1.10E-02	1.11E-02	1.12E-02
	Petit PL	1.27E-02	1.28E-02	1.30E-02	1.32E-02	1.33E-02	1.34E-02
	Gros PL	3.05E-02	3.08E-02	3.11E-02	3.14E-02	3.16E-02	3.18E-02
RN/RD (82/79)	VP	1.80E-02	1.82E-02	1.84E-02	1.86E-02	1.86E-02	1.89E-02
	VUL	8.85E-03	8.92E-03	8.99E-03	9.05E-03	9.14E-03	9.16E-03
	Petit PL	1.18E-02	1.19E-02	1.20E-02	1.22E-02	1.23E-02	1.24E-02
	Gros PL	2.95E-02	2.98E-02	3.00E-02	3.03E-02	3.05E-02	3.07E-02

²⁷¹ http://fntv-services.com/document/Profil_Prestations.pdf

On en déduit les corrélations linéaires du coût pneumatique kilométrique en fonction de l'IRI (Tableau 39). Ces lois de coûts sont en Euros2017, pour des valeurs d'IRI continues.

Tableau 39 Modèle de coût pneumatique kilométrique en euros 2017 en fonction de l'IRI en France

		Fonction COUT_pneu=CP=f(IRI)	R ²
Autoroutes (118/88)	VP	CP = 0.0003 IRI + 0.019	0.9854
	VUL/minibus	CP = 0.0001 IRI + 0.0126	0.9687
	Petit PL	CP = 0.0002 IRI + 0.0133	0.9907
	Gros PL	CP = 0.0003 IRI + 0.0311	0.9983
Express (101/84)	VP	CP = 0.0003 IRI + 0.0184	0.9884
	VUL/minibus	CP = 0.00009 IRI + 0.0106	0.9776
	Petit PL	CP = 0.0002 IRI + 0.0125	0.9921
	Gros PL	CP = 0.0003 IRI + 0.303	0.9972
RN/RD (82/79)	VP	CP = 0.0002 IRI + 0.0178	0.9865
	VUL/minibus	CP = 0.00006 IRI + 0.0088	0.9839
	Petit PL	CP = 0.0001 IRI + 0.0116	0.9938
	Gros PL	CP = 0.0002 IRI + 0.0293	0.9949

On pourrait se poser la question d'actualiser ou pas ces coûts. Compte tenu du taux extrêmement bas du placement préféré des ménages français, le livret A, maintenu à 0.75% entre le 1^{er} août 2015 et 2017²⁷², nous n'en considérerons pas.

G/ Modèles physique et économique de réparation et maintenance

La R&M inclut toutes les opérations d'entretien relatives aux véhicules hors entretien des pneumatiques. L'objectif du travail présenté ci-après est de développer deux modèles : un modèle de sur-usure du véhicule en fonction de l'IRI, ce modèle correspondant à la sur-usure de la suspension, que nous simplifierons par un modèle de sur-usure d'amortisseurs ; un modèle de surcoût en R&M selon l'IRI, correspondant aux coûts d'opérations plus larges que le remplacement des amortisseurs, telles que l'entretien de la suspension complète.

i/ Loi de surcoût en fonction de l'IRI : exploitation du modèle de Chatti et Zaabar (2012)

L'objectif est d'obtenir des lois de calcul des facteurs d'ajustement de coût/usure selon des valeurs d'IRI continues. Nous avons vu que, selon les tests de Chatti et Zaabar (2012), le modèle d'HDM-4 ne fonctionne pas sans calage. Nous choisissons donc d'utiliser le modèle de surcoûts pour des IRI entre 3 et 6 m/km développé par ces derniers en se basant sur HDM-4 et l'étude TRDF avec coûts actualisés. Les lois de surcoûts en R&M selon l'IRI par type de véhicules ne dépendent pas des vitesses donc pour les obtenir il nous suffit de tracer les facteurs de surcoût par type de véhicule (Tableau 40) en fonction de l'IRI et de tester des régressions. Nous obtenons les lois indiquées sur la Figure 55. Elles permettent de calculer la sur-usure sans utiliser l'outil développé par Chatti et Zaabar (2012) pour des IRI supérieurs à 3. Néanmoins, elle implique une erreur. À titre d'exemple, pour la catégorie VL, cette erreur est de 3.6% à IRI = 4 m/km, 1.9% à IRI = 5 m/km, et de 0.16% à IRI = 1.7 m/km. Inférieures à 5%, ces erreurs nous semblent acceptables.

²⁷² <https://billetdebanque.panorabanques.com/epargne/livret/historique-des-taux-du-livret-a/>

Tableau 40 Facteurs de surcoût par type de véhicule en fonction de l'IRI (Chatti et Zaabar 2012)

IRI	1	2	3	4	5	6
VP	1	1	1	1.1	1.4	1.7
VUL	1	1	1	1.1	1.4	1.7
4x4	1	1	1	1.2	1.7	2.3
Petit PL	1	1	1	1.2	1.7	2.2
Gros PL	1	1	1	1.1	1.5	1.8

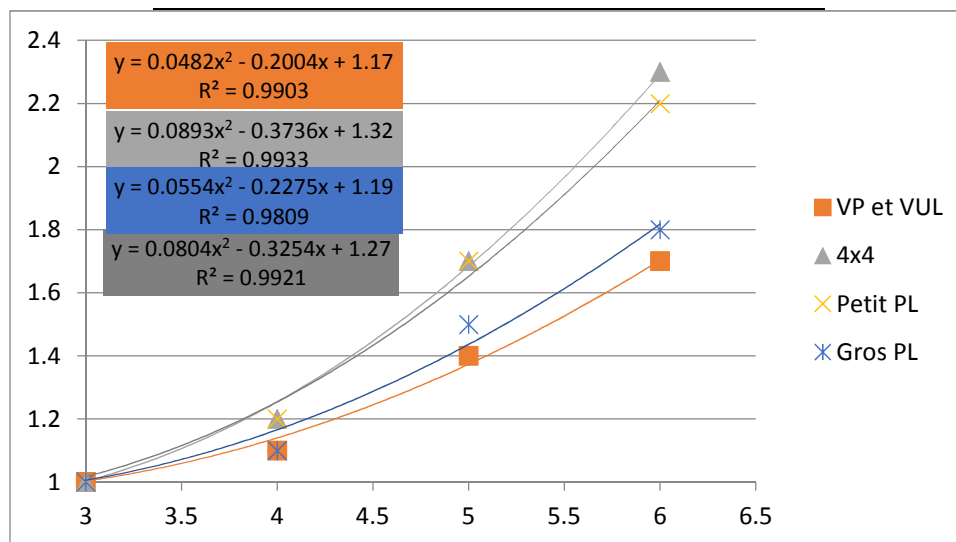


Figure 55 Surcoût en R&M selon l'IRI par catégories de véhicules routiers (pour IRI > 3 m/km)

Selon les considérations des auteurs dans leur mise à jour de modèle, les surcoûts observés au-delà d'un IRI de 3 m/km sont uniquement relatifs au changement des suspensions des véhicules. Toutefois, une grande différence semble exister entre les conditions américaines et françaises: alors que les américains changeraient selon Chatti et Zaabar (2012) leurs suspensions tous les 160 000 km et 400 000 km respectivement pour les VP et les PL, en accord avec les garanties constructeurs, il est recommandé par les constructeurs français de changer les amortisseurs d'un véhicule tous les 80 à 120 000 km²⁷³. Ainsi, la conception des véhicules pour le marché américain et le marché français semblerait différer, à moins que le changement de la suspension aux USA corresponde au changement de tout l'appareil, incluant en partie les amortisseurs. Notons que les constructeurs américains adaptaient la résistance mécanique des suspension au 90 ou 95^{ème} décile de rugosité routière (Poelman et Weir 1992) : si les routes américaines étaient plus dégradées que les routes françaises, les éléments des suspensions des véhicules pour ces deux différents marchés devraient être adaptés au degré de sollicitation à prévoir et donc les pièces pourraient avoir les mêmes longévités. Le modèle d'usure de Chatti et Zaabar semble concerner le système de suspension complet, tandis que nous n'avons pas trouvé de préconisations kilométriques pour le changement de la suspension entière des véhicules en France. Une recherche internet nous a également montré que la DVT des amortisseurs aux USA semble être la même que celle en France. Sans apport de précision de la part des concepteurs du modèle²⁷⁴, nous ferons l'hypothèse que les sur-usures calculées sont relatives au changement des pièces d'usure communes et non pas à la suspension entière. Les pièces d'usure communes sont : amortisseur d'un essieu, tête d'amortisseur, et butée, associés à chaque roue. D'autres pièces du système de suspension sont également usés par une route dégradée selon les professionnels de l'entretien : la partie ressort (ressort en spirale, barre de torsion, lames, etc.) qui casse généralement uniquement en cas de surcharge

²⁷³ amortisseurs.eu/index.php?key=1_4_0_0_1&tpl=secur ; caradisiac.com/La-frequence-des-verifications-50358.htm

²⁷⁴ Imen Zaabar, contactée à 4 reprises entre 2015 et 2017, sans réponse

extrême ou de choc, et la partie articulation qui permet de lier les roues à la suspension et la suspension à la caisse : les rotules qui relient les roues à la crémaillère (à changer tous les 100 000 km²⁷⁵) voire à terme les crémaillères²⁷⁶. Cela pourrait ensuite se répercuter sur l'usure pneumatique²⁷⁷ (phénomène de Shimmy).

La suspension d'un véhicule routier fait partie des trois composantes du « triangle de la sécurité » avec les freins et les pneumatiques, puisqu'elle permet une bonne tenue de route (plaquage du véhicule à la chaussée et stabilisation du véhicule au freinage et à l'accélération). Pourtant, selon le Service d'Études et de Conseils aux Usagers de la Route²⁷⁸, 40% des véhicules du parc automobile français seraient équipés d'amortisseurs usés, exposant les usagers à +10% de risque d'aquaplanage, -25% de durée de vie des pneus, des performances de freinage potentiellement plus faibles, ainsi qu'à une dégradation des performances des systèmes électroniques d'aide à la conduite. Les amortisseurs sont des pièces vérifiées au contrôle technique, néanmoins seules des traces de fuite d'huile, de corrosion ou de fissures entraînent une contre-visite, ce qui pourrait expliquer l'usure de 40% des amortisseurs du parc automobile français avancée par le Service d'Études et de Conseils aux Usagers de la Route.

ii/ Prise en compte de la vitesse

Selon C&Z, les coûts en maintenance des suspensions augmentent avec la vitesse à IRI fixé, la sensibilité de l'usure à l'IRI en revanche n'en dépend pas. Pour tenir compte de cela, on considère que le taux d'usure moyen en France (changement tous les 80 000 km) correspond à une vitesse de roulage moyenne de 56 km/h et un IRI compris entre 1 et 3 (baseline de Chatti et Zaabar, correspondant bien à l'état des routes françaises), et on calcule le facteur d'ajustement de surcoût selon les vitesses (88 km/h, 112 km/h) au prorata des coûts trouvés en entretien des suspensions par Chatti et Zaabar selon la vitesse dans les BDD texane et du Michigan. À partir de ces facteurs d'ajustement à la vitesse, nous traçons des régressions linéaires par type de véhicule (VL/PL, les coûts en suspension VP se comportant de manière très similaire à ceux des VUL selon les données de Chatti et Zaabar, et les PPL étant similaires également aux GPL). On obtient les lois de la Figure 56 (PL en violet et VL en bleu).

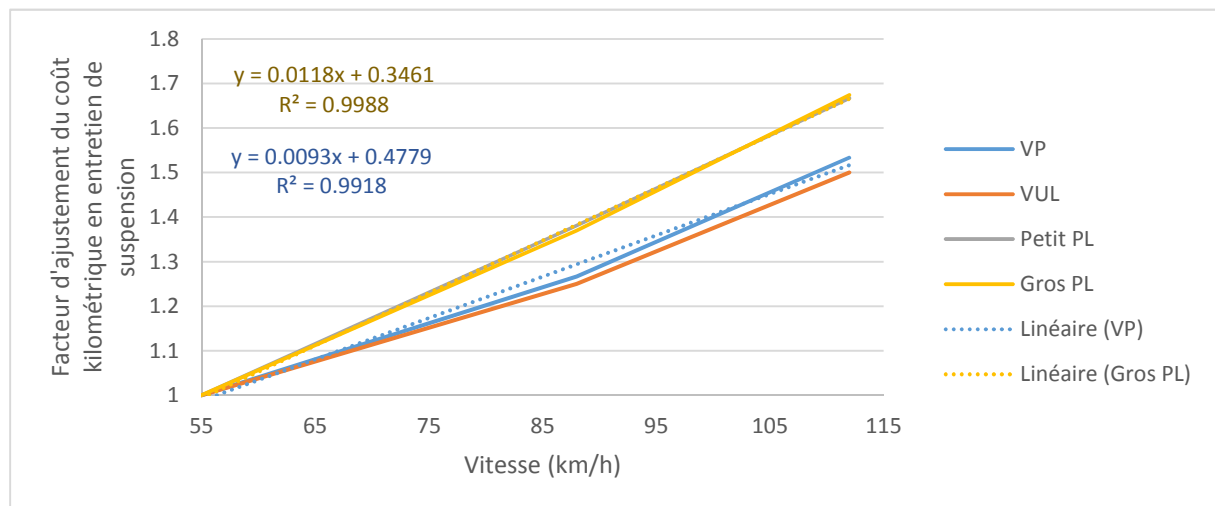


Figure 56 Lien entre usure/coût des suspensions véhiculaires et vitesse de roulage

²⁷⁵ caradisiac.com/La-frequence-des-verifications-50358.htm

²⁷⁶ Échanges informels avec un professionnel de l'entretien de VP + documentation constructeurs (http://www.wulfgaertner.com/fileadmin/user_upload/microsites/PSD-HD-FR/FLY_Sinistres_PSD_fr.pdf)

²⁷⁷ autobrico.com/reparation-entretien-automobile/roues-et-direction/causes-dusure-des-pneus/Page-4.html

²⁷⁸ http://medias.norauto.fr/pdf/info_amortisseur_securite.pdf?_ga=2.137212471.665806520.1506248633-1687659563.1505487702

iii/ Usure et Coûts kilométriques en entretien de suspension en France

On a calculé pour nos 4 catégories de véhicules les coûts kilométriques moyens en France en M&R hors pneus. Nous supposons qu'ils correspondent à la vitesse d'usure moyenne en France (on considérera un changement tous les 130 000 km des amortisseurs VL comme PL, en faisant l'hypothèse que les préconisations constructeurs sont dimensionnées à la hausse en entretien, pour des raisons financières évidentes) à une vitesse de roulage moyenne de 56 km/h (baseline de Chatti et Zaabar, correspondant peu ou prou aux vitesses de roulage moyennes considérées dans les études d'émissions de trafic européennes). On calcule ensuite, selon les coûts de R&M totaux et uniquement de suspension de Chatti et Zaabar (table 5.6) le prorata entre ces coûts : selon le type de véhicule, l'entretien des suspensions représente de 36 à 38% des coûts en M&R totaux hors pneumatiques. On calcule donc, basé sur nos coûts français moyens en M&R totaux le coût de l'entretien des suspensions en considérant que le prorata américain est valable en France.

Les coûts kilométriques de véhicules que nous avons calculés correspondant à l'année 2013 pour les VP, 2016 pour les VUL et 2017 pour les PL : on utilise les séries de l'INSEE d'indice de prix à la consommation en entretien des véhicules pour calculer les coûts kilométriques 2017 et ceux d'après selon le protocole déjà utilisé pour le modèle d'usure pneumatique.

iv/ Quantification des sur-usures surcoûts de R&M en France

Nous faisons l'hypothèse que le niveau d'IRI dépasse rarement 3 m/km en France, basé sur les quelques données d'état de surface que l'on a pu récolter. Donc, on en déduit que les coûts d'entretien véhiculaires ne varient pas aujourd'hui avec l'état de surface routière (Bennett et Greenwood 2003; Poelman et Weir 1992) en France. Nous considérons que la variation qui apparaît pour des IRI supérieurs à 3 m/km ne résulte que d'une usure prématurée des amortisseurs et pièces associées. Nous allons donc nous intéresser à l'opération de remplacement d'amortisseurs en termes de main d'œuvre et de pièces nécessaires.

v/ Données d'usure et de coûts par types de véhicule et de réseau selon l'IRI

On multiplie les coûts kilométriques tenant compte de l'inflation entre 2013 et 2017 calculé selon les vitesses moyennes de roulage par réseau et véhicules par les facteurs d'ajustement selon l'IRI de C&Z et on obtient le Tableau 41 des coûts suivants.

Tableau 41 Coût kilométrique 2017 en entretien de suspension – France (€TTC/km)

	IRI	1	2	3	4	5	6
Autoroutes (118/88)	VP	3.96E-02	3.96E-02	3.96E-02	4.36E-02	5.54E-02	6.73E-02
	VUL	2.33E-02	2.33E-02	2.33E-02	2.56E-02	3.26E-02	3.95E-02
	Petit PL	4.76E-02	4.76E-02	4.76E-02	5.71E-02	8.10E-02	1.05E-01
	Gros PL	4.24E-02	4.24E-02	4.24E-02	4.66E-02	6.36E-02	7.63E-02
Express (101/84)	VP	3.56E-02	3.56E-02	3.56E-02	3.92E-02	4.99E-02	6.06E-02
	VUL	2.09E-02	2.09E-02	2.09E-02	2.30E-02	2.93E-02	3.56E-02
	Petit PL	4.60E-02	4.60E-02	4.60E-02	5.52E-02	7.82E-02	1.01E-01
	Gros PL	4.09E-02	4.09E-02	4.09E-02	4.50E-02	6.14E-02	7.37E-02
RN/RD (82/79)	VP	3.12E-02	3.12E-02	3.12E-02	3.43E-02	4.37E-02	5.30E-02
	VUL	1.83E-02	1.83E-02	1.83E-02	2.01E-02	2.56E-02	3.11E-02
	Petit PL	4.40E-02	4.40E-02	4.40E-02	5.28E-02	7.47E-02	9.67E-02
	Gros PL	3.91E-02	3.91E-02	3.91E-02	4.30E-02	5.87E-02	7.04E-02

À partir de ces coûts, on peut calculer des lois de coûts kilométriques en R&M en fonction de l'IRI pour un IRI supérieur à 3 m/km, indiqués dans le Tableau 42.

Tableau 42 lois de coûts kilométriques en R&M en fonction de l'IRI pour un IRI supérieur à 3 m/km en France

		Fonction COUTS_R&M=RM=f(IRI)	R ²
Autoroutes (118/88)	VP	$RM = 0.0318 \cdot \exp(0.1833 \cdot IRI)$	0.9750
	VUL/minibus	$RM = 0.0318 \cdot \exp(0.1833 \cdot IRI)$	0.975
	Petit PL	$RM = 0.0565 \cdot \exp(0.2714 \cdot IRI)$	0.9874
	Gros PL	$RM = 0.059 \cdot \exp(0.2074 \cdot IRI)$	0.9651
Express (101/84)	VP	$RM = 0.0286 \cdot \exp(0.1833 \cdot IRI)$	0.9750
	VUL/minibus	$RM = 0.0286 \cdot \exp(0.1833 \cdot IRI)$	0.975
	Petit PL	$RM = 0.0545 \cdot \exp(0.2714 \cdot IRI)$	0.9874
	Gros PL	$RM = 0.057 \cdot \exp(0.2074 \cdot IRI)$	0.9651
RN/RD (82/79)	VP	$RM = 0.0025 \cdot \exp(0.1833 \cdot IRI)$	0.9750
	VUL/minibus	$RM = 0.025 \cdot \exp(0.1833 \cdot IRI)$	0.975
	Petit PL	$RM = 0.0521 \cdot \exp(0.2714 \cdot IRI)$	0.9874
	Gros PL	$RM = 0.0545 \cdot \exp(0.2074 \cdot IRI)$	0.9651

vi/ Lois de longévité kilométrique des amortisseurs

En considérant que les coûts moyens calculés à l'origine correspondent à une vitesse d'usure dans les conditions moyennes évoquées ci-dessus (changement tous les 100 000 km pour les VL comme les PL, puisque la fourchette de 80 000-150 000 km revient pour les deux types de véhicules²⁷⁹– on obtient des correspondance entre coûts kilométriques en entretien de suspensions et nombre d'amortisseurs usés (les coûts d'entretien des suspension étant en-deçà des coûts de changement d'amortisseurs) pour chaque type de réseau et de véhicule et selon l'IRI. On obtient le Tableau 43 d'usure kilométrique du jeu complet d'amortisseurs de nos véhicules.

Tableau 43 Correspondance nombre de jeux d'amortisseurs totaux usés par v.km

	IRI	1	2	3	4	5	6
Autoroutes (118/88)	VP	1.50E-05	1.50E-05	1.50E-05	1.65E-05	2.10E-05	2.55E-05
	VUL	1.28E-05	1.28E-05	1.28E-05	1.41E-05	1.80E-05	2.18E-05
	Petit PL	1.07E-05	1.07E-05	1.07E-05	1.28E-05	1.81E-05	2.34E-05
	Gros PL	1.07E-05	1.07E-05	1.07E-05	1.17E-05	1.60E-05	1.92E-05
Express (101/84)	VP	1.35E-05	1.35E-05	1.35E-05	1.49E-05	1.89E-05	2.30E-05
	VUL	1.16E-05	1.16E-05	1.16E-05	1.27E-05	1.62E-05	1.96E-05
	Petit PL	1.03E-05	1.03E-05	1.03E-05	1.23E-05	1.75E-05	2.26E-05
	Gros PL	1.03E-05	1.03E-05	1.03E-05	1.13E-05	1.54E-05	1.85E-05
RN/RD (82/79)	VP	1.18E-05	1.18E-05	1.18E-05	1.30E-05	1.66E-05	2.01E-05
	VUL	1.01E-05	1.01E-05	1.01E-05	1.11E-05	1.42E-05	1.72E-05
	Petit PL	9.83E-06	9.83E-06	9.83E-06	1.18E-05	1.67E-05	2.16E-05
	Gros PL	9.83E-06	9.83E-06	9.83E-06	1.08E-05	1.47E-05	1.77E-05

²⁷⁹ <https://www.44tonnes.com/amortisseurs-camion-36>

À partir de ce taux d'usure kilométrique, on peut facilement calculer les longévités kilométriques typiques des amortisseurs par catégorie de véhicule, réseau emprunté et IRI (i.e. l'inverse du taux d'usure kilométrique), indiqués dans le Tableau 44.

Tableau 44 Correspondance longévité kilométrique par type de véhicule selon le réseau emprunté et le niveau d'IRI

	IRI	1	2	3	4	5	6
Autoroutes (118/88)	VP	66 552	66 552	66 552	60 501	47 537	39 148
	VUL	77 853	77 853	77 853	70 775	55 609	45 796
	Petit PL	93 897	93 897	93 897	78 247	55 233	42 680
	Gros PL	93 897	93 897	93 897	85 361	62 598	52 165
Express (101/84)	VP	73 976	73 976	73 976	67 251	52 840	43 515
	VUL	86 538	86 538	86 538	78 671	61 813	50 905
	Petit PL	97 211	97 211	97 211	81 009	57 183	44 187
	Gros PL	97 211	97 211	97 211	88 373	64 807	54 006
RN/RD (82/79)	VP	84 513	84 513	84 513	76 830	60 367	49 714
	VUL	98 865	98 865	98 865	89 877	70 618	58 156
	Petit PL	101 698	101 698	101 698	84 748	59 822	46 226
	Gros PL	101 698	101 698	101 698	92 452	67 798	56 499

On retrouve sur RN/RD, là où l'essentiel du kilométrage français est réalisé, des longévités kilométriques d'amortisseurs dans la fourchette de préconisation constructeur. On voit en revanche qu'à fortes vitesses, l'IRI a des effets très néfastes sur la durée de vie des amortisseurs, qui chute de moitié pour un IRI de 6 m/km, quel que soit le type de véhicule.

Cette série de données nous permet, via une régression exponentielle (elle présente le meilleur coefficient de détermination), de calculer des règles de durée de vie d'amortisseurs selon les conditions d'exploitation à IRI supérieur ou égal à 3 m/km, indiquées dans le Tableau 45. À IRI < 3 m/km, la DVT des amortisseurs est celle indiquée dans le Tableau 44.

Tableau 45 Lois de DVT d'amortisseurs selon les conditions d'exploitation à IRI supérieur ou égal à 3 m/km en France

		Fonction DVT AMORTISSEUR=DA=f(IRI)	R ²
Autoroutes (118/88)	VP	DA =139 643.exp(-0.183*IRI)	0.9750
	VUL/minibus	DA =139 643.exp(-0.183*IRI)	0.975
	Petit PL	DA =218 765.exp(-0.271*IRI)	0.9874
	Gros PL	DA =181 842.exp(-0.207*IRI)	0.9651
Express (101/84)	VP	DA =155 221.exp(-0.183*IRI)	0.9750
	VUL/minibus	DA =155 221.exp(-0.183*IRI)	0.975
	Petit PL	DA =226 487.exp(-0.271*IRI)	0.9874
	Gros PL	DA =188 260.exp(-0.207*IRI)	0.9651
RN/RD (82/79)	VP	DA =177 331.exp(-0.183*IRI)	0.9750
	VUL/minibus	DA =177 331.exp(-0.183*IRI)	0.975
	Petit PL	DA =236 940.exp(-0.271*IRI)	0.9874
	Gros PL	DA =196 949.exp(-0.207*IRI)	0.9651

Si l'on veut vérifier l'ordre de grandeur d'un remplacement des amortisseurs, il suffit sur un type de réseau de multiplier le coût kilométrique en R&M attribué au changement des amortisseurs, coupelles et autres par la durée de vie des amortisseurs : on obtient environ 2600€ pour une VP, 1800€ pour un

VUL, 4500 € pour un petit PL et 4000 € pour un gros PL. Le coût pour une VP semble un peu élevé, mais peut simplement être le résultat d'une part du coût R&M global attribué à l'entretien des amortisseurs pris à 37% comme aux USA et qui serait en réalité peut-être plus faible en France. Cela ne remet pas en cause les lois de DVT en fonction de l'IRI déterminées, ni le calcul du coût en M&R selon l'IRI

3.2.3 Calcul de l'indicateur de coût aux usagers

Nous utilisons les modèles de surconsommation et de sur-entretien véhiculaire pour calculer sur un cycle de maintenance les coûts engendrés pour les usagers. Néanmoins, il est pour cela important d'avoir quelques considérations techniques sur le calcul financier.

3.2.3.1 Des flux physiques aux indicateurs monétaires

On veut calculer un indicateur de dépenses aux usagers. Il s'agit d'un calcul d'analyse financière dans la mesure où l'on s'intéresse aux flux de trésorerie futurs qui résultent du projet. Conformément aux consignes du Ministère de l'Environnement, on considère les flux monétaires en euros courants en utilisant un taux d'actualisation financier spécifique à l'acteur considéré, ici l'utilisateur. On choisit le taux d'actualisation par défaut à 1% (voir discussion chapitre 3).

3.2.3.2 Principe du calcul

La première étape de notre calcul de coûts aux usagers sur une période donnée est de calculer pour chaque année, chaque type de véhicule et chaque type de dépenses, les dépenses annuelles à euro courant pour l'ensemble des usagers. Pour cela, on multiplie les volumes de biens consommés par les prix unitaires de ces biens en euros courants. On arrive ainsi à un tableau contenant, pour chaque année, la somme des coûts en euros courants pour l'ensemble du trafic.

Pour le cas de l'entretien des suspensions et des pneumatiques, nous avons développé un modèle de coûts kilométrique TTC en euros 2017 (voir respectivement Tableau 41/Tableau 42 et Tableau 38/Tableau 39 pour les coûts kilométriques et le modèle d'influence de l'IRI). Pour connaître les coûts en euros courants des biens concernés, on utilise les séries statistiques de l'INSEE déjà présentées, qui suivent l'inflation des biens. En revanche, la question des coûts en dépense de carburant est plus sensible car son évolution dans le temps est plus turbulente. Nous développons un modèle de coût du carburant dans notre modèle.

3.2.3.3 Modèle de prix des carburants

A/ Composantes du prix

Le prix d'un carburant se compose du prix hors taxe du pétrole brut fixé par le marché et dépendant en partie du prix du baril de pétrole, du coût du raffinage, du transport, et de la distribution, et des taxes. Les taxes perçues par l'État sont la Taxe sur la Valeur Ajoutée (TVA) et la Taxe Intérieure Consommation sur les Produits Énergétiques (TICPE). Elles sont différentes selon le carburant considéré. Le taux de TVA sur la consommation de gaz naturel et de produits pétroliers est le taux normal au 24 janvier 2018, soit 20%²⁸⁰. La TVA s'applique sur le produit lui-même et sur la TICPE²⁸¹. Avant le 1^{er} janvier 2014, la TVA était fixée à 19.6%.

La formule du prix du carburant est donc celle de l'Équation 16.

Équation 16 Formule de calcul du prix du carburant toutes taxes comprises (TTC)

$$\text{Prix Carburant TTC}_{\text{Année } i} = (\text{Prix Carburant HT} + \text{TICPE})_{\text{Année } i} \times (1 + \text{TVA})_{\text{Année } i}$$

²⁸⁰ <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/fiscalite-des-energies>

²⁸¹ <http://www.observatoire-vehicule-entreprise.com/la-fiscalite%C3%A9-des-carburants-en-france,http://actualites-web.com/taxes-et-tva/la-tva-sur-carburants.html>

Nous souhaitons déterminer un scénario probable d'évolution du prix du carburant TTC et des taxes associées afin de calculer la dépense en carburant des usagers et les recettes fiscales associées. Nous allons donc évaluer chaque évolution disjointement.

B/ Évolution des prix des carburants

Nous présentons ici les évolutions des prix TTC et HT des deux principaux carburants : gazole et essence. Nous utilisons entre autres les prix moyens mensuels des carburants suivis par l'INSEE.

i/ Gazole

Le prix du gazole en janvier 2017 est de 1.27 €/L TTC (euros courants). Comme on peut le voir en Annexe 63, le marché du diesel est assez volatil, tout comme celui du pétrole. Si son évolution reste relativement linéaire sur le long terme depuis 1992 ($R^2=0.84$), elle semble être de plus en plus chaotique. En se basant sur la régression linéaire réalisée sur la série statistique de l'INSEE, on relève une inflation de $0.0029*12=0.035\text{€/an}$ ²⁸².

ii/ Essence

Il existe principalement trois types d'essence : le SP98, le SP95 et le SP95E10. Selon Statista²⁸³, le SP95 est le type d'essence majoritairement consommé entre 2013 et 2016, bien que sa consommation soit en baisse, contrairement aux SP95 E10 et SP98 dont les consommations augmentent. On fait le choix de ne considérer que le cours du SP98, à tendances de prix plus stables, et dont les volumes de vente sont à la hausse. Le prix de l'essence en janvier 2017 est de 1.48€/L TTC (euros courants). L'évolution de son prix est, comme pour le diesel, relativement linéaire depuis 1992 ($R^2=0.86$) et également de plus en plus chaotique. On relève une inflation de $0.0027*12=0.032\text{€/an}$ ²⁸⁴ (voir Annexe 64).

iii/ Synthèse

Les évolutions des prix des carburants TTC sur l'exemple du gazole et de l'essence sans plomb SP98 présentent des tendances fortement linéaires. En revanche, nous ne savons pas si ces évolutions sont homothétiques par composante du prix. Pour cela nous avons étudié les tendances d'évolution du prix du baril de pétrole (Brent), des marges et de transformation, puis des taxes²⁸⁵. Entre 1990 et 2018, nous retrouvons les tendances annuelles suivantes pour le gazole : +0.007€/L pour la part « baril » et +0.004 pour la part « marge et transformation » soit 0.011€/L sur le prix HT, et enfin 0.020€/L pour la part « taxes ». Cela représente donc une évolution portée à 2/3 par les taxes et 1/3 par la chaîne de production du carburant. Pour autant, si dans les années 1990 on retrouvait à peu près cette répartition des composantes du prix TTC, la part du prix HT dans le prix TTC tend à augmenter pour atteindre aujourd'hui environ 40% pour le gazole en 2018. Notons qu'avant l'introduction de la composante carbone dans la TICPE, la part HT était de 47%.

Nous retenons simplement l'évolution du prix linéaire HT de 0.011€/L.an, en considérant un marché stable sur le long terme, puisque les calculs conjoncturels sur le sujet sont très complexes et nécessiteraient autrement un travail qui dépasse largement le périmètre de ce travail. Nous allons néanmoins réaliser un travail complémentaire approfondi concernant l'évolution de la TICPE, qui est amenée à varier fortement.

²⁸² <https://www.insee.fr/fr/statistiques/serie/000442588#Documentation>

²⁸³ <https://fr.statista.com/statistiques/499561/volume-consommation-gazole-essence-traffic-france/>

²⁸⁴ <https://www.insee.fr/fr/statistiques/serie/000442589#Tableau>

²⁸⁵ Faute de données officielles, nous avons utilisé les seuls données assez détaillées que nous avons trouvées : <http://france-inflation.com/prix-carburants.php>

3.2.3.4 Modèle d'évolution de la TICPE

La TICPE est amenée à varier en France au cours des prochaines années pour deux raisons. D'abord, un rattrapage fiscal est prévu entre diesel et essence d'ici à 2022, le diesel ayant jusqu'à présent été fiscalement avantageux, alors que son rôle prépondérant dans la pollution atmosphérique et particulièrement en milieu urbain a été mis en évidence plus récemment. Ensuite, il a été décidé par le Ministère de Nicolas Hulot d'accélérer la mise en place d'une fiscalité carbone ambitieuse (voir Annexe 65), la composante carbone ayant été introduite par la Loi de Finance en 2014 (LFI 2014). Nous retenons donc la trajectoire du Ministère de Nicolas Hulot jusqu'à 2022. Les suites de la trajectoire de la composante carbone ne sont pas claires. La trajectoire proposée par la commission Quinet était une taxe démarrant à 32€/tCO₂ en 2010, augmentant de 5.8% par an. Cela donnait lieu à une taxe de 56€/t en 2020, 63€/t en 2022, 99€/t en 2030, 174€/t en 2040 et 305€/t en 2050. À partir de la valeur en 2022 de la nouvelle trajectoire de la LFI, nous proposons un point de convergence entre les deux trajectoires en 2050, à 305€/tCO₂. Cela implique une augmentation linéaire annuelle de 7.8€/tCO₂ après 2022, soit une augmentation de 1.78 cent€/L.an selon nos calculs.

Nous retenons une évolution linéaire du prix du carburant HT de 1.1 cent€/l.an. Nous considérons la trajectoire de rattrapage fiscal du diesel face à l'essence en 2022 du Ministère de Nicolas Hulot. Nous adoptons l'évolution de la composante carbone de la TICPE du Ministère de Nicolas Hulot, puis nous proposons une augmentation linéaire annuelle de 1.78 cent€/L après 2022 (convergence avec la commission Quinet pour 2050). La TVA est fixée à 20% et appliquée au prix HT et à la TICPE selon l'Équation 16.

4 Indicateurs pour la Nation : production, emplois, recettes publiques et coût global

4.1 Production et emplois : calcul par analyse entrées-sorties

Les impacts macroéconomiques des politiques d'entretien routier vont principalement dépendre d'équilibres entre, d'un côté l'industrie routière, et de l'autre l'industrie de l'exploitation véhiculaire (consommation énergétique et entretien). Nous avons vu au chapitre précédent que deux types de modèles économiques sont classiquement utilisés en politique économique nationale. Les modèles économétriques monosectoriels de type MESANGE ne vont pas permettre de déterminer l'impact de la modification de consommation sur plusieurs branches de l'économie. C'est donc l'analyse de Leontief que nous devons utiliser, car nous sommes sur un arbitrage qui impacte plusieurs secteurs à la fois : il se produit ce que l'on pourrait appeler un « transfert de production », puisqu'une augmentation de l'entretien routier correspond à une baisse de la demande dans certains secteurs « véhiculaires », et inversement. Nous décrivons ici le mode de calcul spécifique que nous appliquerons dans notre méthode.

4.1.1 Indicateur de production

4.1.1.1 Matrice technologique

Le TES permet de calculer un tableau de coefficients techniques de production, aussi appelé « matrice technologique » qui décrit les interdépendances économiques entre branches. On définit les coefficients techniques de la comptabilité nationale comme le rapport entre la valeur de la consommation intermédiaire d'un produit donné par une branche donnée et la valeur de la production totale de cette branche. Le coefficient a_{ij} , soit le coefficient correspondant à la branche j (i.e. numéro de colonne) et au produit i (i.e. numéro de ligne) correspond à la part de dépense en produit i dans la production de la branche j . Le calcul de ces coefficients s'effectue à l'aide du TEI et du CPR par une

opération matricielle simple. On calcule a_{ij} selon l'Équation 33 avec $TER = [ter_{ij}]$ la matrice des consommations intermédiaires et $Y = [y_j]$ la matrice des productions.

Équation 17 Formule de calcul des coefficients techniques

$$a_{ij} = \frac{ter_{ij}}{y_j}$$

Ces coefficients techniques tiennent compte d'une structure statique entre production nationale et importation (dont la somme vaut la production Y).

4.1.1.2 Matrice inverse de Leontief

Chaque branche de l'économie a des consommations intermédiaires qui la rendent dépendante d'autres branches, elles-mêmes dépendantes d'autres branches, et ainsi de suite. Pour rendre compte des effets bouclés des consommations intermédiaires, la matrice inverse de Leontief présente l'effet global d'une augmentation ou diminution de demande exogène sur toutes les branches de production. La production totale satisfait la consommation intermédiaire ainsi que la demande finale (i.e. consommation des ménages). On déduit la relation dite inversion de Leontief entre la production et la demande finale de l'Équation 18 avec P le vecteur de production, I la matrice identité, A la matrice technologique, et f le vecteur de la demande directe en produits.

Équation 18 Relation inversion de Leontief

$$P = (I - A)^{-1}f$$

À partir des TES français, on calcule f en indiquant la demande au prix de base par ligne pour chaque type de produit consommé (i.e. somme des factures HT). L'Équation 18 provient de la somme des termes suivants calculant chaque niveau de consommation lié à la demande f : $A.f$ désigne la production intermédiaire « directe » des activités qui produisent f ; $A.(A.f)$ désigne la production intermédiaire des premiers sous-traitants ; $A.(A.A.f)$ désigne la production des deuxièmes sous-traitants ; Etc. jusqu'au dernier sous-traitant²⁸⁶.

Concrètement, l'effet direct d'une modification de demande se calcule à partir de la matrice technologique, tandis que l'effet global (direct et indirect) se calcule avec la matrice inverse de Leontief.

4.1.1.3 Calcul d'indicateur

L'objectif du calcul est d'évaluer l'impact d'une variation de la demande finale d'un produit sur la production de l'ensemble du système économique. On utilise la relation d'inversion de Leontief (Équation 18) pour faire notre calcul de production finale, en fonction du vecteur de demande du scénario d'entretien à évaluer. Ce vecteur s'évalue avec les coûts en prix de base (que l'on fera équivaloir par simplicité au prix HT, mais il s'agit d'une approximation) des consommations en entretien de véhicule, en carburant et en génie civil : demande \approx factures HT \approx Dépenses-Taxes. La production totale du système étudié s'obtient en sommant l'ensemble des termes du vecteur P .

Notons que l'on se base ici sur des tables nationales : nos résultats ont donc une réalité statistique sur le territoire. Il est possible, avec des données d'enquêtes locales, de spécifier les résultats selon le lieu des dépenses (Fouqueray 2016). Cependant, dans le cas de l'entretien des routes et des productions afférentes, les productions n'étant pas nécessairement très locales (carburant, bitume, pneumatiques, suspensions), le raffinement ne serait pas nécessairement très pertinent.

4.1.2 Indicateur d'emplois

Liés au système productif, des emplois sont mobilisés côté entretien routier et côté consommations véhiculaires. Comme pour la production, ces effets sont directs et indirects, ces derniers étant liés aux consommations intermédiaires des branches afférentes aux modifications de demandes directes. La

²⁸⁶Une factorisation bien connue en mathématique est la suivante : $I+A+A_2+A_3+\dots+A_n = (I-A)^{-1}$

formule de calcul des emplois supportés par la demande évaluée en équivalents temps plein est indiquée en Équation 19 avec le vecteur contenu en emplois exprimé en milliers d'équivalents temps plein, la production nationale et la production du scénario évalué exprimées en euros.

Équation 19 formule de calcul des emplois supportés par la demande évaluée en équivalents temps plein

$$ETP(\text{scenario}) = \frac{\text{Contenu en emplois}}{\text{Production nationale}} \times \text{Production}(\text{scenario}) \times 1000$$

Les mêmes limites méthodologiques que celles limitées à l'évaluation des effets sont à noter. Notamment, selon le Ministère « il faut noter que les évaluations proposées supposent que les effets de création d'emploi mis en avant jouent à plein, ce qui n'est assuré que dans des conditions macroéconomiques particulières (sous-emploi keynésien, corrigé par une augmentation des dépenses publiques) dont on devra analyser le bien fondé. ». Du fait du taux de chômage en France, on peut considérer que cette première condition est vérifiée. Ensuite, on se base sur des tables (comptabilité nationale, contenu en emplois) reflétant une certaine situation économique, domestique et internationale. Notre calcul d'emplois présuppose une stabilité temporelle entre production nationale et importation qui n'a rien d'évident dans le cadre d'une modification de demande importante. On considère que la demande ne varie pas trop sur le plan national quand on étudie la politique d'entretien d'un tronçon routier, ce qui serait à réexaminer dans le cas d'une évaluation des stratégies de resurfaçage à l'échelle d'un réseau routier étendu. En effet, le modèle MESANGE de l'INSEE considère une élasticité des importations par rapport à la demande supérieure à 1 : elle est de 1.3 pour les produits industriels. Enfin, rappelons que l'indicateur calculé est un indicateur d'emplois mobilisés, et non nécessairement créés (MEDDE 2014c).

4.1.3 Effets multiplicateurs (Fouqueray 2016)

À ces deux indicateurs principaux d'effet sur la production et l'emploi, nous pouvons assortir des indicateurs qui en découlent : les multiplicateurs. Ici de la théorie keynésienne, le multiplicateur de production (resp. emploi ou Valeur Ajoutée (VA)) est de x quand 1€ investi en entretien génère x € de production (resp. emploi ou VA) sur la chaîne de valeurs. Il se calcule en divisant la production (resp. emploi ou VA) par l'investissement. L'effet multiplicateur dépend des fuites de revenus à l'extérieur du pays.

Plusieurs auteurs affirment que les multiplicateurs d'emploi calculés par analyse de Leontief auraient tendance à surestimer l'effet d'une demande ponctuelle sur l'emploi à cause, d'une part, des hypothèses de proportionnalité entre la production, la valeur ajoutée et l'emploi, et, d'autre part, de la fixité des prix (Dwyer, Forsyth, et Spurr 2005; Loveridge 2004). Or, une demande ponctuelle ne modifie pas forcément la structure de l'emploi dans une branche particulière, et des effets de marché (offre-demande) peuvent créer une inflation provisoire si la demande augmente brusquement.

4.2 Recettes fiscales et solidarité sociale

L'État prélève des taxes directes et indirectes auprès des agents économiques – entreprises et ménages – qu'elle réemploie pour le fonctionnement du pays. On calcule un indicateur de recette publique selon le principe de calcul financier actualisé (voir chapitre 3) en additionnant les recettes fiscales, en appliquant le taux d'actualisation préconisé dans le chapitre 3. Pour calculer les recettes, on propose de détailler les systèmes fiscaux impliqués directement et indirectement par les programmes de resurfaçage routier. On ne tient pas compte des taxes sur les opérations d'entretien dans le calcul du surplus fiscal de l'État car il y a transfert entreprises-État : « ces taxes sont neutres » (Blanquier 1984).

4.2.1 Fiscalité des carburants routiers

Nous avons présenté la fiscalité des carburants routiers dans le modèle de prix des carburants en partie 3.2.3. Elle se compose donc de la TICPE et de la TVA, cette dernière s'appliquant à la fois sur le prix HT

du carburant et sur la TICPE. Les PL de l'Union Européenne peuvent bénéficier, sur demande, d'un remboursement partiel forfaitaire de la TICPE²⁸⁷. En revanche, la TVA n'est pas impactée. Deux modalités de remboursement existent, soit en calculant la différence entre taux régionaux de la TICPE au lieu d'achat du carburant et taux plancher (43.19 €/100L à la date de l'écriture), soit pour les entreprises qui ont acheté du gazole dans plus de 2 régions différentes en appliquant un taux forfaitaire de remboursement pondéré par les taux en vigueur dans chaque région au volume de gazole acheté. Au second semestre 2017, ce taux forfaitaire est de 11.42 €/100L. Nous nous contenterons de ce taux fixe, sans le redresser de l'inflation dans notre modèle, à défaut de données prospectives sur l'évolution de ce remboursement forfaitaire. En effet, nous anticipons plutôt une tendance à la taxation toujours plus forte du carburant routier, comme le prévoit déjà la fiscalité carbone, accélérée début 2018.

4.2.2 Fiscalité de l'entretien de véhicules

Elle concerne les pneumatiques ainsi que les suspensions. Il existe différents régimes de taxation, selon les véhicules. En effet, la TVA est déductible pour les véhicules professionnels, soient grosso modo les VUL et les PL. Dans notre modèle, autant pour l'entretien des pneumatiques que des suspensions, nous proposons de retenir une TVA de 20% sur les VP, et de 0% pour les autres, bien que le taux de véhicules professionnels exonéré ne soit probablement pas de 100% (exemple de raisons : méconnaissance des processus de remboursement, formulaires remis en retard, véhicules immatriculés hors UE). Dans tous les cas, l'essentiel du trafic est porté par le trafic sur les routes interurbaines, et malgré les ratios de coûts d'usage, l'essentiel est porté par la flotte légère (coûts au kilomètre souvent optimisé à la baisse chez les véhicules professionnels, contrairement aux véhicules de particuliers).

4.2.3 Fiscalité de l'entretien des chaussées

Nous ne comptons aucune taxe sur les travaux de voirie comme dit précédemment. Un raffinement de notre modèle pourrait consister en la prise en compte de l'état de l'autoroute pour son attractivité : une route en meilleur état sera d'autant plus choisie par les usagers que son alternative non concédée, d'où un surplus de recette, et vice versa. On pourrait dans ce cas ajouter une recette supplémentaire pour la SCA et éventuellement une recette fiscale pour l'État dans le cas où le contrat de plan État-SCA serait négocié ainsi.

4.2.4 Discussion du périmètre

L'effet des recettes issues de la TVA liée aux consommations véhiculaires donne un tableau incomplet de l'impact de l'investissement en entretien routier sur les finances publiques. En effet, d'autres effets pourraient être pris en compte : en particulier les charges salariales payées par les entreprises, les allocations chômage et le bénéfice sur les sociétés. Faute d'accès aux données nécessaires, nous ne compléterons pas le périmètre de cet indicateur.

Les deux premiers effets sont d'ailleurs pris en compte dans l'étude input-output réalisée par Leurent et Windisch sur l'effet du véhicule électrique pour l'économie française (2013). Cependant, cette étude est réalisée selon une modélisation de l'économie en 24 branches. Nous préférons une étude macroéconomique basée sur des données détaillées en termes de fonctionnement de l'économie française (138 branches, cf. chapitre 6) afin d'obtenir des résultats plus fiables sur la production et l'emploi, qui représenteront donc ces effets de manière indirecte. Nous n'avons en effet pas les données de rémunération des salariés par branche, ni le taux de cotisations sociales, ni la compensation chômage par branche, données nécessaires aux calculs complémentaires proposés.

²⁸⁷ <https://www.service-public.fr/professionnels-entreprises/vosdroits/F31222>

Enfin, la prise en compte de l'impôt sur le bénéfice des sociétés est également un exercice périlleux : il nécessite une connaissance à nouveau des cotisations sociales payées par chaque branche pour calculer l'excédent brut d'exploitation, à partir de la valeur ajoutée par branche économique.

4.3 Coût global sociétal

Un indicateur financier global des programmes d'entretien d'une route doit tenir compte : des dépenses d'entretien (gestionnaire) et d'exploitation (gestionnaire, usagers), ainsi que des dépenses et recettes de l'État. Nous ne comptons pour l'État que les recettes fiscales, comme déjà expliqué, à défaut de données nécessaires à la prise en compte des recettes sur l'impôt sur les sociétés et les économies apportées par les créations d'emplois (économie de versements chômage). Les taux de rentabilité peuvent être calculés en euros constants ou courants, néanmoins la rentabilité financière comme économique n'aurait de sens qu'en « termes réels », i.e. en termes nominaux tenant compte de l'inflation (Blanquier 1984). Le bilan de l'analyse du coût global sociétal se fonde sur des valeurs hors taxes à euros constants (MEDDE 2014a). Pour calculer le coût, on calcule l'opposé de la VAN selon les préconisations du chapitre 3, en utilisant un taux d'actualisation unique de la société proposé dans le chapitre 3 également. Bien que nous adoptons cette préconisation ministérielle dans le calcul de cet indicateur, nous discuterons sa pertinence plus tard.

5 Indicateurs pour les riverains : pollutions des milieux et bruit

Les riverains sont principalement affectés par deux impacts : la pollution des milieux et le bruit.

5.1 Pollution des milieux et riverain

5.1.1 Typologie d'indicateurs

Nous avons présenté l'ACV dans le chapitre 3. Du point de vue théorique, elle est la seule méthode tenant compte de l'ensemble des riverains impactés par le système de l'entretien routier : à la fois sur la chaîne de production de l'industrie de resurfaçage et sur celles des consommables véhiculaires affectés par l'état de surface routière (carburant, pneumatiques, suspensions). Elle va permettre de quantifier les émissions polluantes responsables de la dégradation de la santé publique, avant de calculer des indicateurs *midpoints* ou un indicateur *endpoint* sur la santé humaine.

Les indicateurs *midpoints* sont nombreux et peuvent être plus ou moins avancés vers le calcul de l'impact à la santé. À ce titre, le groupe de recherche de Mikhaïl Chester à l'université d'Arizona aux UEA qui travaille sur l'ACV des transports s'arrête principalement à une évaluation physique des substances émises – SO_x, NO_x, PM_{2.5}, PM₁₀, COV, CO – en dehors de l'utilisation d'un indicateur de smog photochimique et d'impact respiratoire²⁸⁸. Notons que les substances citées présentent des effets sur la santé humaine mais également sur la biodiversité comme nous l'avons détaillé au chapitre 2. D'autres indicateurs *midpoints* agrègent les effets des substances impactant un même trouble sanitaire particulier selon plusieurs possibilités de classification : smog, pollution urbaine, toxicité humaine, radiations ionisantes, impacts cancérigènes/non cancérigène.

Enfin, plusieurs méthodes de caractérisation permettent de calculer un indicateur *endpoint* ou orienté dommage, qui permet d'agrèger tous les effets sur la santé humaine dans un même indicateur, quantifié en DALY. DALY signifie en anglais « Disability Adjusted Life Years », ou « Années de vie ajustées sur l'incapacité » en français. Un DALY équivaut soit à une année de vie potentielle perdue par mort prématurée, soit à une année de productivité perdue en raison d'incapacité. Face aux nombreuses parties prenantes et aux nombreux indicateurs de notre méthode, nous proposons de ne sélectionner que cet indicateur *endpoint* dans notre méthode, qui a l'avantage de tout agréger en un

²⁸⁸ <http://www.transportationlca.org/tlcnadb-passenger.php>

seul résultat global, bien que les incertitudes des indicateurs *endpoints* puissent être jugées plus élevées par considération de la complexité des modèles sous-jacents (Hauschild et al. 2013).

Les indicateurs de santé humaine en DALY s'opposent à ceux proposés en QALY, « Quality Adjusted Life Years », qui pondère l'état de santé au regard de la qualité de vie, en se basant sur la théorie de l'utilité et du choix social (Sassi 2006). Le QALY peut par exemple être utilisé pour évaluer l'intérêt de certains actes thérapeutiques, en fixant l'indice QALY par questionnaire ou prise en compte de critères impersonnels selon des formulaires déclaratifs standardisés auxquels les patients répondent. Le QALY implique un présupposé éthique que la vie en tant que telle n'a pas de valeur estimable contrairement à la considération dans le calcul de DALY, et qu'il faut croiser les durées de vie impactées par une action avec la condition/la qualité de vie qu'elle va permettre au patient. La communauté scientifique dénonce néanmoins plusieurs partis pris dans l'utilisation du QALY qui nous font lui préférer le DALY (en sus des questions de praticités de calcul des DALY avec les méthodes d'ACV développées). Le QALY est taxé d'agisme ne tenant pas compte de l'intérêt collectif (utilité globale) et donc de discrimination et injustice (Harris 1987). De plus, il a été démontré récemment que les quatre hypothèses sur lesquelles il se base ne sont pas vérifiées – indépendance entre années de vie et qualité de vie, proposition à sacrifier des années de vie de manière constante – invalidant la pertinence de l'indicateur (Beresniak et al. 2015).

5.1.2 Indicateur de dommage à la santé du riverain

Parmi les méthodes de caractérisation permettant de calculer un indicateur de dommage total sur la santé humaine, l'ILCD recensait les suivantes en 2011 : Eco-indicator 99, CML (pour Centrum voor Milieuwetenschappen, ou Institut des Sciences Environnementales en français), ReCiPe qui vient les mettre à jour, EPS 2000, Impact 2002+, LIME, LUCAS, TRACI, USEtox. Depuis, de nouvelles versions de méthode ont été développées. Notons en particulier IMPACT World+ (Bulle et al. 2019), qui vient mettre à jour Impact 2002+, LUCAS, EDIP (Curran 2015) et RECIPE, et inclut la méthode « USEtox »²⁸⁹, i.e. les derniers développements sur les effets de toxicités (Rosenbaum et al. 2008, 2011; Henderson et al. 2011) et les avancées méthodologiques pertinentes jusqu'à 2016. À titre d'exemple, Eco-indicator 99 inclut dans son calcul de dommage à la santé publique la contribution du changement climatique (maladies et migrations), de l'amenuisement de la couche d'ozone, des effets radiatifs cancérogènes, des effets respiratoires et d'autres impacts cancérogènes (European Commission, Joint Research Centre, et Institute for Environment and Sustainability 2011). Selon la même source, Impact 2002+ inclut en sus l'oxydation photochimique et la toxicité humaine, tandis que LIME comprend plusieurs troubles moins bien pris en compte, par exemple les effets du bruit, de cataractes (couche d'ozone), de stress thermique. En termes de méthode, notre choix se portera sur IMPACT World+ qui est la plus récente et inclut toutes les dernières avancées scientifiques d'ACV (Curran 2015). Elle permet en sus de différencier les effets de court et long termes, effets que nous avons additionnés. Son périmètre inclut les effets suivants sur la santé humaine : changement climatique (court et long termes), toxicités cancérogènes et non cancérogènes (court et long termes), radiations ionisantes, amenuisement de la couche d'ozone, formation de particules fines et d'oxydants photochimiques, disponibilité de l'eau.

Cet indicateur de dommage à la santé humaine est exprimé en DALY.

5.2 Bruit et riverain routier

5.2.1 Chaînes de modélisation et indicateurs acoustiques

Nous avons précédemment parlé de l'impact sanitaire du bruit routier (Chapitre 2, 4.2.2.2) : des sons, principalement caractérisés par leurs fréquences, amplitudes et signatures temporelles, sont émis par les véhicules routiers puis se propagent à travers le milieu avant d'être reçus par les riverains de

²⁸⁹ <http://www.impactworldplus.org/en/publications.php>

l'infrastructure routière. Selon la caractérisation de ces sons et leur temporalité, et selon la sensibilité du récepteur, la perception de ces sons provoque chez les riverains plus ou moins de désagréments. Nous pourrions donc considérer plusieurs indicateurs pour traduire l'effet du bruit routier tout au long de la chaîne du phénomène physique émission-propagation-réception-perception-effet sanitaire.

Sur les 3 premières étapes de cette « chaîne du sonore », nous sélectionnerions de manière privilégiée des indicateurs – que nous qualifierons de « *midpoint* » selon la terminologie propre à l'ACV (voir Chapitre 3, 2.5.2) – relatifs à un niveau sonore pondéré selon la sensibilité de l'oreille humaine (exprimé en dB(A)) bien que cette pondération soit actuellement discutée par la communauté des acousticiens. Plus l'évaluation du niveau sonore correspond à ce qui est réellement perçu par le riverain, plus l'indicateur est adapté à une approche anthropocentrique. Toutefois, une méthode de calcul de bruit routier généralisée – et a fortiori simplifiée ici, à des fins opérationnelles – va nécessairement de pair avec certaines incertitudes : de l'erreur et de la variabilité dans l'émission (autant côté moteur que contact pneu-chaussée) à celles dans la réception selon la répartition des riverains et leurs propres systèmes de protection contre le bruit – double vitrage, écran végétal – en passant par la non moins variable propagation, où réflexion, diffraction, réfraction, diffusion et absorption viennent fortement modifier la gêne des riverains *ceteris paribus*.

Pour l'effet au bout de la chaîne des 4 étapes, nous qualifierons les indicateurs permettant cette prise en compte d'ensemble des phénomènes acoustiques routiers de « *endpoint* ». Ces indicateurs d'effet sanitaire du bruit peuvent traduire l'effet physique du bruit en termes de réduction d'espérance de vie et/ou d'années vécues en bonne santé, mais également être monétarisés. Notons qu'un indicateur monétaire est davantage sensible au contexte dans lequel il est calculé.

Du point de vue des parties prenantes de l'entretien routier, deux niveaux de modélisation paraissent particulièrement intéressants : le premier niveau, soit l'émission acoustique, et le dernier niveau, soit l'impact sanitaire. La composante de l'émission acoustique relative au contact pneu-chaussée dépend en partie du revêtement routier et de son état, même si d'autres facteurs entrent en compte. Ensuite, à tronçon routier donné, les conditions de propagation et de réception sont indépendantes de l'entretien routier ; donc un calcul d'indicateurs à ces niveaux de la chaîne du son ne se justifie pas vraiment. D'autant qu'au niveau *endpoint* – intéressant le riverain directement mais aussi le gestionnaire et les autorités publiques par responsabilité sociale – la prise en compte de la spécificité de site de ces deux étapes peut être faite. Ce niveau pourrait être à privilégier pour son aspect « parlant » pour les parties prenantes (impact sur la vie plutôt qu'indicateurs physiques en dB(A)), mais la qualité du résultat dépend des moyens de modélisation d'émission/propagation/réception (données de site, paramètres influents, données d'entrée, conditions aux limites, caractéristiques du milieu et logiciels de calcul acoustique).

5.2.2 Indicateur « *midpoint* » de niveau de puissance d'émission

5.2.2.1 Calculs de niveaux de puissance sonore linéique

A/ Véhicule unitaire

Le niveau sonore émis par un véhicule est différent selon son type, par exemple entre PL et VL. Il est constitué d'une composante roulement et d'une composante moteur. En France, une base de données de niveaux sonores des revêtements de chaussée est alimentée en continue et maintenue par l'ex-LRPC de Strasbourg. Elle a donné lieu à des traitements qui ont débouchés sur des lois génériques d'émissions par catégories de revêtements dans le document de référence appelé « NMPB 2008 » (Sétra 2009c). Avec le tome 2 de ce rapport (Sétra 2009b), ces documents sont considérés comme la

méthode de référence de prévision du bruit routier²⁹⁰ selon la directive européenne 2002/49/EC²⁹¹ (Meyer 2017).

La NMPB/tome 1 pour la section « émission » propose des formules de calcul types de niveaux de puissance d'émission par mètre de ligne source – composante moteur et composante roulement pour un VL et un PL – ainsi que des évolutions de niveau de puissance d'émission de la composante roulement entre 2 et 10 ans d'âge de revêtement. Nous choisissons les formules pour le PL « toutes allures » et « déclivité nulle » et pour le VL « allure stabilisée, toutes déclivités ». Notons que la pente fait fortement varier le niveau de puissance d'émission d'un PL. Les formules sont à appliquer à vitesse donnée sur certains intervalles de vitesse, que nous choisissons en adéquation aux vitesses moyennes pratiquées par catégorie de véhicule et par type de route.

Équation 20 Formule générique de calcul de niveau de puissance acoustique par mètre de ligne source en dB(A) selon la NMPB 2008 (Sétra 2009c)

$$L_{w/m} = a + b \cdot \log\left(\frac{V_{moy}}{V_{ref}}\right) + \Delta L$$

Avec V_{moy} la vitesse moyenne pratiquée par le véhicule considéré, V_{ref} la vitesse de référence prise égale à 90 km/h pour les VL et 80 km/h pour les PL et ΔL un correctif relatif à l'allure et la déclivité. Pour appliquer nos formules, la NMPB fournit les valeurs de coefficients selon les types de revêtements routiers R1, R2 ou R3 (cf infra, Tableau 50), que nous rappelons pour la composante « roulement » dans le Tableau 46 et pour la composante moteur dans le Tableau 47.

Tableau 46 Coefficients de calcul du niveau de puissance d'émission liée au roulement selon le véhicule et la catégorie de revêtement

Revêtement	VL		PL	
	a	b	a	b
R1	49.4	21	59.1	20
R2	53.4	20.1	61.1	20
R3	55.9	21.4	63.1	20

Tableau 47 Coefficients de calcul du niveau de puissance d'émission liée au moteur selon le véhicule et la vitesse

Véhicule	[Vinf ; Vsup]	a	b
VL	[30 ; 110]	42.4	2
VL	[110 ; 130]	40.7	21.3
PL	[70 ; 100]	50.4	3

Nous obtenons les niveaux de puissance acoustique indiqués dans le Tableau 48, arrondis au dB(A) près.

Tableau 48 Données de niveaux de puissance acoustique – composante moteur et composante roulement – par mètre de ligne de source sur un revêtement de 2 ans par application de la NMPB sur nos routes interurbaines françaises

	Lw/m - composante moteur (dB(A))			Lw/m – composante roulement (dB(A))								
				R1			R2			R3		
	RD/RN	RE	RA	RD/RN	RE	RA	RD/RN	RE	RA	RD/RN	RE	RA
1 VL	42	43	43	49	50	52	53	54	56	55	57	58
1 PL	50	50	51	59	60	60	62	63	63	63	64	64

Ces formules sont à appliquer pour calculer le niveau de puissance acoustique émise par mètre de ligne source, pour 1 veh/h, selon la composante moteur et la composante roulement. Ces deux niveaux

²⁹⁰ Cette méthode est actuellement en cours de ré-écriture au niveau européen

²⁹¹ ec.europa.eu/environment/noise/directive_en.htm

sonores s'additionnent ensuite selon la formule générique d'additivité des niveaux sonores indiquée dans l'Équation 21.

Équation 21 Formule de calcul d'additivité de niveaux sonores

$$L_{total} = 10 \log \left[\sum_i 10^{\frac{L_i}{10}} \right]$$

B/ Tronçon routier

i/ Voies et lignes source

Dans le cas de routes interurbaines à plusieurs voies et selon la NMPB tome 2 concernant la propagation du bruit routier (Sétra 2009b), on peut simplifier la modélisation en considérant une ligne source unique placée au centre de la plate-forme si les récepteurs sont en vue directe à une distance de l'axe de la route d'au moins 2.4 fois la largeur de la plate-forme (soit environ 40 m pour une 2x2 voies et 60m pour une 2x3 voies) et si le trafic est équilibré dans les deux sens de circulation. Pour une 2x1 voies, les riverains routiers doivent être à plus de 11m de l'infrastructure. Ces hypothèses sont évidemment peu réalistes pour un tronçon routier souvent non homogène, puisque l'on aura forcément des récepteurs en vue masquée. Elles semblent pour autant acceptables en première approche simplifiée.

ii/ Calcul du niveau sonore total

On doit ensuite considérer l'addition des niveaux sonores des véhicules unitaires. Pour cela, on réutilise la formule de l'Équation 21.

Nous ne considérons que deux catégories de véhicules, les VL et les PL. La densité de véhicules de type i dépend du débit horaire q (veh/h) et de la vitesse (km/h) selon la formule donnée en veh/m dans l'Équation 22.

Équation 22 Calcul de densité linéaire de chaque catégorie de véhicules

$$d_{veh,i} = \frac{q_{veh,i}}{V_{moy,i} \times 1000}$$

Le niveau de puissance acoustique linéique total à un instant t peut donc s'écrire selon les densités VL et PL et le niveau de puissance acoustique linéique unitaire moyen VL et PL, tel que présenté dans l'Équation 23.

Équation 23 Formule de calcul du niveau sonore d'une route selon son trafic horaire

$$L \left(\sum_{VL+PL} veh_i \right) = 10 \log [d_{VL} 10^{\frac{L_{VL}}{10}} + d_{PL} 10^{\frac{L_{PL}}{10}}]$$

C/ Indicateur d'émission sonore

Le débit routier n'est pas homogène sur 24h. On peut calculer le niveau de puissance émise par la route à tout instant selon son trafic. Souvent, on considère des niveaux sonores sur 2 ou 3 périodes de la journée : soirée de 18 à 22h, journée de 6h à 18h (ou 22h si l'on ne différencie pas la soirée), et nuit de 22h à 6h. Les plages diurne (6h-22h) et nocturne (22h-6h) sont celles considérées dans la réglementation relative aux projets routiers, pour la monétarisation du calcul socioéconomique par exemple.

Pour calculer les trafics horaires à partir des TMJA VL et PL, la NMPB propose des formules en annexe 3 du document selon la route considérée (autoroute de liaison/routes interurbaines, fonction longue

distance/régionale) qui donnent la répartition typique des trafics VL et PL sur différentes plages horaires, en fonction du TMJA de chacune de ces deux catégories de véhicules. À titre d'exemple, nous donnons les formules adaptées aux autoroutes de liaison en fonction longue distance dans le Tableau 49. Il indique par exemple que le trafic horaire en VL entre période nocture vaut 1/82^{ème} du trafic journalier en VL.

Tableau 49 Formules de calcul du trafic horaire VL et PL d'une autoroute de liaison en fonction longue distance

	6H-22H	6H-18H	18H-22H	22H-6H
VL	TMJA(VL)/18	TMJA(VL)/17	TMJA(VL)/19	TMJA(VL)/82
PL	TMJA(VL)/20	TMJA(VL)/20	TMJA(VL)/20	TMJA(VL)/39

Nous sommes maintenant en mesure de calculer les niveaux de puissance sonore linéique d'un tronçon routier sur plusieurs périodes : en journée, en soirée, et la nuit.

Un indicateur de niveau sonore global (pondération jour-soirée-nuit) est souvent utilisé dans les cartes de bruit stratégiques afin de tenir compte de la « gêne » humaine provoquée par le bruit : il s'agit de l'indicateur L_{den} (pour day (6h-18h), evening (16h-22h) et night (22h-6h)), dans lequel des pénalités de 5 dB(A) et de 10 dB(A) sont attribuées respectivement aux périodes de soirée et de nuit. On le calcul selon l'Équation 24.

Équation 24 Calcul d'un indicateur pondéré sur 3 périodes de la journée, en fonction des niveaux de puissance L_d , L_n et L_e

$$L_{den} = 10 \log \left[\frac{1}{24} \left(12 \times 10^{\frac{L_d}{10}} + 4 \times 10^{\frac{L_e+5}{10}} + 8 \times 10^{\frac{L_n+10}{10}} \right) \right]$$

Nous proposons de retenir, dans notre méthode, un indicateur de puissance acoustique linéique émise pondéré sur la journée que nous noterons « $L_w/m,den$ ».

5.2.2.2 Prise en compte de l'évolution du niveau sonore routier avec l'âge du revêtement

L'effet du vieillissement du revêtement sur le bruit émis par une route est rarement pris en compte dans les évaluations des infrastructures de transport. Pourtant, c'est un phénomène important pour comparer l'intérêt de deux politiques de resurfacement en termes de bruit routier.

A/ État de l'art

Quelques études statistiques ont été réalisées pour comprendre les paramètres clés de l'évolution des propriétés acoustiques des revêtements de chaussée : il a été montré que la variable la plus explicative semble être l'âge du revêtement et non pas le trafic total (Anfosso-Lédée et Toussaint 2015; Hammer et al. 2015), le trafic lourd, ou encore les vitesses pratiquées (Anfosso-Lédée et Toussaint 2015). La plupart des études de régression du niveau acoustique à l'âge du revêtement ont été faites sur des intervalles d'âges de chaussées limités, souvent avec une borne supérieure autour de 10 ans. Les mesures acoustiques sur des revêtements plus âgés sont rares (Doisy 2007; Sétra 2009c; Kragh, Andersen, et Pigasse 2013; Hammer et al. 2015). Une comparaison internationale montre des régressions linéaires, logarithmiques ou exponentielles : il semble se dégager une dépendance des meilleures formes de corrélation entre niveau acoustique et âge du revêtement à la borne supérieure de l'intervalle d'âge considéré (Anfosso-Lédée et Toussaint 2015; Kragh, Andersen, et Pigasse 2013). Lorsque les coefficients de détermination ou de corrélation sont indiqués, ils semblent par ailleurs assez faibles, et d'autant plus que l'intervalle d'âge est large : à titre d'exemple, ils sont de l'ordre de 0.5-0.6 sur 8 ans, de 0.15-0.20 sur 20 ans et de 0.06-0.08 sur 26 ans en régressions linéaires pour un premier jeu de données routières néerlandais (Kragh, Andersen, et Pigasse 2013). Une étude réalisée sur des revêtements à faibles granulométrie et porosité ainsi que sur un intervalle de temps plus large (âge(max)=25 ans) montre que la meilleure forme de corrélation est de type log-normal (Hammer et al. 2015). Il faut toutefois signaler une fiabilité des résultats assez faible (représentée par des intervalles de confiance à 90% ou des R^2), et des corrélations très différentes selon les jeux de données,

avec des tendances très majoritaires de corrélations positives : le bruit de roulement augmente avec l'âge du revêtement. De rares corrélations négatives entre bruit de roulement et âge de revêtement ont cependant été mises en évidence (corrélations sur des BBTM 0/10 type 1 de la BDD de l'ex-LRPC de Strasbourg (Kragh, Andersen, et Pigasse 2013) et sur trois autoroutes allemandes sur des périodes de 2 à 9 ans (van Blokland, Tollenaar, et van Loon 2014)). Des tendances particulièrement peu fiables pour certains jeux de données sur les revêtements type BBTM, ECF et BBSG ont été signalées (jeu de données françaises pour le bruit de contact pneu-chaussées des VUL) (Kragh, Andersen, et Pigasse 2013).

B/ Modèle français de la NMPB

i/ Catégories de revêtements

Trois catégories de revêtements – R1, R2 et R3 – ont été déterminées (Tableau 50) par observation des niveaux sonores L_{Amax} sur environ 380 planches selon la procédure VI (véhicules isolés)²⁹² à T=20°C et v= 90 km/h. Cette catégorisation peut facilement être critiquée car il existe au sein de chaque technique une forte dispersion des niveaux acoustiques, e.g. jusqu'à 5dB(A) d'écart-type pour le BBTM 0/6 de type 2. Parmi ces revêtements, les plus utilisés en France sur routes interurbaines sont probablement les BBTM 0/10 sur le RA et les BBSG 0/10 sur le RD. Les ESU sont utilisés sur le RD selon les cultures locales et les budgets. Ainsi, les 3 classes sont importantes pour notre méthode.

Tableau 50 Classement des techniques de revêtement routier selon la catégorisation de la NMPB (Sétra 2009c)

R1	R2	R3
BBDR 0/6	BBTM 0/10-T2	BBSG 0/14
BBUM 0/6	BBDR 0/14	BBTM 0/14
BBTM 0/6-T2	BBM 0/10	ESU 6/8
BBDR 0/10	ECF	Béton de ciment
BBTM 0/6-T1	ES 4/6	ES 6/10
	BBTM 0/10-T1	ES 10/14
	BBSG 0/10	
	BBUM 0/10	

ii/ Effet du vieillissement

Ensuite, l'effet du vieillissement a été étudié pour des revêtements âgés de 2 à 10 ans. Au-delà, la NMPB tome 1 considère que le niveau de puissance d'émission reste stable, en-dehors de défauts de chaussée particuliers (qu'elle ne prend pas en compte). Néanmoins, à l'époque, les mesures de bruit étaient issues de planches souvent âgées de moins de 3 ans. Les nuages de points des niveaux d'émission sonore en fonction de l'âge de la couche de roulement pour chaque catégorie de revêtement ont ensuite été tracés, de même que leur courbe de tendance, et deux autres courbes : celle considérant L_{Amax} stable avec l'âge et celle considérant que L_{Amax} augmente de 1 dB(A) tous les 2 ans. Parmi ces deux dernières courbes, la droite la plus proche de la régression a été considérée comme hypothèse la plus probable. Des pentes d'évolution du niveau de puissance d'émission ont été définies à partir de ces traitements statistiques : elles sont discutables, comme expliqué précédemment, mais constituent toutefois la référence française.

Nous obtenons les niveaux de puissance indiqués dans le tableau proposés par la NMPB.

Tableau 51, arrondi au dB(A) près, et nous rappelons les effets de vieillissement du revêtement proposés par la NMPB.

²⁹² Méthode normalisée où les véhicules sont pris isolément dans le flot de circulation, en différenciant VL et PL 4/5 essieux

Tableau 51 Données de niveaux de puissance acoustique – composante moteur et composante roulement – par mètre de ligne de source sur un revêtement de 2 ans et effets du vieillissement, par application du modèle de la NMPB à nos routes interurbaines françaises, sans rampe, pour les vitesses de roulage indiquées dans le Tableau 29

	Lw/m – composante moteur (dB(A))			Lw/m – composante roulement (dB(A))									Effet du vieillessement de 2 à 10 ans (dB(A)/an)		
				R1			R2			R3					
	RD/RN	RE	RA	RD/RN	RE	RA	RD/RN	RE	RA	RD/RN	RE	RA	R1	R2	R3
1 PL	50	50	51	59	60	60	62	63	63	63	64	64	0.30	0.15	0.13
1 VL	42	43	43	49	50	52	53	54	56	55	57	58	0.50	0.25	0.20

L’hypothèse de stabilisation brutale de ces niveaux de puissance au-delà de 10 ans d’âge nous semble peu probable. Comme nous modélisons les effets des programmes d’entretien avec des périodes de resurfacement systématiquement supérieures à 10 ans dans la pratique, nous devons modéliser cette évolution postérieure. De plus, les lois retenues sont linéaires car les intervalles d’âges de revêtements considérés sont restreints. Or plusieurs auteurs suggèrent des lois plutôt logarithmiques ou de forme $y=1-\text{exponentielle}(-t)$ sur des temps longs (cf. état de l’art supra).

C/ Développement de modèles d’évolution sonore sur plusieurs décennies²⁹³

i/ Étude statistique des revêtements R1

Afin d’améliorer le modèle de vieillissement de la NMPB, nous avons obtenu la BDD de l’ex-LRPC de Strasbourg contenant des mesures de niveau acoustique au passage LMax(7.5m) dans sa version à jour au second semestre 2017 : elle est censée s’être largement étoffée depuis 2009, notamment comporter des mesures de planches âgées de plus de 10 ans. Cependant, le nombre de mesures à des âges supérieurs à 10 ans, tous revêtements confondus, est autour de 15, et la taille de l’échantillon total n’est que de 318 individus. Par type de revêtement de la NMPB, la taille des échantillons chute : de R1 à R3, respectivement 201, 13 et 98 individus, et pour ceux de plus de 2 ans (inclus) 88, 9 et 57 mesures.

Nous avons étudié la catégorie R1 et nous présentons quelques éléments de l’étude sur la Figure 57.

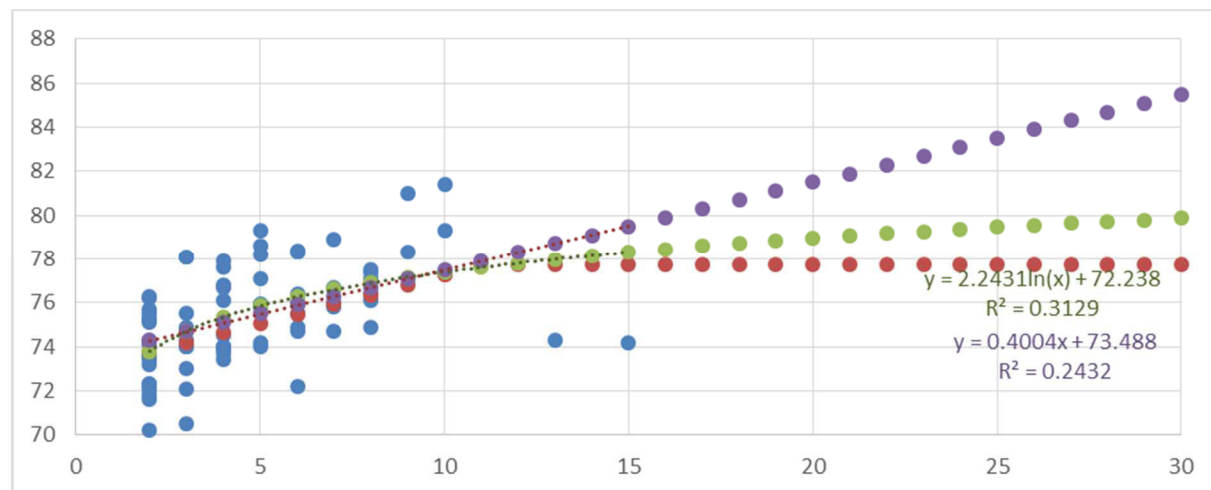


Figure 57 Mesures de niveaux sonores des revêtements R1 de la base de données acoustique de l'ex-LRPC de Strasbourg (bleu) et différents modèles d'évolution (régressions en pointillés, et leur extrapolation jusqu'à t=30 ans sous forme de points) : linéaire en violet (équation de la régression sur mesures), logarithmique en vert (équation de la régression sur mesures), et NMPB (Sétra 2009c) en rouge. En ordonnée : niveau sonore (dB(A)) ; en abscisse : âge du revêtement (ans).

²⁹³ Nous avons refait deux fois ces traitements statistiques. Le fichier de base doit être endommagé car par deux fois, la sauvegarde n'a pu fonctionner (perte de nos calculs).

Ce jeu de données présente des corrélations largement meilleures lorsque l'on ignore les mesures sur les revêtements de moins de 2 ans (le R^2 double). La corrélation de forme logarithmique est un peu meilleure que celle de forme linéaire comme on le voit sur la Figure 57. L'absence de mesures après 10 ans, hormis 2 mesures très basses, ne permet pas un travail de qualité pour évaluer l'évolution des niveaux de bruit au-delà de cet âge de revêtement ; néanmoins nous comparons 3 tendances : deux modèles basés sur les deux types de régression réalisés, et le modèle de la NMPB. Pour étudier ce modèle, on a calculé l'effet, sur le niveau sonore total, de l'incrément acoustique linéaire au temps de la composante roulement entre 2 et 10 ans sur un niveau de puissance acoustique total, pour un VL et un R1, incluant également la composante moteur. Les niveaux acoustiques n'étant pas additifs, ce calcul est nécessaire. Par exemple, alors que l'incrément annuel sur le niveau de puissance d'émission est de 0.5 dB(A)/an pour la composante roulement d'un VL, l'incrément sur le niveau de puissance total dépend de la vitesse et de l'âge du revêtement, et est présenté sur la Figure 58. Le niveau de puissance émise mesuré au passage à 7.5m se calcule selon une relation affine au temps selon l'Équation 25 et l'Équation 20.

Équation 25 Formule de passage entre niveau de puissance d'émission par mètre de ligne source et niveau de puissance acoustique maximal

$$L_{a,max} = L_{w/m}(t) + \log(Vmoy) + 30$$

Ainsi, on peut ajouter le même incrément temporel à $L_{a,max}$ et $L_{w/m}$, mais il est différent de celui de $L_{w/m,roulement}$ comme le montre la Figure 58. Nous avons pris en compte cette non-linéarité calculatoire dans notre approche comparative présentée sur la Figure 57 à une vitesse de référence de 90 km/h. Nous avons donc appliqué les incréments calculés pour $L_{w/m,tot}$ sur RD/RN. Notons au passage que cette rigueur de calcul ne change le niveau de puissance émise stabilisé après 10 ans que de 0.2 dB(A) par rapport à des calculs de $L_{a,max}$ appliquant l'incrément de la NMPB pour $L_{w/m}$ directement sur $L_{a,max}$, ce qui est bien en-deçà de l'erreur type sur des mesures acoustiques (2dB(A)).

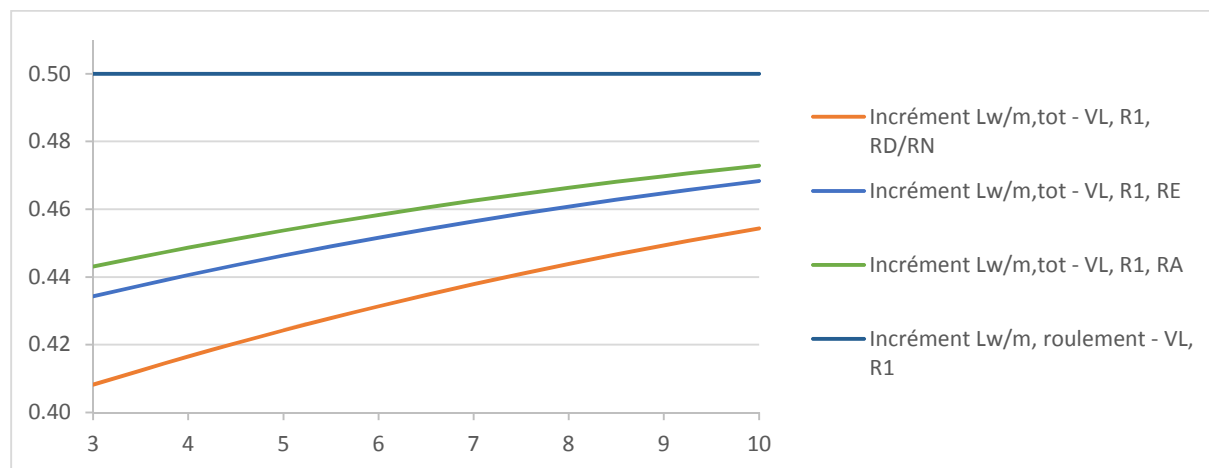


Figure 58 Incréments annuels de niveau de puissance selon l'âge du revêtement

Notre analyse de la comparaison des modèles d'évolution de niveau de puissance émise totale selon l'âge du revêtement est la suivante : le modèle linéaire donne des valeurs bien trop élevées sur revêtements âgés, tandis que le modèle de la NMPB n'a rien de convainquant du point de vue du sens physique. Nous proposons donc, faute de mieux, de retenir le modèle logarithmique mis en évidence sur l'échantillon ci-dessous pour les revêtements R1, malgré un coefficient de détermination de 0.31. Si l'incrément acoustique reste quasiment identique sur l'intervalle [2 ; 15] ans entre le modèle de la NMPB et le modèle logarithmique, la tendance paraît physiquement plus probable au-delà avec le modèle en logarithme qu'avec celui de la NMPB. Il semblerait important de creuser ces questions sur des échantillons plus étoffés, qu'il faudrait constituer avec des véhicules modernes en France.

ii/ Étude statistique des revêtements R2 et R3

Nous reproduisons cette approche pour les revêtements R2 et R3. Pour les revêtements R2, comme le montre la Figure 59, les corrélations sont meilleures sur un échantillon restreint aux mesures après 2 ans. Toutefois, cela peut s'expliquer tout d'abord par la faible taille de l'échantillon considéré (9 points ≥ 2 ans). Ces régressions, malgré des coefficients de détermination supérieurs aux résultats habituels de ce type d'exercices (de l'ordre de 0.5 ici), autant en linéaire qu'en logarithme népérien, restent peu fiables. Il faut néanmoins choisir entre le modèle linéaire, le modèle logarithmique et le modèle de la NMPB. Selon le modèle retenu pour les revêtements R1, le L_{Amax} moyen de ces revêtements va de 75 à 80 dB(A) entre 2 et 30 ans. Les revêtements R2 étant plus bruyants que les revêtements R1 selon la NMPB (75 dB(A) pour un « jeune » BBTM 0/10-T2 contre 78-79 dB(A) pour de « jeunes » BBSG 0/10 et 0/14), il est normal que notre modèle retranscrive ces tendances. Nous ne pouvons choisir le modèle d'évolution de la NMPB car il donne à tout moment des niveaux acoustiques plus faibles que ceux des revêtements R1 selon notre modèle. Le modèle linéaire présente des niveaux de puissance acoustique aberrants. Nous choisissons encore une fois, faute de mieux, le modèle logarithmique²⁹⁴, bien que le niveau de puissance calculé soit très élevé : environ 4 dB(A) de plus que les revêtements R1 à T= 30 ans, alors qu'une augmentation de 3 dB(A) représente déjà un doublement de l'énergie acoustique. Nous attirons de nouveau l'attention sur le besoin de mesures de terrain sur des revêtements plus âgés que ceux rapportés dans la base française existante.

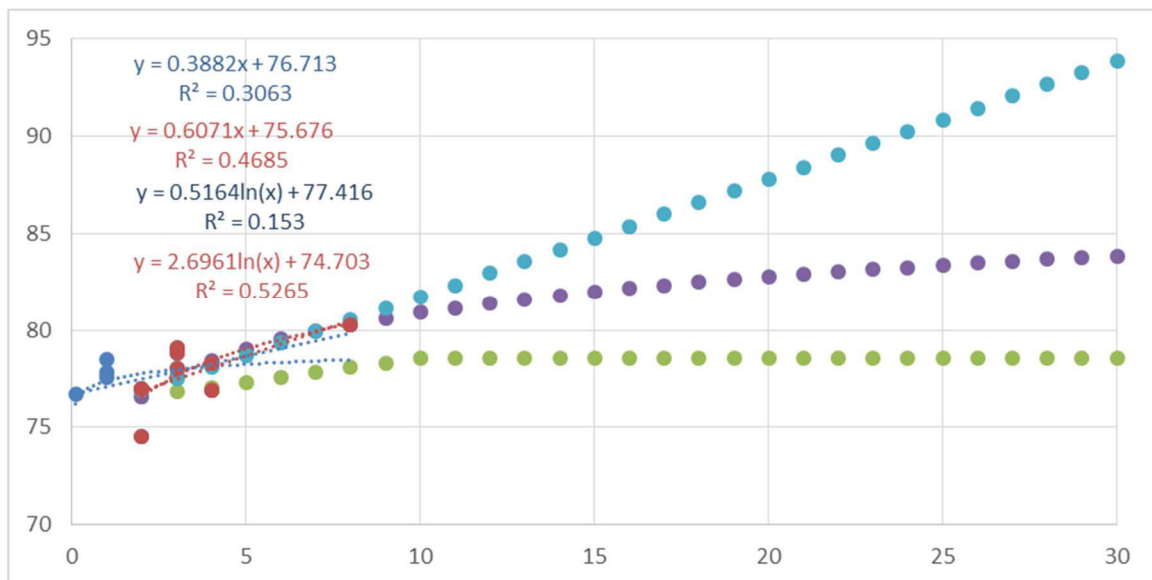


Figure 59 Mesures de niveaux sonores des revêtements R2 de la base de données acoustique de l'ex-LRPC de Strasbourg – mesures avant 2 ans en bleu foncé et entre 2 et 8 ans en rouge. Régressions sur les mesures après 2 ans en rouge et sur l'ensemble des points en bleu. Différents modèles d'évolution (régressions en pointillés, et leur extrapolation jusqu'à t=30 ans sous forme de points) : linéaire en bleu clair (équation de la régression sur mesures après 2 ans), logarithmique en violet (idem), et NMPB en vert. En ordonnée : niveau sonore (dB(A)) ; en abscisse : âge du revêtement (ans).

Les mesures de revêtements de catégorie R3 semblent indiquer une mauvaise segmentation de ces revêtements comme le montre la Figure 60 : les mesures sont très dispersées et aucune régression entre niveau de puissance d'émission et âge du revêtement n'apparaît.

²⁹⁴ Notons que le modèle logarithmique trouvé avec toutes les données est extrêmement proche du modèle de la NMPB : évolution de 77.4 à 79.2 dB(A) entre 0 et 30 ans. Cependant, son coefficient de détermination est extrêmement faible.

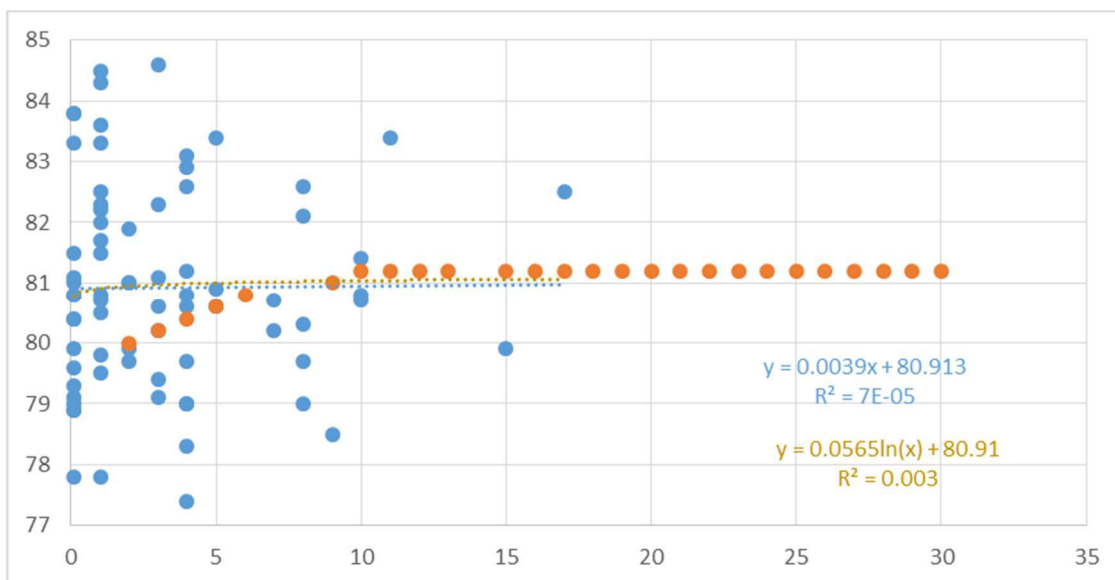


Figure 60 Mesures en bleu de Lmax sur revêtements R3 de la base de données de l'ex-LRPC de Strasbourg, tests de corrélations à l'âge du revêtement en bleu clair et jaune, et modèle NMPB en orange (formes de régression sur mesures (points bleus) en pointillés, et leur extrapolation jusqu'à t=30 ans sous forme de points). En ordonnée : niveau sonore (dB(A)) ; en abscisse : âge du revêtement (ans).

Nous avons testé diverses segmentations sur ces revêtements. Aucune segmentation, même par technique unique, ne permet de mettre en évidence de corrélations. Nous retenons donc le modèle de la NMPB : le niveau de puissance d'émission est bien supérieur aux autres classes de revêtement à T = 2 ans (80 dB(A)), en revanche les revêtements R2 deviennent plus bruyants que les revêtements R3 dès 7-8 ans d'âge.

iii/ Synthèse des lois VL développées et extrapolation PL

La comparaison précédente de modèles d'évolutions de niveaux de bruit de la NMPB et de ceux suggérés par les mesures françaises actualisées ne porte que sur les VL. Or, nous devons également considérer l'évolution des niveaux de bruit PL. Malheureusement, nous n'avons pas de données PL. La NMPB propose un incrément de vieillissement de niveau acoustique presque deux fois inférieur à celui des VL, mais les niveaux de puissance sont supérieurs à T= 2 ans d'environ 10 dB(A). Pour retranscrire « l'effet logarithmique » sur le bruit émis par les véhicules mis en évidence sur les mesures VL pour les catégories R1 et R2, et afin de tenir compte des effets respectifs du vieillissement entre VL et PL présentés dans la NMPB, nous proposons un incrément logarithmique de coefficient respectant une règle de proportionnalité avec les incréments de la NMPB²⁹⁵. Pour les revêtements R3, on conserve le modèle de la NMPB. Les formules de calcul de niveau de puissance acoustique considérées sont ainsi synthétisées dans le Tableau 52 pour les revêtements de plus de 2 ans ; avant cela, la composante du bruit de roulement est considérée stable.

Tableau 52 Formules de calcul de niveau de puissance acoustique unitaire (VL/PL) de notre méthode en fonction de l'âge t du revêtement, pour t > 2ans (Sétra 2009c)

	VL	PL
R1	$2.2\ln(t-1) + Lw/m(t=2 \text{ ans})$	$1.3\ln(t-1) + Lw/m(t=2 \text{ ans})$
R2	$2.7\ln(t-1) + Lw/m(t=2 \text{ ans})$	$1.6\ln(t-1) + Lw/m(t=2 \text{ ans})$
R3	$\begin{cases} 0.2(t - 2) + Lw/m(t = 2 \text{ ans}) \text{ si } t \in [2; 10] \\ Lw/m(t = 10 \text{ ans}) \text{ si } t > 10 \end{cases}$	$\begin{cases} 0.125(t - 2) + Lw/m(t = 2 \text{ ans}) \text{ si } t \in [2; 10] \\ Lw/m(t = 10 \text{ ans}) \text{ si } t > 10 \end{cases}$

²⁹⁵ Exemple pour R1 : le coefficient logarithmique pour les VL est de 2.24. Le coefficient de la NMPB est de 0.5 pour les VL et 0.3 pour les PL. On prend le coefficient logarithmique pour les PL de $2.2/0.5 \cdot 0.3 = 1.3$. Pour R2, on obtient un coefficient logarithmique de 1.6

5.2.2.3 Synthèse

La procédure de calcul acoustique a été décrite en détail précédemment. Nous la synthétisons ici :

1. Calcul des niveaux de puissance linéique émise par un PL et un VL pour un revêtement de catégorie Rx d'âge t – composante roulement seule avec le Tableau 52
2. Calcul du niveau de puissance linéique totale émise par un VL et un PL – composante moteur et roulement – avec les données du Tableau 48 et la formule d'additivité de l'Équation 21
3. Addition énergétique des niveaux sonores de tout le trafic (PL et VL) par période horaire jour, soirée, nuit, avec les Équation 22 et Équation 23 et le Tableau 49 par ligne source
4. Addition énergétique des lignes sources
5. Calcul de $L_{w/m,den,t}$ avec l'Équation 24
6. Sur un cycle d'entretien de x années, calcul *midpoint* du $L_{w/m,den,t}$ de chaque année et calcul de la moyenne annuelle du niveau d'émission sonore sur le cycle

Tous les calculs de niveaux sonores sont en dB(A).

Comme nous considérerons souvent un seul sens de la route à entretenir, nous considérerons le niveau sonore moyen des lignes Source du sens de chaussée non étudié comme étant égal à un niveau sonore de référence selon le revêtement à un âge moyen : on considérera qu'il est par exemple de 7 ans pour les autoroutes.

5.2.3 Indicateurs « *endpoint* » d'effet sanitaire du bruit

L'indicateur d'émission *midpoint* proposé ci-dessus ne tient pas compte des phases de propagation, réception, perception et effet sanitaire du bruit. Nous proposons ici un second indicateur, incluant toute la chaîne d'impact jusqu'au dommage sanitaire aux riverains (*endpoint*).

5.2.3.1 Revue de littérature

Ces dernières années, plusieurs travaux universitaires se sont penchés sur l'évaluation de l'impact sanitaire du bruit routier par analyse du cycle de vie (Meyer 2017; Meyer et al. 2017; Ongel 2016; Ongel et Sezgin 2016; Moliner Santistevé et al. 2014; Müller-Wenk 2004). Selon le cadre normalisé de l'ACV, la première étape quantitative de ce travail consiste en la constitution de l'inventaire de cycle de vie, soit la quantification des flux physiques entrants et sortants d'un système étudié et dont l'effet est néfaste (e.g. le niveau sonore), avant de calculer l'impact de ces flux sur l'environnement par le biais d'une méthode de caractérisation. Jolliet et al. (2005) définissent le facteur de caractérisation (FC) en ACV comme l'effet engendré par unité de substance de référence : un FC acoustique traduit l'effet sanitaire engendré par une unité de bruit.

Les travaux d'Ongel et al. (Ongel 2016; Ongel et Sezgin 2016) s'inspirent de l'approche de Müller-Wenk (2004) et présentent une méthode complète d'impact : la formule proposée compte un terme de variation de flux de puissance acoustique émise (i.e. incrément), un terme de propagation de l'onde sonore (« *fate* »), un terme d'effet du bruit sur chaque type d'individu (les effets sont différents par exemple entre enfants et adultes) et enfin un terme d'exposition (i.e. répartition et type de population). L'étude de cas développée porte sur Istanbul, et met en évidence des différences de FC de l'ordre de 10 entre les 9 quartiers de la ville. Elle calcule l'intérêt sanitaire d'une réduction de limite de vitesse routière à 70 km/h pour les citoyens en DALY. Cette approche présente de nombreuses similarités à celle menée par Moliner et al. (2014) mais semble plus poussée, et nécessite notamment nécessairement l'utilisation d'un logiciel acoustique spécialisé. A la perte d'années vécues en bonne santé du fait de la gêne sonore diurne (GD) et du trouble du sommeil (TS), Ongel ajoute les risques de mort prématurée dus aux infarctus du myocarde qui sont pour partie liés au niveau d'exposition sonore des individus. Néanmoins, selon Fritschi et al. (2011), ce dernier dommage représenterait moins de 10% du dommage acoustique total généré par le trafic routier en DALY.

D'autres travaux non spécifiques au bruit routier ont proposé des FC. Citons par exemple Cucurachi et Heijungs (2014) qui ont développé des FC pour des situations typiques (rural/périurbain/urbain, jour/soirée/nuit, etc., avec des conditions types de température, d'absorption acoustique et autres). Les travaux de Meyer (2017) se positionnent à l'intersection des approches de bruit en ACV respectivement initiées d'une part par Müller-Wenk (2004) et suivies par Ongel et al. (2016; 2016) qui utilisent des mesures locales, d'autre part par Cucurachi et Heijungs (2014) qui considèrent des situations typiques. Après avoir comparé ces approches, Meyer et al. (2017) rappellent qu'une évaluation sanitaire d'un changement incrémental de niveau sonore nécessite de tenir compte de situations locales variables (densité de population, bruit ambiant, topographie, conditions environnementales, etc.). Ainsi, ces conditions étant d'autant plus variables en milieu urbain dense, des typologies sont acceptables pour les routes interurbaines. Meyer (2017) développe dans son travail de doctorat des FC pour le Grand Lyon, se basant sur des densités de population renseignées à l'échelle de l'IRIS²⁹⁶, des types de véhicules routiers (VL, PL), une discrétisation jour/soirée/nuit et un rayon d'influence acoustique de 1000m (Meyer 2017). Plusieurs FC sont proposés : le calcul de dommage sanitaire lié à une variation de bruit routier peut être effectué à partir du seul incrément de puissance émise en joules (ou plus précisément en « J(A) », soit des joules pondérées A), ou à partir de cet incrément associé à une densité de population. Il propose également un FC « tout trafic », ou deux FC, un pour les VL et un pour les PL. Cette différence serait liée à une répartition des PL et des VL différente entre réseau métropolitain et routes périurbaines par exemple, d'où une population exposée qui varie fortement.

5.2.3.2 Méthodes proposées

L'objectif de notre méthode est de déterminer l'effet de politiques de resurfaçage sur l'impact sanitaire acoustique d'une route interurbaine. Le niveau sonore n'étant pas un flux et ne présentant pas d'additivité, on doit nécessairement baser un calcul de type ACV sur le flux d'énergie qui, lui, est additif. Comme c'est bien le niveau sonore pondéré selon la sensibilité de l'oreille humaine qui impacte la santé humaine, un calcul de dommage à la santé liée au bruit selon la méthode d'ACV nécessite de ne considérer que des incréments sonores relativement faibles afin que l'erreur liée à la linéarisation ne soit pas trop forte. Suite à notre revue de littérature (cf supra Section précédente 5.2.3.1), nous retenons 3 méthodes que nous pouvons utiliser sans logiciel de bruit spécialisé, et nous présentons lesquelles utiliser selon les données disponibles pour chaque cas d'étude dans le Tableau 53.

Tableau 53 Trois méthodes retenues pour le calcul d'impact sanitaire lié au bruit d'un tronçon routier : sélection (en gris) selon les données disponibles

Données requises	Méthode générique (Meyer 2017)	Méthode densité (Meyer et al. 2017)	Méthode exposition (Moliner Santistevé et al. 2014)
Niveau de puissance émise (dB(A) ou J(A))			
Densité de population (IRIS + option ruban de 1000m de large) (pers/km ²)			
Nombre de personne par niveau d'exposition (histogramme den/night)			

A/ Application de la méthode générique et de la méthode densité

i/ Calcul de l'énergie sonore émise par un tronçon routier

Ces deux méthodes nécessitent de calculer l'énergie sonore émise par la route. En différenciant les niveaux sonores le jour et la nuit, on calcule d'abord la puissance sonore émise par le trafic à un instant

²⁹⁶ IRIS : îlots regroupés pour l'information statistique, un des niveaux de collecte et de diffusion des données statistiques à l'échelle infra-communale utilisés par l'Insee en France

t à partir des niveaux de puissance linéique émise calculés précédemment de la manière décrite dans l'Équation 26, avec $W_0 = 1 \text{ pW} = 10^{-12} \text{ W}$ (Sétra 2009c).

Équation 26 Formule de calcul de puissance linéique émise à partir du niveau sonore linéique

$$W_{/m} = W_0 \times 1m \cdot 10^{\frac{L_{w/m}}{10}}$$

On intègre ensuite ces niveaux sonore sur la longueur l du tronçon routier étudié afin d'obtenir les puissances sonores moyennes de jour (W_j) et de nuit (W_n) selon l'Équation 27.

Équation 27 Calcul de la puissance acoustique émise par une route de longueur l en mètre

$$W = \int_0^l W_{/m} dl = W_{/m} \times l$$

On convertit ce résultat en énergie sonore émise en multipliant par la période temporelle considérée. Notre énergie sonore variant avec le vieillissement du revêtement, et ce dernier étant calculé sur un pas de temps d'un an, on multiplie donc W par 3600 secondes x 365 jours x le nombre d'heures de la période considérée (16 h pour la journée et 8h pour la nuit) afin d'obtenir E_j et E_n , respectivement les énergies sonores diurne et nocturne émises en J(A).

ii/ Application des méthodes

Pour ces méthodes, le calcul générique de dommage sanitaire sur la période temporelle Δt s'effectue selon la formule de l'Équation 28.

Équation 28 Formule générique de calcul de dommage sanitaire sur la période temporelle Δt

$$DALY_{\Delta t} = E_{\Delta t} \cdot CF_{\Delta t} = W_{\Delta t} \cdot \Delta t \cdot CF_{\Delta t}$$

Méthode générique

Selon la méthode générique, on peut directement calculer les impacts sanitaires absolus liés à ce bruit routier en multipliant l'énergie sonore émise le jour et la nuit par les facteurs de caractérisation respectifs (coefficient de détermination r^2 de 0.98 pour les troubles du sommeil et de 0.88 et 0.94 pour la gêne diurne) calculés par Meyer (2017): $FC_{\text{moy},j} = 6.61E-7 \text{ DALY/J(A)}$ et $FC_{\text{moy},n} = 1.25E-5 \text{ DALY/J(A)}$. Cette méthode est la plus rapide, mais se base sur des FC calculés sur le grand Lyon, donc en milieu urbain et périurbain. Ils sont peut-être mal adaptés à l'interurbain où les niveaux de trafic peuvent certes être très élevés, mais la densité de population bien plus faible. Notons également que les FC ci-dessus sont des FC pondérés : on pourrait respectivement diviser et multiplier par un facteur d'environ 10 ces FC pour obtenir les FC minimum et maximum²⁹⁷.

Méthode densité

La méthode densité présente l'avantage de calculer des impacts sanitaires soit absolus soit incrémentaux, qui se basent sur la densité de population à l'échelle spatiale de l'IRIS ou sur une bande de 1000m de large. La formule générique de calcul de ces FC est indiquée dans l'Équation 29 et les coefficients à appliquer selon la situation considérée sont extraits de Meyer (2017) et indiqués dans le Tableau 54. Ils diffèrent selon que l'on calcule un impact lié à un incrément de bruit ou un impact sanitaire absolu, et selon le trouble considéré.

Équation 29 Formule générique de calcul des coefficients de caractérisation liés au bruit routier

$$FC = a + \frac{d_{pop}^b}{d_j^c}$$

²⁹⁷ Discussion téléphonique avec R. Meyer en hiver 2018

Avec FC le facteur de caractérisation en DALY/J(A), d_{pop} la densité de population sur la zone considérée (en pers/km², à l'échelle de l'IRIS par exemple), et d_j la densité de joules sur la zone considérée en J(A)/km² sur la période temporelle adaptée : le jour pour la gêne diurne (GD), la nuit pour le trouble du sommeil (TS).

Tableau 54 Coefficients de calcul des facteurs de caractérisation d'impacts sanitaires du bruit selon la « méthode densité » (Meyer 2017)

Impact sanitaire		Gêne Diurne (GD)			Trouble du Sommeil (TS)		
Calcul		a	b	c	a	b	c
Absolu		1.48E-3	1.02	0.75	3.07E-5	1.32	0.84
Incrémental	VL	2.35E-5	0.89	0.46	4.39E-5	1.13	0.56
	PL	6.26E-5	0.88	0.54	6.67E-5	0.93	0.56

B/ Application de la méthode exposition

Cette méthode est assez différente et propose une approche absolue ou incrémentale, en se basant sur des données d'exposition de personnes en situation initiale à des intervalles de niveaux sonores de 5 dB(A) de jour et de nuit au-delà d'un niveau seuil considéré comme potentiellement gênant et jusqu'à une borne supérieure.

i/ Approche absolue

Si l'on connaît l'exposition au bruit dans un ruban de 1000m de large autour de la route, en considérant que la source de bruit provient uniquement de la route, on peut calculer le nombre de personnes soumises à une GD ou un TS par tranche de 5 dB(A).

On utilise pour cela deux approximations polynomiales : la formule de Miedema et Oudshoorn (2001) pour calculer %GD, soit le pourcentage de personnes qui ressentent une GD à un certain niveau de bruit, et la formule de Miedema et al (2003) pour %TS. Par praticité, on applique ce calcul par intervalle de niveau sonore de 5 dB(A) en prenant la valeur centrale de l'intervalle comme le font Moliner Santisteve et al. (2014).

Équation 30 Pourcentage de personnes présentant une GD à un certain niveau sonore L_{den}

$$\%GD = 9.868 \cdot 10^{-4} \times (L_{den} - 42)^3 - 1.436 \cdot 10^{-2} \times (L_{den} - 42)^2 + 0.5118 \times (L_{den} - 42)$$

Équation 31 Pourcentage de personnes présentant un TS à un certain niveau sonore L_n

$$\%TS = 0.01486 \times L_n^2 - 1.05 \cdot L_n + 20.8$$

On calcule ensuite l'impact sanitaire en DALY des différents impacts k et niveaux d'exposition sonore ΔLi selon l'Équation 32 (Theakston 2011).

Équation 32 Formule de calcul d'impact sanitaire DALY des différents effets négatifs du bruit k et niveaux d'exposition sonore ΔLi

$$DALY = \sum_k DALY_k = \sum_k DW_k I_k \delta_k = \sum_k [DW_k \cdot \delta_k \sum_{\Delta Li} [\% I_{k,\Delta Li} \cdot PE_{k,\Delta Li}]]$$

Avec DW_k le facteur d'incapacité lié à l'impact k donné par l'OMS (Fritschi et al. 2011), δ_k la durée moyenne de l'incapacité, prise égale à 1 an (Theakston 2011), I_k le nombre de cas concernés par l'impact k, qui se calcule à partir de $PE_{k,\Delta Li}$, population exposée à l'intervalle de niveaux de bruit ΔLi et à l'impact k, et de $\%I_{k,\Delta Li}$, pourcentage de la population sensible à l'effet k à un intervalle de niveau sonore ΔLi . Selon Fritschi et al (2011), $DW_{GD} = 0.02$ et $DW_{TS} = 0.07$.

Sans données récentes du type cartes de bruit ni connaissance sur la population exposée aux différents niveaux de bruit néfastes $PE_{\Delta L_{den}/n,i}$, on peut utiliser l'histogramme de population exposée aux

intervalles de niveaux de bruit à un instant t passé, y appliquer une distribution normale, et faire glisser cette distribution de l'augmentation moyenne de niveau de bruit en L_{den} et L_n .

ii/ Approche incrémentale

Calcul

La formule de l'Équation 32 peut ensuite être dérivée selon l'approche de Franco et al. (2010) afin de calculer le dommage différentiel, par effet sanitaire, selon les formules présentées dans l'Équation 33 pour calculer l'effet d'une variation de niveau sonore respectivement sur chacun des deux impacts sanitaires GD et TS dans la zone (Moliner Santistevé et al. 2014).

Équation 33 Variation du dommage sanitaire liée à l'effet I_k générée par une variation du niveau sonore d'exposition L entre 0 et t

$$\Delta DALY_k \approx \sum_{\Delta L_{den/n,i}} \left[\frac{d\%I_{k,\Delta L_{den/n,i}}(L_{den/n})}{dL_{den/n}} \cdot PE_{\Delta L_{den}} \right] \int_0^t dL(t)$$

Avec $PE_{\Delta L_{den/n,i}}$ la population exposée à l'intervalle de niveau de bruit $\Delta L_{den/n,i}$, L_{den} étant considéré pour les effets de GD et L_n étant considéré pour les TS, $\int_0^t dL(t)$ l'incrément sonore total entre l'instant $t=0$ et l'instant t , et $dL_{den/n}$ le pas d'incrément sonore élémentaire considéré.

Comparaisons de données espagnoles et françaises

Nous avons trouvé les estimation du nombre de personnes exposées au bruit par tranche de niveau sonore de 5 dB(A) au-delà de 55 dB(A) en moyenne journalière pondérée (L_{den}) et au-delà de 50 dB(A) pour la période nocturne (L_n) sur deux tronçons autoroutiers français (CETE de l'Ouest 2008). Ces données de population exposées au bruit correspondent à un tronçon de l'autoroute A81 de 37 km, entre l'échangeur A11/A81 et la limite de département Sarthe/Mayenne (PR 175-PR 211) ainsi qu'à un tronçon autoroutier de l'A11 de 54 km environ. Nous comparons maintenant ces données de nombre de personnes exposées par kilomètres à celles des 3 études de cas espagnoles de Moliner et al. (2014), sur la Figure 61. La densité de personnes exposées est (en L_{den}) plus faible autour des deux autoroutes françaises étudiées par comparaison aux 3 autoroutes espagnoles, sauf sur la catégorie 65-70 dB(A) pour l'A11 par exemple.

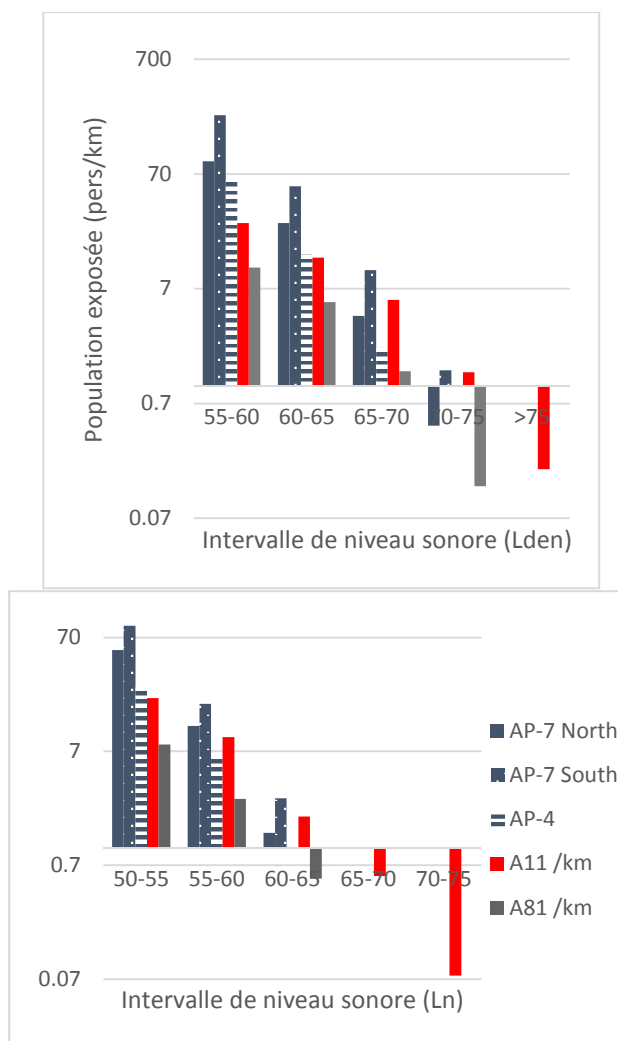


Figure 61 Comparaison de populations exposées au bruit autour de 3 autoroutes espagnoles (en bleu) et deux autoroutes françaises (tronçon de l'A81 en vert et de l'A11 en rouge) en échelle logarithmique

On vérifie ici la forte variabilité géographique des profils d'exposition relatifs à un même type d'infrastructure routière en France, en comparant par exemple le tronçon de l'A11 directement relié au tronçon de l'A81 déjà évoqué. Notons que des cartes de bruit routier doivent être réalisées pour les infrastructures portant un trafic de plus de 3 millions de véhicules par an, soit un TMJA d'environ 8000 UVP.

6 Indicateurs complémentaires pour l'environnement : biodiversité et ressources non renouvelables

Les enjeux environnementaux touchés par les stratégies d'entretien routier concernent les trois grandes catégories de dommages à l'environnement : impact à la santé humaine, dégradation de la biodiversité et consommation de ressources non renouvelables. Les impacts environnementaux plus détaillés ont été explorés dans le chapitre 2. L'impact à la santé ayant été inclus dans l'approche du riverain, nous traiterons ici du calcul d'indicateurs de dégradation de la biodiversité et de consommation de ressources non renouvelables uniquement. Comme pour la santé humaine, l'ACV laisse la possibilité d'utiliser de nombreux indicateurs *midpoint* – changement climatique, écotoxicités, consommation d'eau, etc. Cependant, nous retiendrons les deux indicateurs *endpoint* dans notre méthode par souci de lisibilité des résultats holistiques.

6.1 Dommages à la biodiversité

Comme pour le dommage à la santé humaine, plusieurs méthodes de caractérisation permettent de calculer un indicateur de perte de biodiversité par le biais d'un calcul de dégradation des écosystèmes. L'ILCD recensait les méthodes suivantes en 2011 : Eco-indicator 99, EPS 2000, CML2002, Impact 2002+, LIME, LUCAS, USEtox et ReCiPe. Depuis, de nouvelles versions de méthode ont été développées. Notons en particulier IMPACT World+, qui vient remplacer Impact 2002+. Le périmètre des effets et les substances considérées sont variés au sein des méthodes. Globalement, le dommage calculé selon la méthode IMPACT World+ tient compte de l'acidification et l'eutrophisation, de l'usage des sols et des écotoxicités. Notre choix se portera également sur IMPACT World+, méthode la plus récente et avancée scientifiquement. Son périmètre inclut les effets sur la biodiversité des phénomènes d'acidification marine (court et long termes), d'eau douce et terrestre, d'eutrophisation d'eau douce et marine, d'usage des sols, d'écotoxicités (court et long termes), de changement climatique (court et long termes), de radiations ionisantes, de pollution thermique des eaux et de disponibilité de l'eau (écosystèmes terrestres et aquatiques d'eau douce). Les effets du bruit en sont exclus.

Les unités caractérisant le niveau de dommages à la biodiversité sont divers, EPS et LUCAS se différenciant particulièrement. Pour les autres, cette perte est principalement exprimée en PDF.m².an, soit en anglais «Potentially Disappeared Fraction of species» : elle correspond au pourcentage d'espèces disparues sur une surface de territoire d'1m² pendant un an.

6.2 Consommation de ressources non renouvelables

Les mêmes méthodes de caractérisation permettent de calculer un indicateur de dommages aux ressources naturelles. Ce dommage peut représenter l'effet du prélèvement des deux types de ressources – biotiques et abiotiques – ou uniquement des ressources non renouvelables (ressources abiotiques). Dans le calcul de notre indicateur de dommages aux ressources, nous retenons de nouveau, pour les mêmes raisons que celles évoquées précédemment, la méthode IMPACT World+. La méthode propose de ne comptabiliser que l'impact aux ressources non renouvelables – ressources fossiles et minérales. On peut en effet considérer que le prélèvement de ressources renouvelables n'est néfaste pour l'environnement que s'il l'est pour la biodiversité. Dans ce cas, l'effet sera déjà inclus dans l'indicateur de dommages à la biodiversité via par exemple le prélèvement d'eau, le changement climatique (carbone biogénique issu de la biomasse) ou l'usage des sols.

Cet indicateur est calculé selon une approche de coût marginal, d'où son unité en dollar, monnaie d'échange internationale. Derrière cette approche se trouve bien la notion de rareté de la ressource : plus une ressource est rare, plus sa consommation va engendrer de surcoûts futurs pour son exploitation. Par exemple, on caractérise la facilité d'exploitation d'une ressource énergétique par l'EROI, soit le retour énergétique sur investissement. L'EROI du pétrole aujourd'hui se situe entre 50 et 80, i.e. il faut 1 baril de pétrole pour en extraire 50 à 80. Or, l'EROI de l'exploitation du pétrole diminue depuis le XX^{ème} siècle, donc chaque baril de pétrole consommé engendre un surcoût marginal pour extraire le baril suivant. C'est ce surcoût pour toutes les ressources fossiles et minérales qui est évalué par l'indicateur. Nous aurions pu changer l'unité en euros, néanmoins le dollar est l'unité d'échange internationale et réaliser une simple conversion dollar/euro au taux du jour n'aurait rien de cohérent avec la méthode sous-jacente.

7 Conclusion

Ce chapitre vient définir une architecture de méthode d'évaluation holistique de la performance du resurfaçage routier, dont le fonctionnement est détaillé par la Figure 62. Cette figure explicite le déroulement de protocole d'utilisation de la méthode : (1) définition du système de référence, (2) choix de la stratégie d'entretien à évaluer, (3) fonctionnement de l'algorithme de calcul, et enfin (4) sortie des indicateurs de performance durable de la stratégie évaluée.

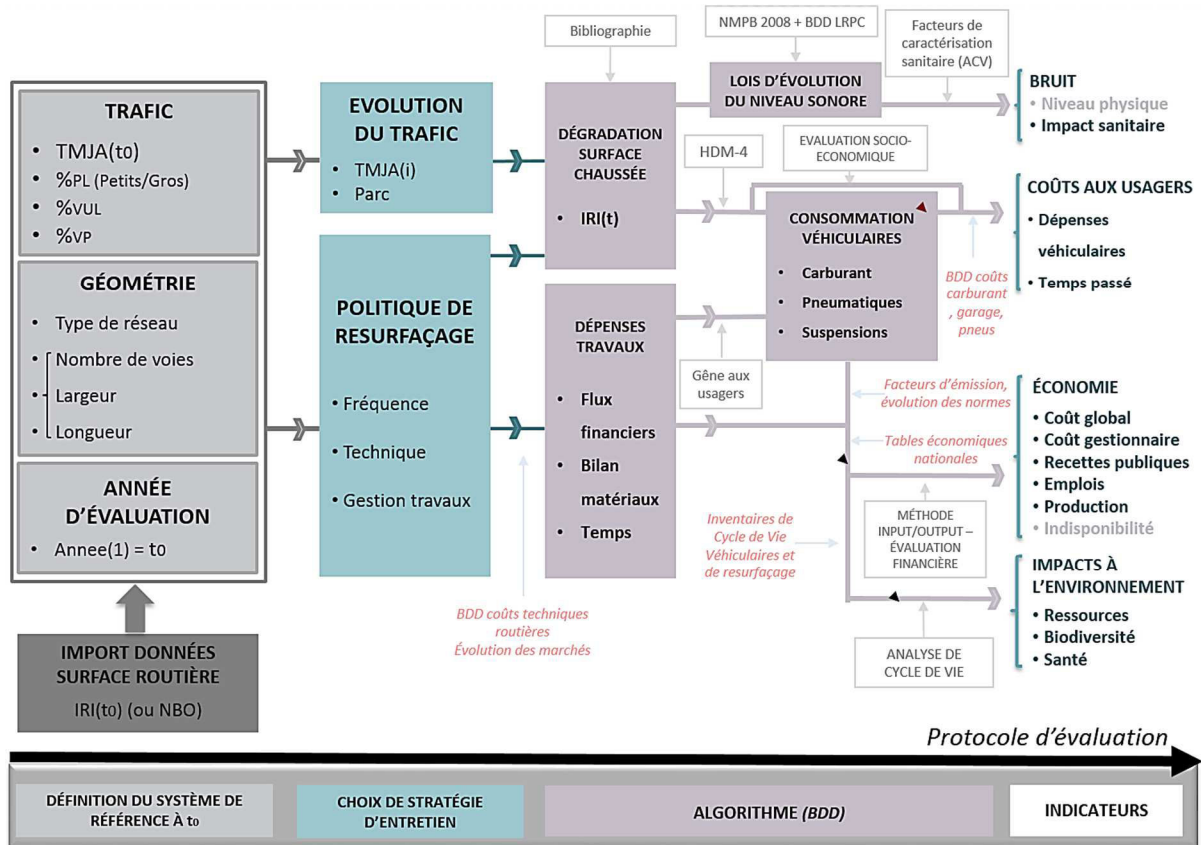


Figure 62 Architecture de la méthode d'évaluation des stratégies de resurfaçage

Les parties (1) et (2) du protocole nécessitent l'intervention de l'analyste. Le bloc (3) du protocole, constitué de l'algorithme de calcul des indicateurs, a été développé dans ce chapitre et peut soit être considéré comme une boîte noire, soit être modifié pour réaliser des analyses de sensibilité ou une contextualisation fine dans un cas d'étude précis. Chacune des boîtes grises représente un sous-modèle développé dans ce chapitre spécifiquement pour la question de l'évaluation de l'entretien routier en France. Les blocs blancs explicitent les modèles ou méthodes mis à contribution dans le calcul. Les indications en rouge pointent les bases de données spécifiques constituées dans ce travail de thèse (précédemment, ou dans le chapitre suivant dans le cas des inventaires de cycle de vie). Le bloc (4) de la méthode présente les résultats d'impacts pour toutes les parties prenantes du problème de l'entretien, selon la sélection d'indicateurs proposées dans ce chapitre. Aux 11 indicateurs proposés, on peut au besoin ajouter un indicateur d'indisponibilité pour le gestionnaire, ou substituer l'indicateur d'impact sanitaire du bruit routier par un indicateur de niveau sonore physique moyen, au choix de l'analyste.

À partir des caractéristiques d'un tronçon routier – trafic, géométrie – et de données d'état de surface (IRI ou NBO), elle permet d'évaluer les impacts d'une politique de resurfaçage sur toute la durée de vie de chaussée, via 11 indicateurs couvrant à la fois les nuisances à toutes les parties prenantes de l'entretien routier et les objectifs de développement durable (Figure 63). Ces indicateurs sont respectivement l'impact sanitaire du bruit et des pollutions pour les riverains, les dépenses des usagers et leur temps perdu, le coût global à la société, le coût d'entretien pour le gestionnaire, les recettes publiques, l'emploi, la production, et deux indicateurs de dommage à l'environnement : atteinte à la biodiversité et consommation de ressources non renouvelables. L'analyste est ensuite en mesure de comparer la performance holistique de plusieurs politiques de resurfaçage sur la durée de vie de la chaussée.

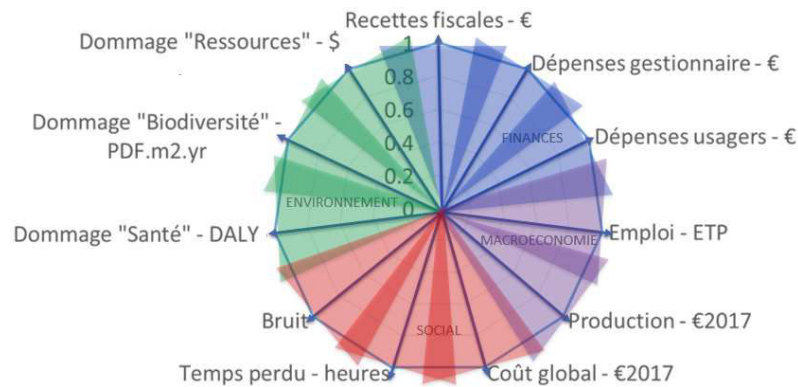


Figure 63 Sélection d'indicateurs proposée – à caractère principalement environnemental en vert, social en rouge, financier en bleu et macroéconomique en violet

Cette méthode estime d'abord les consommations physiques routières et véhiculaires en fonction du programme d'entretien et de l'état de surface de la route qui en découle, ce qui permet ensuite un calcul en cascade vers d'autres quantifications physiques et monétaires. Des modèles de coûts dynamiques ont été développés en fonction de l'IRI de la chaussée pour les pneumatiques, les systèmes de suspension et les carburants, en fonction des coûts d'utilisation actuels, des comportements routiers, et des modèles de coûts véhiculaires calés relativement récemment aux USA que nous avons adaptés aux conditions françaises (Chatti et Zaabar 2012). Un modèle simple de coût des techniques routières est également proposé, basé sur une enquête réalisée auprès des gestionnaires de l'interurbain en France et sur une étude économiques de données de l'INSEE. Un apport original a également été apporté en terme de calcul d'impact sanitaire du bruit routier, retravaillant d'anciens modèles de prise en compte du vieillissement des surface routières dans les niveaux d'émission de bruit et utilisant les résultats d'une thèse très récente sur le calcul de l'impact sanitaire du bruit routier par ACV (Meyer 2017). Le calcul des impacts macroéconomiques est proposé selon une analyse de Leontief. Enfin, un modèle original de temps perdu par les usagers selon le programme d'entretien a été développé, tenant compte à la fois de la gêne liée aux travaux et du temps passé à entretenir le véhicule et à faire le plein d'essence.

L'ensemble d'indicateurs proposé, s'il a été finement étudié, n'est pas définitif. Particulièrement, dans l'approche par ACV, le choix d'indicateurs orientés dommages plutôt que problème a l'avantage de transcrire la qualité environnementale d'une variante de manière concise, mais reste moins détaillée qu'un set d'indicateurs *midpoint* qui pourrait tout à fait être envisagé dans le cas d'une évaluation uniquement environnementale. Cependant, ce choix a été fait afin d'aboutir à un set d'indicateur assez concis pour que les résultats restent entièrement appréhendables (cf. surcharge cognitive évoquée au chapitre 3 sur les indicateurs et leur utilité).

Enfin, le modèle développé dans ce chapitre n'est pas tout à fait utilisable en l'état. Un certain nombre de données ont été construites pour permettre le calcul, néanmoins il nécessite encore la construction de données d'ICV pour le calcul des 3 indicateurs environnementaux sélectionnés. Nous présentons cette construction au chapitre suivant.

8 Bibliographie

AFNOR. 2000. « NF EN ISO 14042 Mai 2000 (ANNULÉE le 05/10/2006) - Management environnemental - Analyse du cycle de vie - Évaluation de l'impact du cycle de vie ». <https://www.boutique.afnor.org/norme/nf-en-iso-14042/management-environnemental-analyse-du-cycle-de-vie-evaluation-de-l-impact-du-cycle-de-vie/article/880315/fa049132>.

———. 2004. « NF P01-010 Décembre 2004 (ANNULÉE le 06/08/2016) - Qualité environnementale des produits de construction - Déclaration environnementale et sanitaire des produits de construction ». <https://www.boutique.afnor.org/norme/nf-p01-010/qualite-environnementale-des-produits-de-construction-declaration-environnementale-et-sanitaire-des-produits-de-construction/article/663460/fa136284>.

———. 2006a. « NF EN ISO 14040 Octobre 2006 - Management environnemental - Analyse du cycle de vie - Principes et cadre ». <https://www.boutique.afnor.org/norme/nf-en-iso-14040/management-environnemental-analyse-du-cycle-de-vie-principes-et-cadre/article/704298/fa140281>.

———. 2006b. « NF EN ISO 14044 Octobre 2006 - Management environnemental - Analyse du cycle de vie - Exigences et lignes directrices ». <https://www.boutique.afnor.org/norme/nf-en-iso-14044/management-environnemental-analyse-du-cycle-de-vie-exigences-et-lignes-directrices/article/651688/fa138266>.

———. 2010. « NF EN 15643-1 Décembre 2010 - Contribution des ouvrages de construction au développement durable - Évaluation de la contribution au développement durable des bâtiments - Partie 1 : cadre méthodologique général ». <https://www.boutique.afnor.org/norme/nf-en-15643-1/contribution-des-ouvrages-de-construction-au-developpement-durable-evaluation-de-la-contribution-au-developpement-durable-des-ouvrage/article/713907/fa160585>.

———. 2012. « NF EN 15804 Août 2012 (ANNULÉE le 26/04/2014) - Contribution des ouvrages de construction au développement durable - Déclarations environnementales sur les produits - Règles régissant les catégories de produits de construction ». <https://www.boutique.afnor.org/norme/nf-en-15804/contribution-des-ouvrages-de-construction-au-developpement-durable-declarations-environnementales-sur-les-produits-regles-re/article/753567/fa165263>.

———. 2013. « NF EN 16271 Février 2013 - Management par la valeur - Expression fonctionnelle du besoin et cahier des charges fonctionnel - Exigences pour l'expression et la validation du besoin à satisfaire dans le processus d'acquisition ou d'obtention d'un produit ». <https://www.boutique.afnor.org/norme/nf-en-16271/management-par-la-valeur-expression-fonctionnelle-du-besoin-et-cahier-des-charges-fonctionnel-exigences-pour-l-expression-et-la-validation/article/669103/fa164075>.

———. 2014. « NF EN 15804+A1 Avril 2014 - Contribution des ouvrages de construction au développement durable - Déclarations environnementales sur les produits - Règles régissant les catégories de produits de construction ». <https://www.boutique.afnor.org/norme/nf-en-15804a1/contribution-des-ouvrages-de-construction-au-developpement-durable-declarations-environnementales-sur-les-produits-regles-re/article/819047/fa184203>.

———. 2016. « F EN 13108-8 Octobre 2016 Mélanges bitumineux - Spécifications pour le matériau - Partie 8 : agrégats d'enrobés ». <https://www.boutique.afnor.org/norme/nf-en-13108-8/melanges-bitumineux-specifications-pour-le-materiau-partie-8-agregats-d-enrobes/article/814543/fa179879>.

Agence Européenne de l'Environnement. 2005. *EEA Core Set of Indicators: Guide*. Luxembourg: Publications Office. http://www.eea.europa.eu/publications/technical_report_2005_1/at_download/file.

Allard-Prigent, Céline, Cédric Audenis, Karine Berger, Nicolas Carnot, Sandrine Duchene, et Fabrice Pesin. 2002. « PRESENTATION DU MODELE MESANGE - Modèle Econométrique de Simulation et d'Analyse Générale de l'Economie ». Document de travail. Ministère de l'Economie, des Finances et de l'Industrie. <https://www.tresor.economie.gouv.fr/Ressources/file/326640>.

Bertrand, Thomas, Laure Martel, William Margheriti, et Aurianne Vienney. 2015. « Analyse des coûts d'exploitation des véhicules pour les usagers ». Archives de l'ENPC. Analyse des coûts d'exploitation des véhicules pour les usagers. France: Ecole des Ponts ParisTech.

Blanquier, A. 1984. *Sélection des investissements aux niveaux national et régional*. Sciences économiques. Paris: Dunod.

Branchu, P, A.L Badin, B Béchet, L Eisenlohr, T Le Priol, F Marseille, et E Trielli. 2013. « Pollution d'origine routière et environnement de proximité ». *Vertigo*, n° Hors Série (février).

Bryce, James, Joao Santos, Gerardo Flintsch, Samer Katicha, Kevin McGhee, et Adelino Ferreira. 2014. « Analysis of Rolling Resistance Models to Analyse Vehicle Fuel Consumption as a Function of Pavement Properties ». In *Asphalt Pavements*, par Y Kim, 263-73. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b17219-39>.

Bureau, Dominique, Pierre Picard, et Bernard Salanié. 2007. *Développement durable, Majeure d'Eco-Sciences, Année 3, ECO565*. Palaiseau: École polytechnique.

Cabannes, Pierre-Yves, Hélène Erkel-Rousse, Caroline Klein, Guy Lalanne, Olivier Monso, Erwan Pouliquen, et Olivier Simon. 2012. « Survol de Mésange : un modèle macroéconomique à l'usage du praticien ». *Economie et Statistique*, n° n°451-453.

CAS. 2005. « Révision du taux d'actualisation des investissements publics ». Commissariat Général du Plan. http://metroauxrigollots.fr/archives/pdf/SW54/Rapport_Lebegue_Revision_Taux_Actualisation_Investissements_Publics.pdf.

Cerema. 2014. « Uni longitudinal - Etat de l'art et recommandations ».

Charlot-Valdieu, Catherine, et Philippe Outrequin. 2013. *Coût global des bâtiments et des projets d'aménagement mode d'emploi*. Paris: Ed. Le Moniteur.

Cohen, Simon, et Mehdi Danech-Pajouh. 2000. « Initiation à l'ingénierie du trafic routier ». Support de cours.

Daniel, Geoffrey, Vianney Behaghel, Quentin Deslot, et Farcette. 2017. « Infrastructures routières et critères de performance environnementale dans les marchés publics ». Archives de l'ENPC. Rapport de Groupe d'Analyse de l'Intervention Publique pour le Mastère PAPDD. Ecole des Ponts ParisTech.

Delanne, Yves. 2008. « Mesure et analyse de l'uni des chaussées ». LCPC.

Duron, Philippe, et Ministère des transports, de la mer et de la pêche. 2013. « Mobilité 21 - « Pour un schéma national de mobilité durable » ». Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie. http://www.ladocumentationfrancaise.fr/docfra/rapport_telechargement/var/storage/rapports-publics/134000396.pdf.

European Commission, Joint Research Centre, et Institute for Environment and Sustainability. 2011. *International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook: Framework and Requirements for Life Cycle Impact Assessment Models and Indicators*. Luxembourg: Publications Office.

Fouqueray, Etienne. 2016. « Evaluation de l'impact économique de court terme et de moyen terme des chantiers de grandes infrastructures de transport - Le cas de la LGV SEA Tours-Bordeaux ». Université de Poitiers - Faculté de Sciences économiques.

Greene, Suzanne, Mehdi Akbarian, Frank-Josef Ulm, et Jeremy Gregory. 2013. « Pavement Roughness and Fuel Consumption ». MIT - Concrete sustainability hub.

Haider, Syed Waqar, Wouter C. Brink, et Neeraj Buch. 2016. « Local Calibration of Flexible Pavement Performance Models in Michigan ». *Canadian Journal of Civil Engineering* 43 (11): 986-97. <https://doi.org/10.1139/cjce-2015-0556>.

Hetzel, Jean. 2009. *Indicateurs du développement durable dans la construction*. La Plaine-Saint-Denis: AFNOR.

Jolliet, Olivier, Myriam Saadé-Sbeith, Shanna Shaked, Alexandre Jolliet, et Pierre Crettaz. 2016. *Environmental life cycle assessment*. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group.

Jolliet, Saadé, et Crettaz. 2005. *Analyse du cycle de vie - Comprendre et réaliser un écobilan*. Gérer l'environnement. Presses polytechniques et universitaires romandes.

Leontief, Wassily W. 1936. « Quantitative Input and Output Relations in the Economic Systems of the United States ». *The Review of Economics and Statistics* 18 (3): 105. <https://doi.org/10.2307/1927837>.

Leurent, Fabien, et Elisabeth Windisch. 2013. « Electric vs. Gasoline-powered vehicles: the effects on a nation's economic production and public finances ». *Routes/Roads*, n° n°357. <https://routesroadsmag.piarc.org/en/Routes-Roads-Magazine-Issue-357-Climate-Change/1685,Routes-Roads-Magazine-Electric-Vs-Gasoline-Effects-Economy-Finances#c3e63u7JL70>.

Levrel, Harold. 2006. « Biodiversité et développement durable : quels indicateurs ? » EHESS. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00128430/document>.

McGhee, Kevin, et James Gillespie. 2006. « Impact of a Smoothness Incentive/Disincentive on Hot-Mix Asphalt Maintenance Resurfacing Costs ». FHWA/VTRC 06-R28, VTRC 06-R28. <https://ntl.bts.gov/lib/37000/37300/37317/06-r28.pdf>.

Quinet, E, et al. 2013. « L'évaluation socioéconomique des investissements publics - Rapport final ». Tome 1.

Quirion, Philippe. 2013. « L'effet net sur l'emploi de la transition énergétique en France : une analyse input-output du scénario négaWatt ». Document de travail No 46-2013. CIRED. <http://www2.centre-cired.fr/IMG/pdf/CIREDWP-201346.pdf>.

Ramsey, F. P. 1928. « A Mathematical Theory of Saving ». *The Economic Journal* 38 (152): 543. <https://doi.org/10.2307/2224098>.

Santero, Nicholas J., Eric Masanet, et Arpad Horvath. 2011a. « Life-Cycle Assessment of Pavements. Part I: Critical Review ». *Resources, Conservation and Recycling* 55 (9-10): 801-9. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.03.010>.

———. 2011b. « Life-Cycle Assessment of Pavements Part II: Filling the Research Gaps ». *Resources, Conservation and Recycling* 55 (9-10): 810-18. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.03.009>.

Santos, Joao. 2015. « A comprehensive life cycle approach for managing pavement systems ». Portugal: Universidade de Coimbra. <https://estudogeral.sib.uc.pt/bitstream/10316/30093/1/A%20Comprehensive%20Life%20Cycle%20A%20approach%20for%20Managing%20Pavement%20Systems.pdf>.

Sayers, Michael, et Steven Karamihas. 1998. « The little book of profiling - basic information about measuring and interpreting road profiles ». The Regent of the University of Michigan. <http://www.umtri.umich.edu/content/LittleBook98R.pdf>.

Trupia, Laura, Tony Parry, Luis C. Neves, et Davide Lo Presti. 2017. « Rolling Resistance Contribution to a Road Pavement Life Cycle Carbon Footprint Analysis ». *The International Journal of Life Cycle Assessment* 22 (6): 972-85. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1203-9>.

Tseng, Ester. 2012. « Construction of Pavement Performance Models for Flexible Pavement Wheelpath Cracking and IRI for the California Department of Transportation New Pavement Management System ». Thèse de Master. California, USA: UC Davis. <https://search.proquest.com/openview/c0d1baa8afc851c4962b1399cc5d5b3b/1?pq-origsite=gscholar&cbl=18750&diss=y>.

UICN. 2014. *Indicateurs de biodiversité pour les collectivités territoriales: cadre de réflexion et d'analyse pour les territoires*. Paris: Comité français de l'UICN.

Vaillancourt, Michel, Daniel Perraton, Pierre Dorchies, et Guy Doré. 2003. « Décomposition Du Pseudo-Profil et Analyse de l'indice de Rugosité International (IRI) ». *Canadian Journal of Civil Engineering* 30 (5): 923-33. <https://doi.org/10.1139/I03-070>.

Védie, Henri-Louis. 2011. *Macroéconomie*. Paris: Dunod.

Wang, Ting, John Harvey, et Alissa Kendall. 2013. « Network-Level Life-Cycle Energy Consumption and Greenhouse Gas from CAPM Treatments ». Research Report UCPRC-RR-2014-05. University of California Pavement Research Center UC Davis, UC Berkeley.

———. 2014a. « Supplementary material for “Reducing greenhouse gas emissions through strategic management of highway pavement roughness” ». UC Davis.

———. 2014b. « Reducing greenhouse gas emissions through strategic management of highway pavement roughness ». *Environmental Research Letters* 9 (3): 034007. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/3/034007>.

Wang, Ting, In-Sung Lee, Alissa Kendall, John Harvey, Eul-Bum Lee, et Changmo Kim. 2012. « Life Cycle Energy Consumption and GHG Emission from Pavement Rehabilitation with Different Rolling Resistance ». *Journal of Cleaner Production* 33: 86-96. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.05.001>.

Wang, Ting, I-S Lee, John Harvey, Alissa Kendall, E.B Lee, et C. Kim. 2012. « UCPRC Life Cycle Assessment Methodology and Initial Case Studies on Energy Consumption and GHG Emissions for Pavement Preservation Treatments with Different Rolling Resistance ». UCPRC-RR-2012-02. California, USA: University of California Pavement Research Center UC Davis, UC Berkeley. <http://www.ucprc.ucdavis.edu/PDF/UCPRC-RR-2012-02.pdf>.

Wang, X C, et L Sanders. 2012. « Energy Consumption and Carbon Footprint of High-Speed Rail Projects: Using CAHSR and FHSR as Examples ». *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit* 226 (1): 26-35. <https://doi.org/10.1177/0954409711404641>.

Weisser, Daniel. 2007. « A Guide to Life-Cycle Greenhouse Gas (GHG) Emissions from Electric Supply Technologies ». *Energy* 32 (9): 1543-59. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2007.01.008>.

Wubneh, M. 2008. « US Highway 17 and its impact on the economy of eastern North Carolina ». Urban & Regional Planning Program Department of Geography East Carolina University.

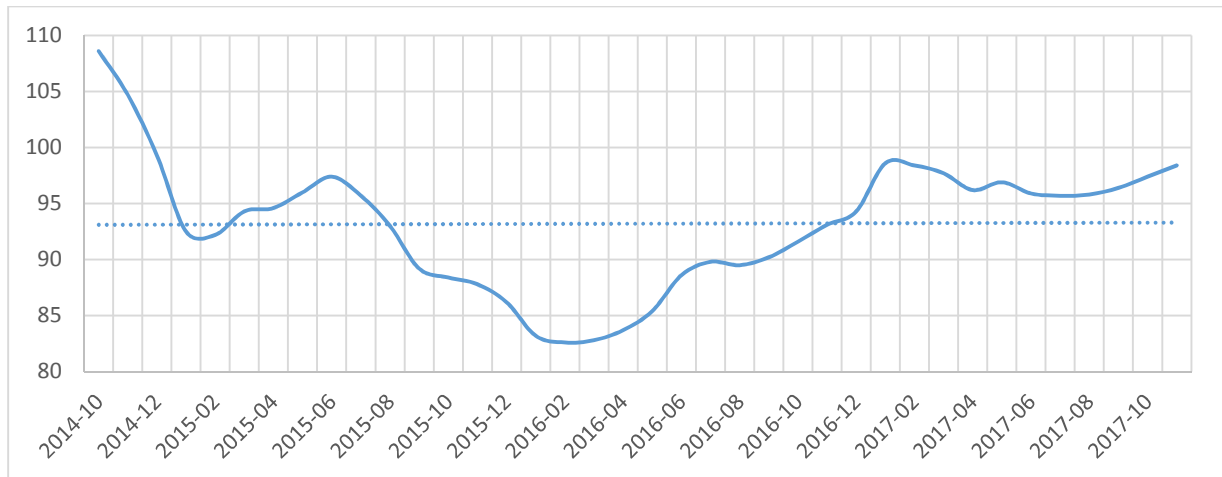
Yang, Rebekah. 2014. « Development of a pavement life cycle assessment tool utilizing regional data and introducing an asphalt binder model ». Urbana, Illinois: University of Illinois at Urbana-Champaign. https://www.ideals.illinois.edu/bitstream/handle/2142/50651/Rebekah_Yang.pdf?sequence=1.

Yang, Rebekah, Seunggu Kang, Hasan Ozer, et Imad L. Al-Qadi. 2015. « Environmental and Economic Analyses of Recycled Asphalt Concrete Mixtures Based on Material Production and Potential Performance ». *Resources, Conservation and Recycling* 104 (novembre): 141-51. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.08.014>.

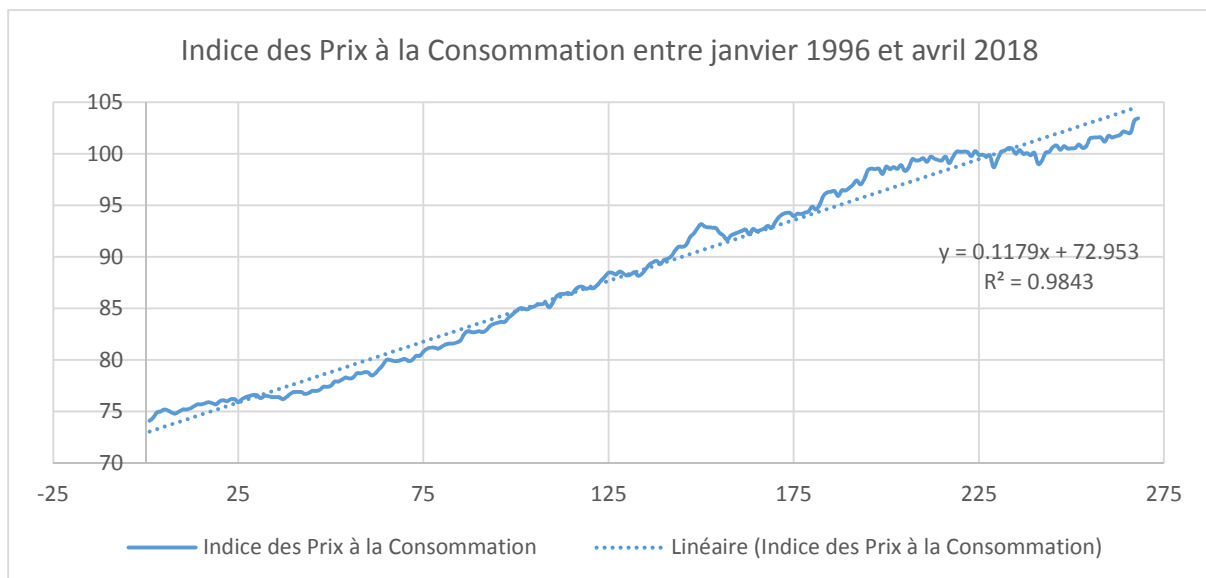
Yu, Bin, et Qing Lu. 2012. « Life Cycle Assessment of Pavement: Methodology and Case Study ». *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 17 (5): 380-88. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2012.03.004>.

9 Annexes

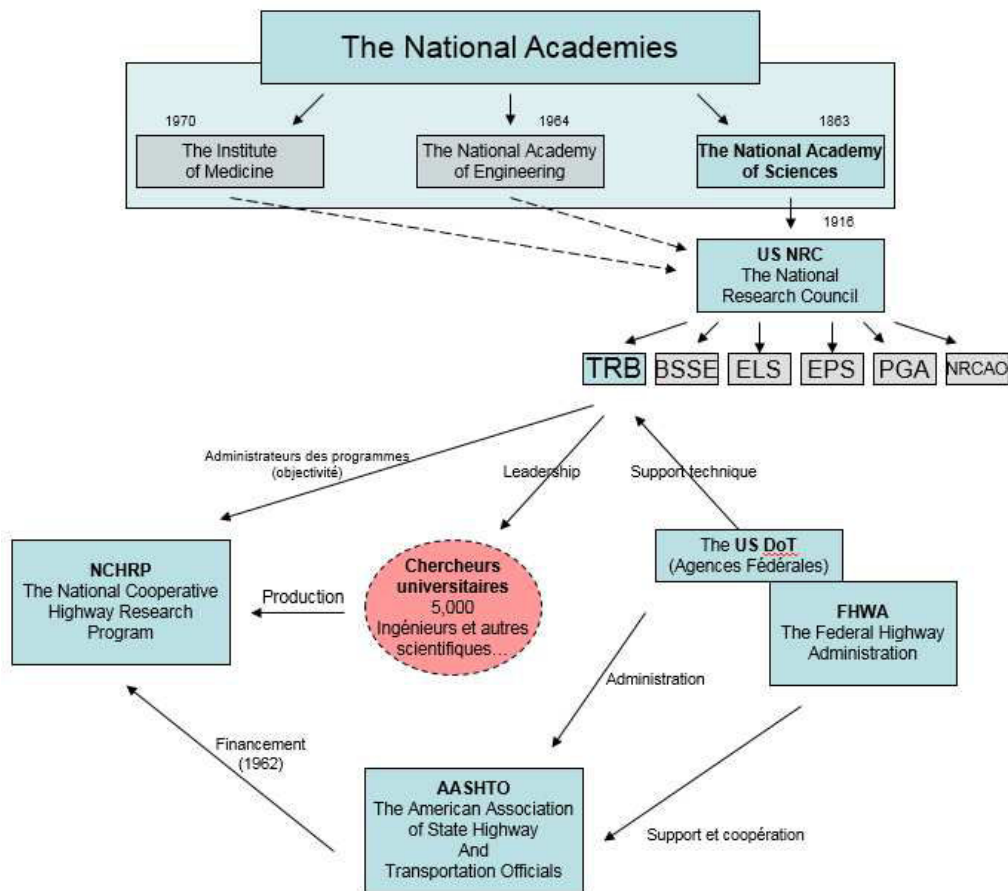
Annexe 57. Fluctuation de l'Index TP09 relatif au marché des travaux d'enrobés routiers entre 2014 et 2017 (Source : auteur ; chiffres : INSEE, base 2010)



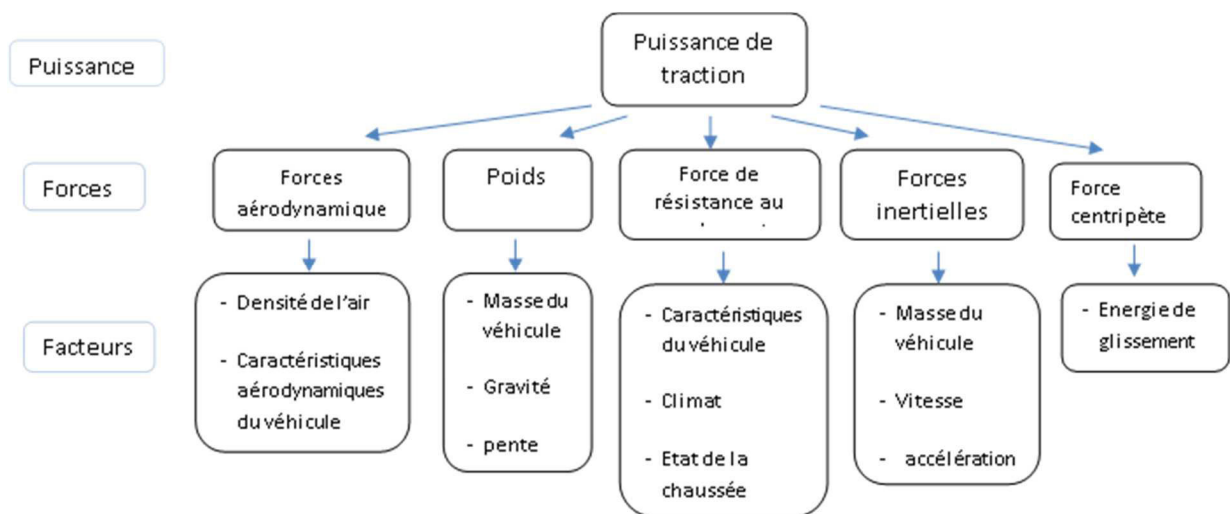
Annexe 58. Indice des Prix à la Consommation entre janvier 1996 et avril 2018 et régression linéaire (source : auteur ; données INSEE)



Annexe 59. Académie américaine et acteurs de la recherche routière

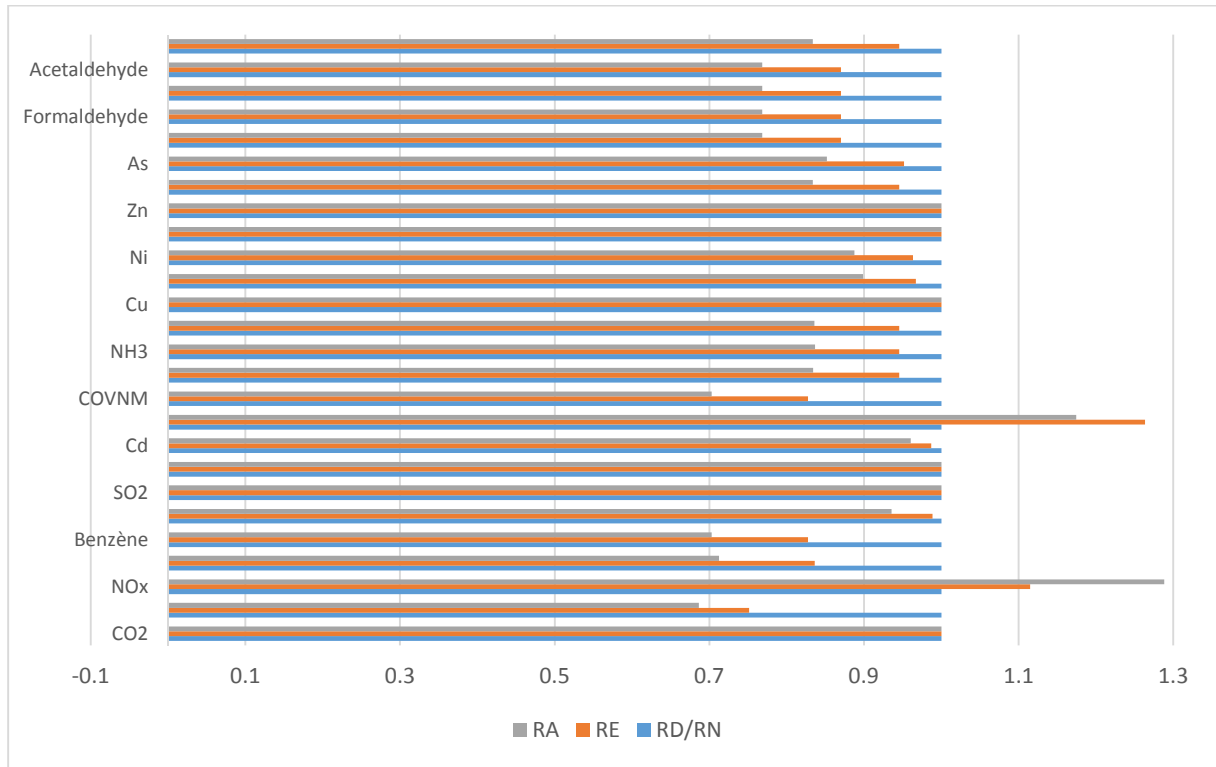


Annexe 60. Décomposition de la puissance de traction automobile selon la paramétrisation du sous-modèle d'HDM-4

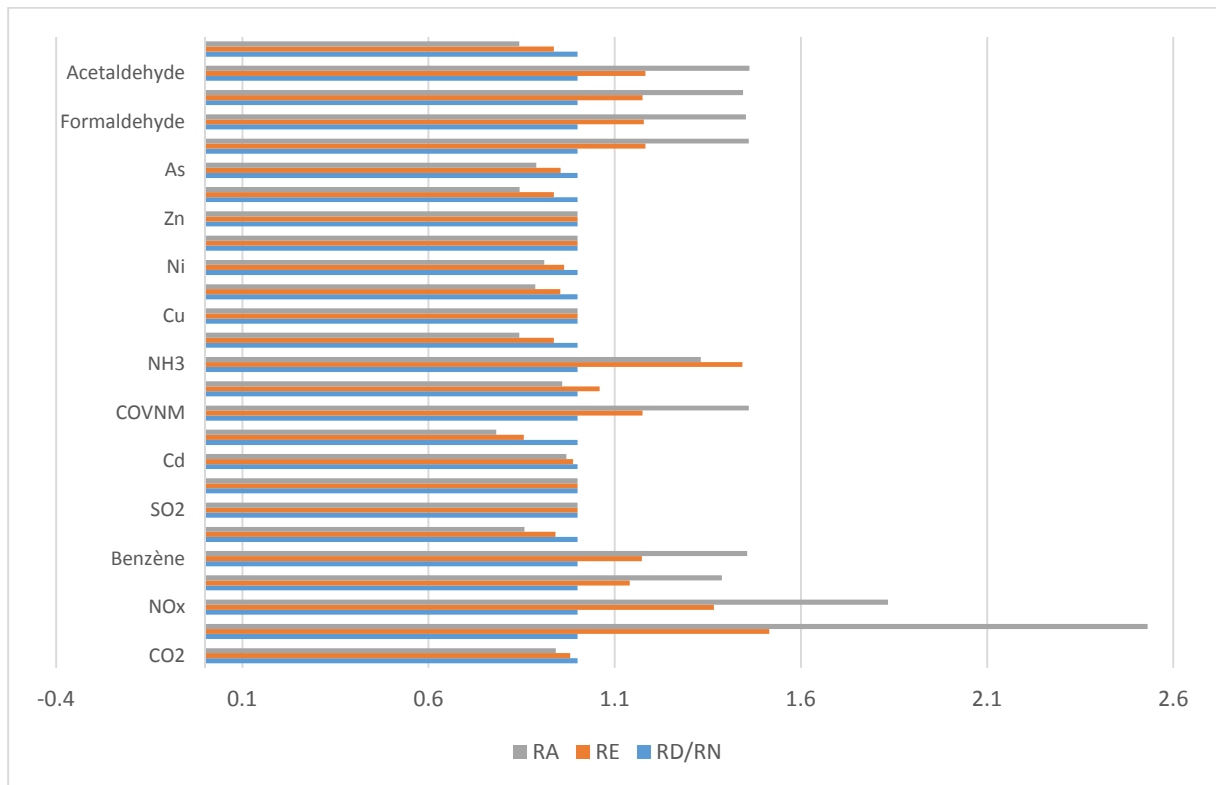


Annexe 61. Test de linéarité des émissions à la consommation pour un VP diesel (1) et un VP essence (2) moyen en 2017 en France selon le type de réseau parcouru (donc la vitesse et le cycle de conduite)

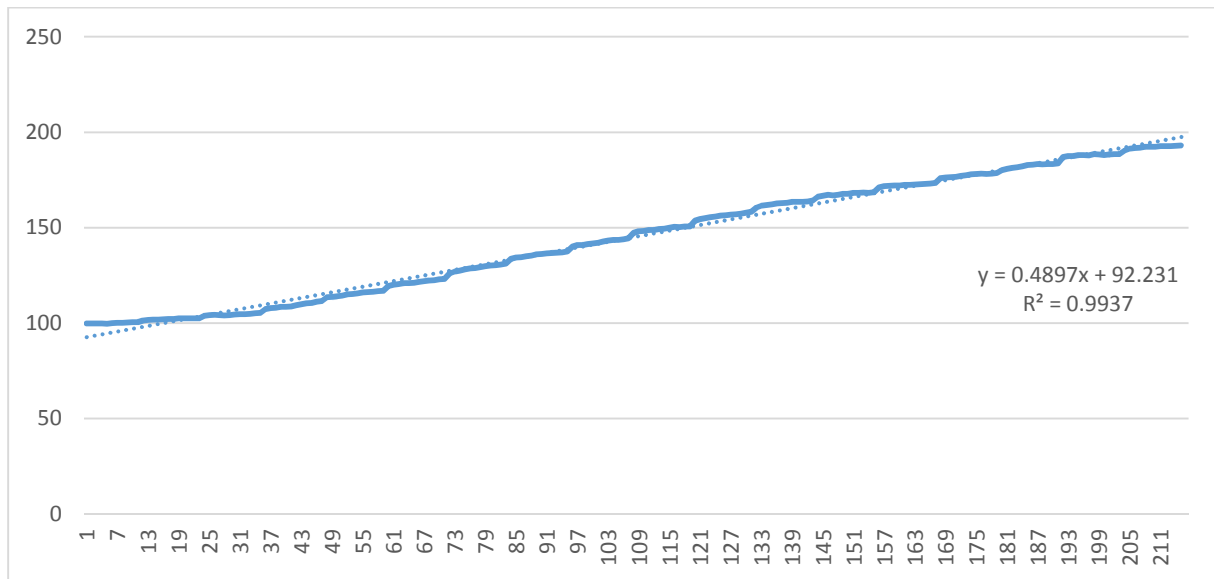
(1)



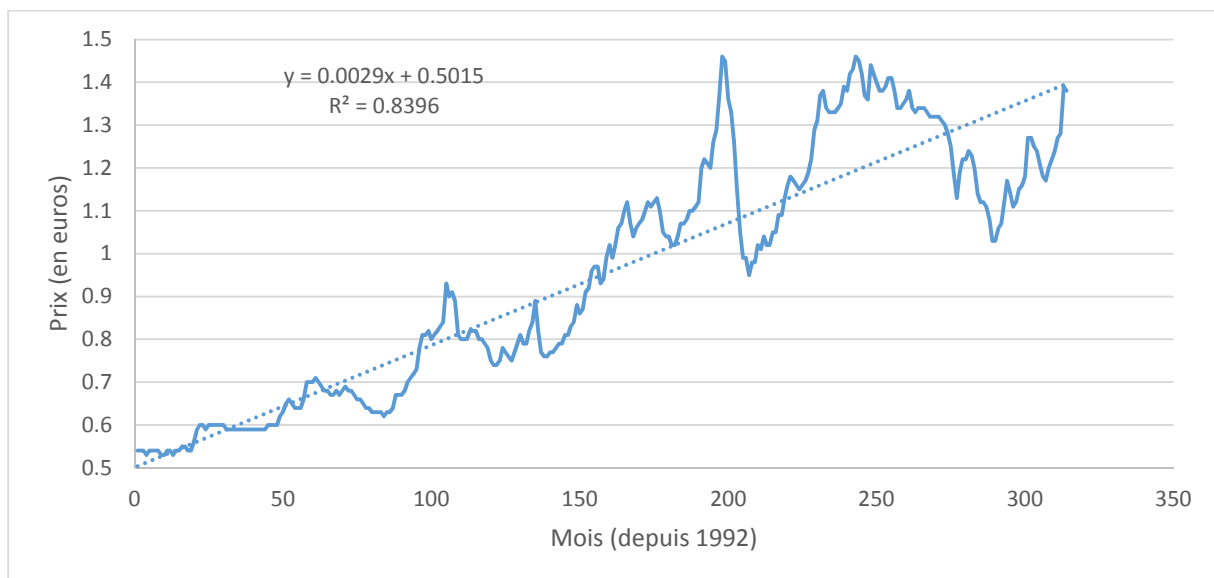
(2)



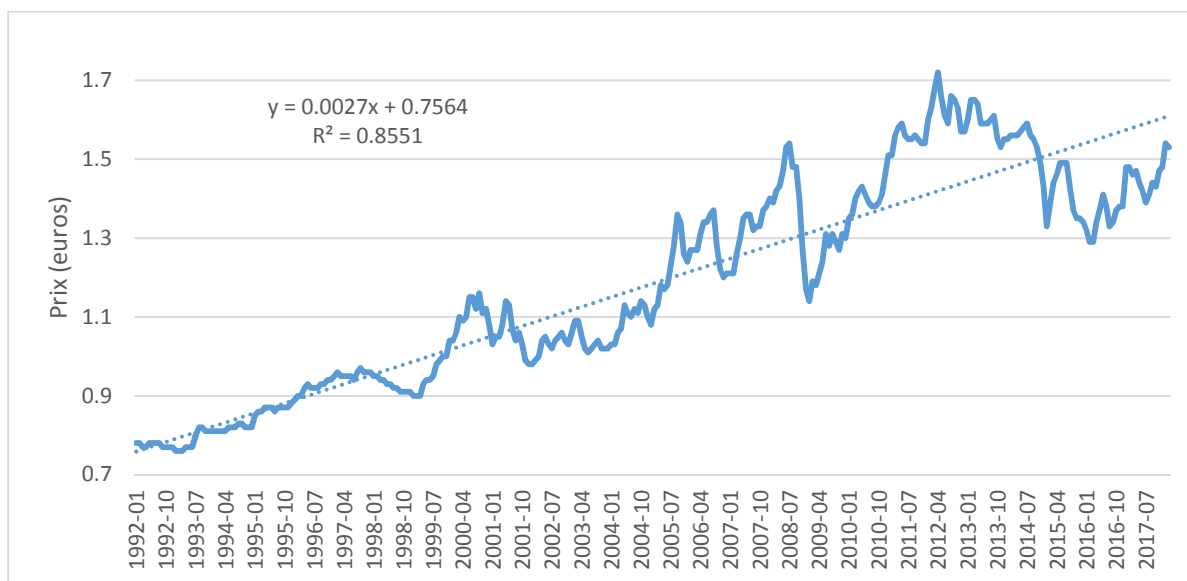
Annexe 62. Évolution temporelle (de 1998 à 2015) des prix à la réparation de véhicules personnels en France



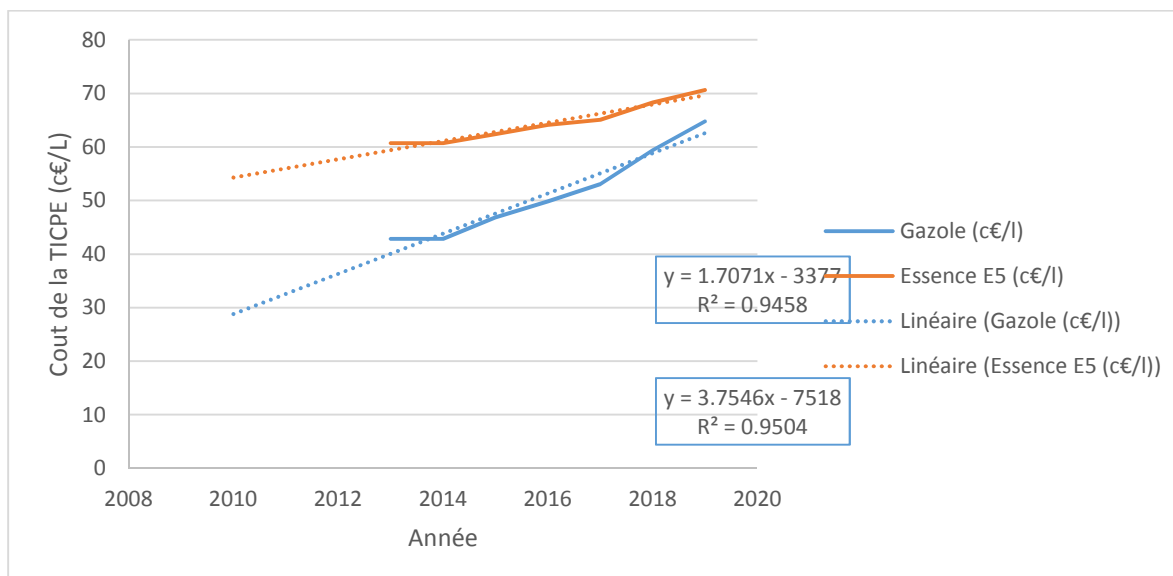
Annexe 63. Prix mensuels moyens de vente au détail de gazole en métropole en euros courants (Données INSEE - 1992-2018)



Annexe 64. Prix moyens mensuels de vente au détail en métropole – Supercarburant sans plomb, indice d'octane 98 (1 litre)



Annexe 65. Évolution des TICPE sur le gazole et l'essence en France entre 2012 et 2022 (chiffres : Ministère pour la Transition Écologique et Solidaire 2018²⁹⁸)



²⁹⁸ <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/fiscalite-des-energies#e4>

CHAPITRE 5 – Construction de données environnementales spécifiques

Table des matières

1	Introduction.....	344
2	ICV des opérations de resurfaçage des routes interurbaines françaises.....	345
2.1	Resurfaçage : cycle de vie et contributions environnementales	346
2.1.1	Cycle de vie.....	346
2.1.2	Contributions environnementales majoritaires.....	347
2.2	Revue de littérature des ICV.....	348
2.2.1	Procédés EcoInvent	348
2.2.2	Autres études	350
2.2.3	Synthèse	354
2.3	Développement d’Inventaires français	355
2.3.1	Liants	355
2.3.2	Granulats	366
2.3.3	Postes d’enrobage.....	368
2.3.4	Matériaux de chantier	370
2.3.5	Mise en œuvre.....	372
2.3.6	Synthèse des inventaires développés	376
3	ICV de maintenance des véhicules routiers	379
3.1	Revue de littérature des ICV.....	380
3.1.1	Modélisation d’EcoInvent.....	380
3.1.2	Autres études	381
3.1.3	Synthèse	384
3.2	Développement d’Inventaires français	385
3.2.1	Locaux de maintenance.....	385
3.2.2	Suspensions	389
3.2.3	Pneumatiques.....	393
4	Conclusion	401
5	Bibliographie.....	403

1 Introduction

Nous venons de proposer une méthode d'évaluation des programmes d'entretien des routes interurbaines représentant les enjeux de toutes les parties prenantes du resurfaçage routier : gestionnaires, usagers, riverains (routier ou au sens large), Nation et environnement. Le calcul des indicateurs environnementaux précédemment sélectionnés nécessite des données spécifiques à l'utilisation de notre méthode dans le cas français, que ce chapitre s'attache à développer. Il s'agit des ICV, données environnementales nécessaires à l'évaluation par ACV des trois indicateurs de dommage à l'environnement. Après revue de littérature approfondie et comparaison des ICV existants, nous proposons les ICV routiers et véhiculaires à utiliser dans la méthode.

Ces ICV relient chaque procédé considéré à un ensemble de flux entrants et sortants nécessaires à la réalisation de ce procédé. Lorsque nous citons un procédé issu de la base EcoInvent, nous l'inscrivons en italique entre guillemet. Le nom de référence n'est malheureusement parfois pas unique et peut amener une certaine incertitude dans sa compréhension. De plus, il y a des différences entre les différentes versions d'EcoInvent. Nous utilisons ici les versions 2 et 3. Les procédés que nous développons pour notre étude suivront la même notation – italiques et guillemets – mais seront écrits en français, ce qui permettra de faire la différence entre les deux natures d'inventaires.

La construction de nos inventaires reste perfectible : le fait d'utiliser des données de sources variables, parfois issues d'études industrielles, parfois d'études académiques, de croiser ces données avec des hypothèses plus ou moins robustes, et d'utiliser deux versions de la BDD EcoInvent²⁹⁹ n'est pas idéal pour une question d'homogénéité de la modélisation, mais reste aujourd'hui inévitable.

La prise en compte de la fin de vie en ACV est une question importante et complexe, dans la mesure où plusieurs méthodes de modélisation, aboutissant sur des impacts environnementaux évidemment différents, existent. Il existe 5 filières principales de fin de vie : le recyclage, l'incinération, le stockage (i.e. enfouissement), le compostage et la méthanisation (Le Guern, Petiot, et Schloesing 2011). En recyclage, on peut modéliser 3 types de boucles : fermées, ouvertes avec même voie principale et ouverte avec voies principales différentes (Le Guern, Petiot, et Schloesing 2011). Dans le 1^{er} cas, les matériaux recyclés sont réutilisés dans le même système de produit et viennent directement se substituer aux matériaux vierges utilisés (e.g. canettes de boissons). Dans le deuxième cas, les matériaux recyclés sont réutilisés dans un autre système de produit mais remplacent la même matière première (e.g. une canette recyclée utilisée pour produire une bombe aérosol). Ce cas est le plus fréquent. Dans le troisième cas, les matériaux recyclés sont réutilisés dans un autre système de produit et remplacent un autre type de matière première (e.g. papier recyclé pour produire une boîte à œufs en cellulose moulé à la place d'une boîte à œufs en plastique). Ce cas est le plus délicat car la modélisation des voies est complexe.

Le choix de la méthode d'allocation des impacts (positifs ou négatifs) liés aux fins de vie a été l'objet de débats dans la communauté ACV. Les méthodes existantes sont décrites ci-après (Le Guern, Petiot, et Schloesing 2011). La *méthode des stocks* (ou *cut off*) considère un stock de matière récupérée à disposition. Le produit qui utilise la matière récupérée bénéficie de matière récupérée à faible impact (seul l'impact du procédé de recyclage est pris en compte). Le produit qui envoie de la matière vers le stock de matière recyclée bénéficie de l'absence d'élimination et des impacts négatifs associés. La méthode de *substitution* (ou *extension des frontières du système* ou *impacts évités*) est une approche conséquentielle, qui peut tout de même être utilisée en ACVa. On ramène le procédé de recyclage à un procédé monofonctionnel en ôtant du système considéré la fonction non étudiée : la matière première secondaire se substitue à une production de matière vierge. La méthode de *substitution et*

²⁹⁹ Dans la construction de nos ICV, nous avons privilégié la V3 d'EcoInvent qui est plus actuelle que la V2. Néanmoins, nous reconstruisons parfois des ICV publiés dans la littérature et développés en se basant sur EcoInvent V2, reconstruction qui nécessite d'utiliser également EcoInvent V2 (pas d'équivalents de certains procédés entre les deux versions)

allocation en fonction de règles de marché s'applique après analyse théorique d'un système avec et sans recyclage : on définit une règle d'allocation du différentiel d'impacts entre le produit qui génère la matière première secondaire et celui qui la consomme (100:0 ; 0:100 ; 50:50). Enfin, la méthode d'*allocation physique* se base sur des flux physiques réels, en tenant compte des propriétés physiques de la matière et du nombre d'utilisations successives de cette matière, afin de répartir les impacts du recyclage (négatifs ou positifs) entre le système qui génère la matière à recycler et le système qui incorpore la matière recyclée.

La méthode Cut Off, tout comme l'allocation physique, est adaptée pour les boucles de recyclage fermées ou ouvertes avec voie principale identique. Selon l'ILCD handbook (European Commission, Joint Research Centre, et Institute for Environment and Sustainability 2011), les méthodes des impacts évités et de substitution + allocation doivent être privilégiées par rapport aux méthodes d'allocation, mais « ne doivent pas être utilisées lorsque les objectifs de l'étude sont strictement attributionnels ». Selon l'ISO 14044 (AFNOR 2006b), il faut d'abord éviter toute allocation (ou « affectation » selon le texte). Si c'est impossible, la norme conseille par ordre de priorité l'allocation physique, puis l'allocation économique. La méthode substitution + allocation est préconisée dans le BP X 30-323 pour l'affichage environnemental de certains produits de grande consommation (acier, aluminium, verre, carton, plastique). Enfin, l'allocation physique doit être appliquée quand la méthode impacts évités ne peut pas être mise en œuvre, ou en ACV strictement attributionnelle. Selon la synthèse de préconisations proposée par Bio Intelligence Service (Le Guern, Petiot, et Schloesing 2011), notre méthode d'évaluation étant attributionnelle avec interactions, et pouvant être utilisée à des fins conséquentielles, la méthode la plus adaptée nous semble être la méthode des impacts évités (i.e. extension des frontières, i.e. substitution), d'autant que les boucles existants dans notre système sont très majoritairement ouvertes.

Une fois construits, nous implémenterons ces ICV dans le logiciel libre OpenLCA afin de calculer les impacts unitaires de nos procédés en utilisant la méthode IMPACT World+ version 1.36.

2 ICV des opérations de resurfacement des routes interurbaines françaises

Les opérations de resurfacement que l'on veut être en mesure de modéliser par ACV sont relatives aux six principales techniques utilisées sur réseaux interurbains français : BBTM, BBM, BBSG, BBUM, ESU et ECF. Des outils spécifiques à l'ACV de chaussées existent – PaLATE, Roadprint, Road-Res, asPECT, PE-2, Athena Impact Estimator for Highway, ECORCE (Chong et Wang 2017) – mais par soucis d'homogénéité avec les impacts véhiculaires calculés, de prise en compte maximale du contexte interurbain français, et de validité temporelle des données, nous choisissons de développer nos propres inventaires : en effet, utiliser une base pré-existante aux données non accessibles (donc non transparentes) pour une partie seulement du périmètre d'évaluation (partie infrastructure) nous semble peu indiqué. La littérature a été extrêmement prolifique en ACV routière depuis les années 1990³⁰⁰ : AzariJafari et al. (2016) en ont recensé environ 125 réalisées entre 2010 et 2015. Cependant, les ICV ne sont pas toujours publiés, et la segmentation de la route en sous-éléments adaptée à l'étude spécifique de la couche de roulement est loin d'être généralisée. De plus, les auteurs de revues systématiques rapportent un manque de consensus dans les méthodes (Inyim et al. 2016). Nous ne nous intéresserons qu'aux études permettant d'obtenir des données spécifiques aux couches de roulement.

³⁰⁰ Voir la quinzaine d'ACV d'infrastructures routières publiées en anglais entre 1996 et 2010 référencées et critiquées par Santero et al. (2011a, 2011b)

2.1 Resurfaçage : cycle de vie et contributions environnementales

2.1.1 Cycle de vie

Le cycle de vie d'une couche de roulement routière commence par l'excavation ou l'extraction des matières premières et la manufacture des matériaux, leur transport sur le site de construction, leur mise en œuvre, leur vie en œuvre et leur fin de vie (Figure 64).



Figure 64 Cycle de vie d'une couche de surface routière

Les installations de production des matériaux, à chaque étape, varient selon la technique routière finale sur chantier (voir chaîne d'approvisionnement simplifiée en Figure 65). Les matériaux à produire sont majoritairement de deux types : les liants hydrocarbonés qui peuvent être des bitumes – purs, modifiés avec des élastomères ou plastomères, ou encore fluxés avec des huiles végétales ou minérales – ou des émulsions – mélange de bitume, eau, solvants, et fluxants – et les granulats et fines. D'autres additifs peuvent entrer dans la composition des matériaux. Les ECF peuvent par exemple comporter des additifs tels que des tensio-actifs, du ciment, de la chaux, des fibres, et pigments colorés. Le bitume pur provient des raffineries, quant aux liants modifiés et émulsions, ils sont produits en usines de liants. Les granulats naturels, qui sont des fragments de roche de diamètre inférieur à 125 mm (seuls ceux de diamètre inférieur à 15 mm sont généralement utilisés en couches de roulement), proviennent de roches meubles – i.e. du lit présent ou passé d'une rivière ou de sols marins – ou de roches massives – roche dure de type calcaire ou roches éruptives (origine magmatique ou plutonique)³⁰¹. Les granulats artificiels sont des sous-produits industriels. Pour les chantiers d'ESU, granulats naturels et émulsion peuvent venir directement respectivement de la carrière et de l'usine de liant, tandis que pour les enrobés ou ECF, liants et granulats passent par une centrale d'enrobage où ils sont mélangés à chaud ou à froid (émulsion d'enrobage pour l'ECF) avec éventuellement des agrégats d'enrobés ou autres matériaux alternatifs (verre recyclé, fibres, coproduits de l'industrie).

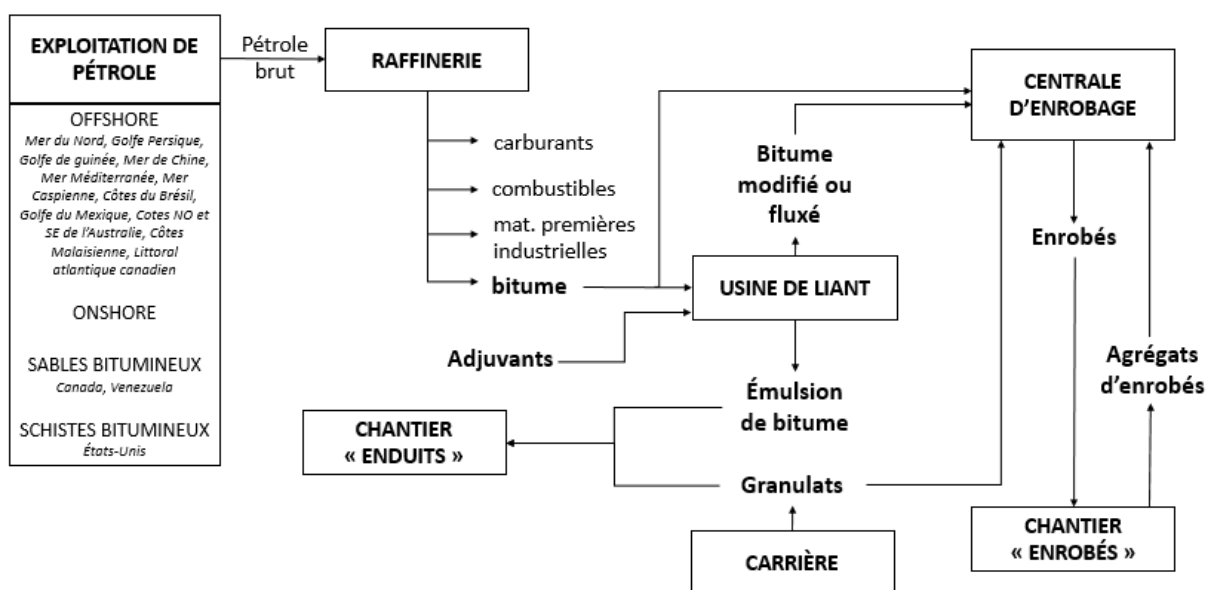


Figure 65 Système de production de resurfaçage routier

³⁰¹ www.unpg.fr

La modélisation des impacts environnementaux des opérations de resurfaçage (hors phase d'usage) nécessite donc des inventaires concernant les matériaux routiers utilisés (liants et granulats), leur transport, les engins de mise en œuvre, et les pratiques de recyclage. Plus un élément du système présente potentiellement un poids environnemental important, plus il faudra raffiner sa modélisation afin de minimiser l'incertitude sur le résultat d'impact final. Néanmoins, on peut s'attendre à ce que les contributions diffèrent fortement selon l'indicateur considéré.

2.1.2 Contributions environnementales majoritaires

On peut trouver une dizaine d'ACV académiques dans la littérature qui permettent l'obtention de contributions environnementales des différentes phases du cycle de vie du resurfaçage – production des matériaux, manufacture de l'enrobé, transport des matériaux et mise en œuvre sur chantier ((Mladenovič et al. 2015; Vidal et al. 2013; Kucukvar et al. 2014; Tatari, Nazzal, et Kucukvar 2012; Yu et Lu 2012; Cuenoud 2011; Huang, Bird, et Bell 2009; Chiu, Hsu, et Yang 2008). Nous avons schématisé sur un plan les deux principales contributions environnementales d'un resurfaçage en enrobés par type d'indicateur (voir légende des couleurs sur le graphique) et par étude (Figure 66). La zone légèrement grisée représente les contributions inférieures à 50%. Ce graphe met en évidence l'importance prépondérante de la production des matériaux – liant et granulats – et de la production des enrobés en centrale (manufacture), notamment du point de vue du changement climatique et de l'énergie (points rouges et bleus). Notons que dans le groupe « matériaux », la production des granulats est généralement faiblement contributive aux impacts (<15%) (Chiu, Hsu, et Yang 2008; Mladenovič et al. 2015; Cuenoud 2011) sans que cela soit systématique puisqu'elle peut concentrer jusqu'à 60% des impacts (toxicité humaine (Mladenovič et al. 2015)). En effet, cet impact varie largement selon les sites et les procédés d'exploitation (e.g. type d'explosif) (A. Jullien et al. 2012).

La phase de mise en œuvre (engins) peut également être importante mais plus rarement (Kucukvar et al. 2014), tout comme la contribution du transport (Kucukvar et al. 2014; Tatari, Nazzal, et Kucukvar 2012; Mladenovič et al. 2015). Notons tout de même que la distance d'approvisionnement en granulat est un paramètre important de la consommation d'énergie des techniques de resurfaçage (Thenoux, González, et Dowling 2007).

Nous détaillons maintenant un peu plus ces études. Dans un article industriel de Cuenoud (2011) visant à comparer un nouveau procédé de resurfaçage à froid, les contributions au changement climatique suivantes ont été calculées pour un procédé de resurfaçage à base d'enrobé classique : 50% des impacts liés à la manufacture du matériau (usine d'enrobage), 25% rattachés à la production du liant hydrocarboné, 10% du fait du transport, 10% générés par les engins de chantier, et 3% pour la production de granulat. Le procédé à froid évalué présente un profil très différent : environ 60% de l'impact est dû au liant et 40% au transport, le reste étant négligeable.

Spécifions que nous ne présentons que des études de resurfaçage par enrobés car nous n'avons pas trouvé d'ACV relative aux techniques d'ESU.

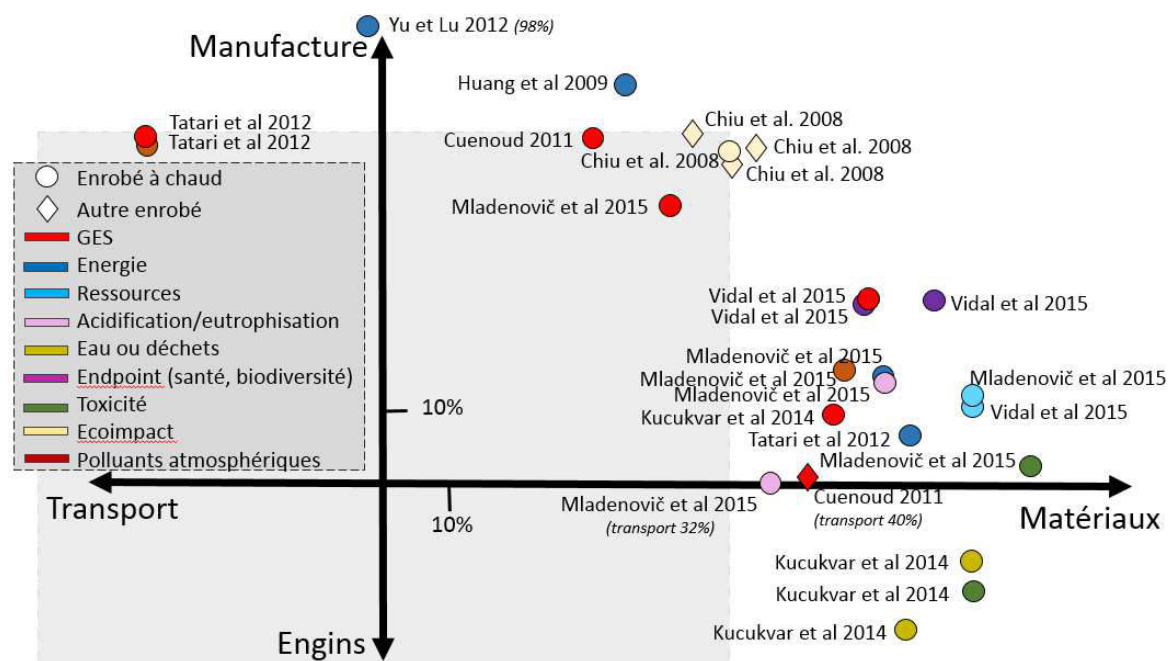


Figure 66 Représentation des deux principaux contributeurs aux impacts environnementaux du resurfaçage par type d'indicateur et par étude académique

Bien que les contributions ne soient pas extrêmement tranchées, cette étude bibliographique nous pousse à prioriser la régionalisation française des ICV de matériaux (et plus spécialement de liants), ainsi que ceux de manufacture (centrales d'enrobage) : le cadran Manufacture/Matériaux comporte une grande majorité des points d'étude et montre que ce sont les deux étapes de cycle de vie qui impactent le plus l'environnement dans les différentes études recensées, sur une majorité des indicateurs environnementaux considérés.

2.2 Revue de littérature des ICV

Il existe plusieurs bases de données d'ICV dans le monde – citons GaBi databases, EcoInvent, ou US LCI – ainsi que des ICV originaux publiés dans la littérature, ces derniers nourrissant les BDD. Nous détaillerons deux types d'ICV : les ICV d'EcoInvent jugés exploitables et les ICV de resurfaçage de la littérature académique. Nous nous focalisons sur la seule BDD EcoInvent car, rappelons-le, elle a été développée pour l'Europe et est la plus complète et adaptée à notre situation.

2.2.1 Procédés EcoInvent

Les données relatives aux ICV d'EcoInvent proviennent du rapport n°14 d'EcoInvent, consacré aux services de transport (Spielmann, Bauer, et Dones 2007) et du rapport n°7 détaillant les ICV des matériaux de construction (Kellenberger et al. 2007). EcoInvent propose un procédé générique intégratif pour la construction d'une « route moyenne », mix d'autoroutes, et routes nationales, régionales et locales pour la Suisse, intégrant des hypothèses de durée de vie par couche de chaussée, de largeurs et matériaux par type de route. Les couches de surface sont considérées composées de 94% de granulats (« gravel ») et 6% de bitume (« bitumen »), avec une masse surfacique de matériaux nécessaires beaucoup plus importante sur autoroutes que routes moins importantes (jusqu'à un rapport 6) (Maibach, Peter, et Seiler 1999) dans (Spielmann, Bauer, et Dones 2007). Cet inventaire intégré ne nous sera pas utile, et nous préférons détailler les procédés que nous pourrions utiliser : les procédés expliqués ci-après sont ceux de la V2.0, mis à jour dans les dernières versions V3. Le procédé « Mastic asphalt » quant à lui correspond davantage au matériau utilisé pour le pontage de fissure ou sur trottoirs.

2.2.1.1 Liants

Il existe plusieurs procédés de liants hydrocarbonés utiles pour modéliser les matériaux routiers : « *bitumen, at refinery* » en contexte suisse (CH) ou européen (RER), deux procédés « *bitumen adhesive compound, X, at plant* » avec X correspondant à « hot » ou « cold », en version européenne uniquement (V2), ainsi que plusieurs procédés « *bitumen sealing* ». Les ICV de ces procédés sont disponibles dans Kellenberger et al. (2007) et des éléments supplémentaires peuvent être trouvés sur les ICV du bitume³⁰² dans Dones et al. (2007), sur ceux des solvants chimiques dans (Althaus et al. 2007) et pétrochimiques dans (Sutter 2007). Des détails sur la modélisation de l'exploitation de pétrole sont répertoriées dans un rapport EcoInvent en Allemand que nous n'avons pas trouvé (Jungbluth 2004). On-shore et offshore sont différenciés. Des données sont parfois extrapolées sur la base de certaines régions (émissions dans l'eau et l'air des activités offshore sont extrapolées sur la base des activités en Mer du Nord. Des données des activités en mer du Nord et au Nigéria ont également été utilisées pour combler les lacunes de connaissances relatives aux exploitations nord-africaines et du Moyen-Orient. Le procédé « *bitumen, at refinery* » est issu de l'ICV d'une raffinerie qui, à partir d'un kilogramme de pétrole brut, produit différents coproduits : carburants, combustibles, autres produits de spécialité dont le bitume³⁰³, ainsi que matières premières industrielles (naphte et certains gaz pour la pétrochimie). Ces ICV sont issus de deux raffineries suisses – Collombey et Cressier – étudiées en 2000 et dont les données ont été complétées par des données de littérature plus anciennes. Le procédé européen est extrapolé du procédé Suisse, à partir d'un échantillon de 1 à 5 raffineries supposées représentatives du parc. L'adaptation est notable sur certains flux consommés dans la technosphère – provenance du pétrole brut, mix électrique de l'électricité consommée, transport jusqu'à la raffinerie – les flux sortants dans le milieu naturel étant globalement similaires en qualité comme en quantité. « *bitumen adhesive compound, cold, at plant* » correspond au bitume utilisé dans le BTP pour imperméabiliser routes (ESU) et toits. Il est représentatif d'une émulsion – mélange à froid de moins de 30% en masse de bitume, d'eau (50-60%), de solvants (<8%) et d'émulsifiants (<3%) – en 2000 ((Kellenberger et al. 2007)(p756). Un procédé à chaud (brûleur au gaz naturel, 140°C) est également disponible, développé à l'origine en 1994 (version Européenne ou reste du monde). Les procédés « *bitumen sealing* », V60 et autres, ont le même emploi que les deux procédés précédents : l'imperméabilisation des structures et infrastructures. Selon la description, ils correspondraient toutefois davantage à un procédé permettant de faire adhérer sable, talc ou granulats à une structure, soit donc à une émulsion utilisable pour la réalisation d'ESU. Selon les détails d'EcoInvent, les ICV de produits bitumineux incluent une phase de transport (en-dehors du transport du site d'excavation au site de production qui est déjà inclus dans l'ICV du matériau), sans que nous ayons davantage de détail sur le périmètre considéré.

2.2.1.2 Granulats

Le calcul de l'ICV de granulats d'EcoInvent V2.2 « *mine, gravel/sand* », est détaillé dans le rapport n°7 d'EcoInvent (Kellenberger et al. 2007). Il se base sur l'étude de 4 carrières suisses jugées représentatives du pays entre 1997 et 2001, et sur des hypothèses d'exploitation (surface de carrière ; durée d'exploitation ; production annuelle ; machinerie (silos, tamis et concasseurs, DVT de 25 ans)). Une allocation permet ensuite de différencier le sable du granulats (« *sand at mine* », « *gravel, crushed, at mine* ») : pour 1 tonne de roches concassées, on produit 35% de sable et 65% de granulats. Notons que l'UNPG, dont nous détaillerons le travail ensuite, ne considère pas que l'on puisse différencier sable et granulats (UNPG 2011a, 2011b, 2011c).

³⁰² Sont principalement considérés les exploitations pétrolières typiques de la Mer du Nord, néanmoins les importations et exportations européennes sont considérées.

³⁰³ Seuls 1/3 des pétroles bruts du monde permettraient la fabrication de bitume (euro-petrole.com/re_05_details_mot.php?idMot=100)

2.2.1.3 Fin de vie routière

La fin de vie a été évaluée à partir des chiffres de déconstruction et recyclage suisses : 1.5 Mt d'enrobés et 1.3 Mt de gravats par an (document « Bundesamt für Konjunkturfragen » 1991) dont 20% d'enrobés recyclés et ré-utilisés à son niveau maximum de revalorisation (béton bitumineux en couche de roulement ou en assise selon sa couche d'origine donc son taux de liant) et la quasi-totalité du reste en couche de forme, quand un pourcentage négligeable est mis en dépôt.

La V3 met à disposition des procédés de recyclage d'enrobés « *waste asphalt* » ou de bitume « *waste bitumen* » pour différents contextes géographiques (Suisse, monde, reste du monde).

2.2.2 Autres études

Certaines études utilisent des logiciels dédiés à l'ACV des routes pour évaluer des opérations de resurfaçage, tels que PaLate (Cross et al. 2011) ou ECORCE (A. Jullien, Dauvergne, et Cerezo 2014) . Elles sont donc non exploitables dans notre cas. Nous ne relevons ici que les études aux ICV spécifiques au resurfaçage (opération complète ou matériaux). Toutes les ACV de chaussées contiennent potentiellement des données utiles. Pour autant, elles sont souvent insuffisamment détaillées pour être exploitables. Une méta-analyse présente les choix d'ICV des ACV routières réalisées entre 2010 et 2015 les plus citées dans les annales du moteur de recherche Web of Science (Azarijafari, Yahia, et Ben Amor 2016).

2.2.2.1 Littérature académique

Parmi les articles abordant l'entretien des routes de manière détaillée, la plupart sont peu adaptées au cadre de notre étude pour des questions de représentativité géographique, technologique, temporelle ou du fait d'inventaires contenant peu de substances comparé à l'état des connaissances. Notons également que certaines études – elles se font néanmoins toujours plus rares – n'abordent que l'aspect énergétique ou climatique des impacts. Ainsi, Zhang et al. (2010) utilisent des ICV variés issus d'études datées ou spécifiquement adaptées au contexte des USA – données de l'association du ciment Portland, de l'Athena Institute pour le bitume ou de BDD américaines (Franklin U.S. LCI Database relié à Simapro). Jullien et al. (2014) font également le choix d'ICV un peu anciens. Yu et Lu (2012) comparent des resurfaçages (incluant la phase d'usage) utilisant des ICV contenant peu de flux issus de la littérature entre 2001 et 2007. Mladenovic et al. (2015) ont comparé deux techniques de resurfaçage : avec granulats normaux et granulats de scorie issues de fonderie. La plupart des ICV sont issus de la BDD de GaBi et datent des années 2000. Les émissions relatives à l'enrobé pendant sa phase de compactage et de refroidissement ont été négligées faute de données, hypothèse justifiée par le fait que, dans une approche comparative de deux enrobés, ces émissions sont relativement identiques. Huang et al. (2009) modélisent les impacts environnementaux d'un projet de resurfaçage, incluant la gêne à l'utilisateur due aux travaux. Les émissions de la combustion de produits fossiles, incluant celles se produisant en centrales d'enrobage sont arbitrairement fixées aux niveaux des normes d'émissions européenne³⁰⁴, afin de contourner la difficulté d'accès à des données plus ou moins confidentielles. Weiland et Muench (2010) ont comparé trois techniques de resurfaçage sur un cas concret de route interurbaine de l'État de Washington : les ICV qu'ils utilisent proviennent de l'US EPA, du modèle GREET sur les émissions et consommations énergétiques du transport, et de l'étude de Stripple pour le bitume (2001), et sont assez mal adaptés au contexte français des points de vue technologique, économique et temporels.

Yang et al. (2015) ont étudié spécifiquement le resurfaçage : ils ont évalué des scénarii relatifs à l'inclusion d'agrégats d'enrobés dans les matériaux de resurfaçage, en considérant 4 types de fragments minéraux (roches concassées, graves, sable naturel et « sable manufacturé », le 1^{er} et le dernier étant obtenus en Illinois à partir de carrières de roches massives, les deux autres provenant des rivières). Les ICV de base utilisés sont ceux d'EcoInvent US V2.2, ainsi qu'un ICV de liant régionalisé

³⁰⁴ Guide d'inventaire d'émission EMEP/CORINAIR de l'Agence Européenne pour l'Environnement

pour le Midwest américain (Yang 2014) incluant les sources d'importation de pétrole brut et des données sur les raffineries en utilisant les résultats de questionnaires distribués à l'industrie routière entre 2012 et 2013³⁰⁵ (Kang 2013; Kang et al. 2014). La prise en compte fine dans le modèle de centrale d'enrobage de l'effet réel du taux d'humidité dans les agrégats d'enrobés est également un point intéressant. Les auteurs mettent en avant l'utilisation d'un logiciel commercial relié à une BDD d'ICV permettant ainsi d'assurer que les procédés amonts sont bien pris en compte (calcul matriciel inverse) contrairement à la réalisation d'inventaires « à la main ». La modélisation du recyclage est faite dans cette ACVa selon une méthode cut-off (100% des bénéfices environnementaux du recyclage sont attribués au consommateur de matériau recyclé), en excluant le procédé de rabotage des matériaux ainsi que le transport jusqu'à la centrale et en considérant en revanche le stockage, le concassage et le criblage des agrégats. Concassage et criblage sont modélisés sur la base de questionnaires diffusés dans l'industrie.

Jullien et al. (2010) ont fait des relevés de productions d'enrobés et de consommations et émissions associées à ces productions en centrale française à Blois. Cependant, il s'agit d'une centrale au gaz naturel, donc non représentative de l'ensemble du parc français qui utilise des technologies plus variées comme nous verrons plus tard. Sur cette même centrale, Ventura et al. (2008) proposent des ICV relatifs à la préparation d'enrobés incluant divers taux d'agrégats d'enrobés (10, 20 ou 30%), mais les ICV ne sont pas détaillés par opération, on ne peut donc pas déterminer les ICV spécifiquement liés aux opérations de séchage, concassage et criblage des AE.

Parmi les 5 publications proposant des ICV de liants hydrocarbonés – Häkkinen et Mäkelä (1996) en Finlande pour 1992, Stripple (2001) en Suède entre 1990 et 1995, Athena Institute (2006) pour les USA dans les années 1990, Eurobitume (Blomberg et al. 2011) pour l'Europe en 2011 et Yang (2014) pour 5 régions américaines, le modèle d'Eurobitume serait le plus adapté en termes d'adéquation de marché (géographie, période temporelle, technologie).

Jullien et al. (2012) présentent des ICV partiels de granulats provenant de 3 carrières françaises : une exploitation de roches massives et deux de roches meubles. L'étude relève une différence significative entre les impacts environnementaux relatifs à ces ICV et celui d'EcoInvent, à la hausse ou à la baisse. Le problème est qu'une partie des ICV est impossible à extraire car seuls la consommation d'énergie et quelques flux principaux (émissions dans l'air) puis les impacts (acidification, eutrophisation, etc.) liés aux carrières sont donnés.

Moretti et al. (2017) proposent des inventaires relatifs aux enrobés produits par deux centrales italiennes, avec détail des flux élémentaires. Giani et al. (2015) publient des données de consommation d'usines, mais aussi d'engins et de quantités matériaux nécessaires au resurfaçage, avec une considération du recyclage. Plusieurs études considèrent encore les impacts de l'ajout de matériaux recyclés ou alternatifs dans les enrobés neufs (Huang, Bird, et Heidrich 2007; Chowdhury, Apul, et Fry 2010; Aurangzeb et al. 2014; Y. Wang 2016; Farina et al. 2017; Balaguera et al. 2018).

Il n'existait pas d'ICV en 2010 pour les additifs – dopes d'adhésivité³⁰⁶ ou d'interface, agents d'émulsion, fillers, produits de cure, résines, fibres – et les adjuvants des bétons (Sayagh et al. 2010). On pouvait toutefois trouver des intensités énergétiques de quelques substances pour les bétons telles que les fibres PVA ou les super plastifiants (Keoleian Gregory A. et al. 2005). Vidal et al. (2013) ont depuis mis au point un inventaire d'additif destiné aux enrobés tièdes et ont montré que les additifs avaient un impact environnemental faible sur la production totale d'un enrobé tiède. Cependant, du fait de l'ajout de chaux dans les enrobés tièdes, l'impact environnemental total n'est pas significativement différent d'un enrobé à chaud sur un indicateur de changement climatique. Cet

³⁰⁵ 7 types de questionnaires au total ont été distribués à l'industrie des matériaux routiers : carrières, raffineries, centrales d'enrobage, cimenteries, sites de recyclage d'agrégat, etc.

³⁰⁶ « Les dopes d'adhésivité sont des formulations qui ont pour but d'améliorer « l'accrochage » d'un liant sur des granulats en présence d'eau ou à sec. Elles favorisent le mouillage des surfaces minérales par le liant qui s'oppose à la rupture par l'eau de la liaison minéral/liant » (cecachemicals.com)

article compare des opérations de resurfaçage par enrobé à chaud et tièdes incluant ou non des agrégats d'enrobés recyclés. Les auteurs utilisent les ICV d'EcoInvent : « gravel » et « sand » respectivement pour les granulats et les fines, et « bitumen » pour le liant. Toutefois, ils adaptent les inventaires. Les fillers – ciments et chaux – qui viennent rigidifier les enrobés et les renforcer contre le vieillissement sont également modélisés à partir d'EcoInvent. L'additif modélisé pour les enrobés tièdes est du zéolithe synthétique, dont l'ICV est modélisé à partir d'une ACV sur les détergents (Fawer, Postlethwaite, et Klüppel 1998). Les auteurs ont également créé un inventaire de centrale d'enrobage (infrastructure) et du procédé complet de production des enrobés ; ils proposent des ICV d'engins de chantier, de transport en camion, de lixiviation de la chaussée selon le taux d'agrégats d'enrobés recyclés incorporés. D'autres auteurs ont réalisé des ACV de procédés d'enrobés tièdes (Tatari, Nazzal, et Kucukvar 2012; Cheng et al. 2010) parfois sans données ré-exploitable du fait de leur agrégations ou de leur absence (Mazumder et al. 2016), ainsi que d'enrobés coulés à froid (Giani et al. 2015).

Santos (2015) propose dans sa thèse une compilation d'études d'ACV routières dans le contexte portugais sur le thème de la gestion de chaussée. Il présente un choix d'ICV non justifié : Eurobitume (Blomberg et al. 2011) pour les liants hydrocarbonés, Julien et al. (2012) ou Stripple (2001) selon les chapitres du manuscrit pour les granulats, Althaus et al. (2007) pour l'eau courante, US EPA (2004) pour la production des mix d'enrobés en centrale et le transport de matériaux, EEA (2013) pour les équipements de construction, l'exploitation routière, l'électricité, le charbon, et le pétrole brut, et Dones et al. (2007) entre autres pour les combustibles (diesel, gaz naturel, etc.).

Yang (2014) a plus spécifiquement développé un modèle de liant hydrocarboné adapté à 5 régions américaines dont la procédure est très bien détaillée. En effet, comme nous avons vu, les impacts environnementaux relatifs à la production de liant sont importants sur un certain nombre de catégories d'impacts d'ACV, et Yang affirme que les sources de pétrole brut et de consommation des raffineries peuvent varier de manière significative selon les régions des USA. Elle rappelle également que les sources d'approvisionnement en pétrole brut peuvent également fortement varier selon le contexte géopolitique et le marché, et donc qu'elles fluctuent avec le temps. Elle calcule une perte énergétique de conversion entre pétrole brut et liant hydrocarboné de 6%. Notons également que Yang (2014) estime, sur la base d'autres publications, que la lixiviation ayant lieu durant la phase d'usage due aux agrégats d'enrobés recyclés est négligeable.

Enfin, en termes de transport, les études françaises considèrent principalement du transport routier quels que soient les matériaux, sur des distances assez plus courtes. Par exemple, les études de Hoang, Chappat et Bilal et CIMbéton (Hoang 2005; Chappat et Bilal 2003; Abdo 2011) considèrent des transports de bitumes entre raffineries et centrales d'enrobage autour de 300 km ou directement sur chantier de 354 km (Hoang 2005), des transports de granulats de 39 à 100 km, et des transports d'enrobés et de matériaux en fin de vie (traitement ou stockage) de 20 km environ. Les distances considérées à l'étranger peuvent être encore plus restreintes : par exemple aux USA 30 à 50 km entre carrière et centrale, 80 à 100 km entre raffinerie et centrales (Ozer, Yang, et Al-Qadi 2017).

2.2.2.2 Littérature grise : ICV de syndicats

Les ICV réalisés par les syndicats industriels sont une source de données importante mais également sensible – dans le sens où l'accès aux données de base est parfois difficile voire totalement confidentielle – pour réaliser des ACV. Dans le contexte français, quelques ICV pourraient être particulièrement intéressants dans le cas de la modélisation environnementale routière.

A/ Bitume : Eurobitume (Blomberg et al. 2011)

L'étude de référence de Blomberg et al. (2011) propose des ICV pour plusieurs types de liants : bitume, bitume modifié aux polymères, et émulsion de bitume. Les bitumes sont conformes à la norme EN 12591 et correspondent à des bitumes avec des pénétrations de 20 à 220 (1/10mm). Les ICV sont disponibles au format EcoInvent V2.2 sous forme de sous-procédés (rapport) ou de flux élémentaires

(tableur Excel complémentaire). Il faut prendre garde à l'unité fonctionnelle qui est d'une tonne pour les bitumes mais de 1.52t pour l'émulsion (correspondant à la transformation d'une tonne de bitume). L'allocation des impacts de la raffinerie est faite selon des considérations économiques, en utilisant des valeurs standards des produits manufacturés, selon les préconisations de l'ISO/TR 14049 (AFNOR 2012a). Cela impacte nécessairement les ICV. Les données de 2007 sur l'extraction du pétrole sont issues de l'association internationale des producteurs de pétrole et de gaz (OGP) : elles couvrent 32% de la production mondiale. Les données d'émissions des raffineries proviennent de rapports de CONCAWE, l'association pour la conservation d'air et eaux propres en Europe. Concernant la distribution des pétroles bruts et la consommation d'énergie des raffineries, des questionnaires anonymes ont été diffusés aux membres d'Eurobitume. Le transport par pipelines et bateaux, les données des compagnies de transport ont été utilisées et complétées par des données de l'US EPA. Les autres données proviennent d'EcoInvent 2.2.

La qualité des données est jugée représentative du contexte européen par l'USIRF et la revue critique, avec 32% des extractions du monde représentées et 20% de la production de bitume d'Europe (via 7 raffineries). Les flux les plus importants du point de vue environnemental selon le rapport sont la consommation de pétrole brut et de gaz naturel, les émissions dans l'air de CO₂, de SO₂, de NO_x, de CH₄ et de COVNM. L'adéquation de ces flux est jugée particulièrement bonne. Celle des autres flux est jugée satisfaisante.

Le rapport de l'OGP donne des consommations énergétiques d'extraction de pétrole comprises entre 490 et 1580 MJ/t selon le type de pétrole et sa localisation. Cependant, le taux de retour énergétique (indicateur : EROI) relatif à l'exploitation du pétrole ne cesse de chuter (Hall, Lambert, et Balogh 2014), et cette tendance ne devrait pas s'inverser : il serait bon de modéliser ces tendances dans des ICV de produits bitumineux. La distribution des consommations énergétique pour l'exploitation du pétrole, entre gaz et diesel, est fournie par EcoInvent (Dones et al. 2007).

Le bitume modifié par ajout de polymères est modélisé selon un cas d'étude original réalisé par Eurobitume avec le polymère le plus utilisé en Europe, le styrène butadiène styrène (SBS) sous forme granulaire, à 3.5% en masse du produit final. Néanmoins les polymères existants sur le marché sont très divers.

L'émulsion de bitume modélisée correspond à une formulation d'émulsion cationique incorporée au bitume, à un émulsifiant de type aminé et un acide chlorhydrique, émulsion la plus utilisée en Europe. Les émissions relatives au gaz et fiouls lourds brûlés en centrales sont celles d'EcoInvent « *Refinery gas, burned in furnace/RER* » et « *Heavy fuel oil, burned in refinery furnace/RER* » à l'exception des émissions de SO₂ liées aux fiouls lourds qui sont repris des données de raffineries pétrolières en Europe pour 2006 (1.33% de soufre dans le combustible et 26.6 g SO₂/kg de fioul brûlé). Il aurait été plus exact de récupérer les données d'émissions françaises pour des questions de représentativité technologique (temporalité, géographie), malheureusement l'accès aux données n'a pas été possible dans le temps imparti à ce travail.

B/ Granulats : Union Nationale des Producteurs de Granulats (2011a, 2011b, 2011c)

L'UNPG a réalisé trois études relatives aux grands types de granulats utilisés dans le BTP en France : granulats issus de roches massives (UNPG 2011a), de roches meubles (UNPG 2011b), et granulats recyclés (UNPG 2011c).

Dans les deux premiers cas, l'analyse tient compte de l'ensemble des activités réalisées sur site de production : défrichage, découverte et exploitation du site, traitement et commercialisation des produits finis, puis réaménagement final des sites après arrêt de l'exploitation. Elle omet certains éléments jugés mineurs que la norme française NF P 01-010 permet d'exclure des frontières du système : éclairage, chauffage et nettoyage des ateliers, département administratif, transport des employés, et fabrication de l'outil de production et des systèmes de transport (machines, camions,

etc.). Dans le cas des granulats recyclés – qui peuvent provenir de blocs de béton, de déchets d’enrobés (croûte ou fraisât), de ballast, de graves traitées aux liants hydrauliques, de graves naturelles ou encore d’un mélange de ces produits issus de chantiers de terrassements – le périmètre inclut le traitement des matériaux issus du chantier de démolition, rabotage ou terrassement : tri et/ou concassage et/ou criblage réalisés en installations fixes ou mobiles. Il ne tient donc pas compte de la démolition elle-même, ni du transport ou de la consommation énergétique liée au séchage éventuel des matériaux. Les adjuvants éventuellement ajoutés aux mélanges produits incluant ces granulats ne sont pas pris en compte.

Les ICV de granulats issus de roches massives sont basés sur l’étude de 8 sites en 2007, dont 4 sites de roches éruptives et 4 de sites calcaires, jugés représentatifs de la répartition de la production nationale. Pour les ICV de granulats issus de roches meubles, l’analyse a également été faite en 2007 sur 8 sites dont 5 en eau, 2 hors d’eau et un site mixte (60% en eau et 40% à sec). Enfin, les granulats recyclés sont issus de 7 installations de recyclage dont 3 fixes et 4 mobiles, jugés également représentatifs.

Ces trois rapports donnent dans un format exploitable les ICV de ces trois types de granulats. Ils sont, au premier semestre 2018, en cours de remise à niveau, et il sera intéressant d’intégrer la dernière version de ces ICV dans ma méthode lorsqu’ils seront disponibles.

C/ Chaussée : Union des Syndicats de l’Industrie Routières Françaises (USIRF 2016b, 2016c)

Notons la publication de deux fiches de déclaration environnementale et sanitaire par l’USIRF (USIRF 2016c, 2016b) : la première concernant la production d’enrobé bitumineux à chaud représentatif du marché français, la seconde dans laquelle une ACV de chaussée en enrobé bitumineux à chaud (6cm de BBSG) représentative du marché français est détaillée. Les ICV utilisés sont ceux de l’UNPG pour les granulats (FR), d’Eurobitume pour le liant (UE), sinon d’EcoInvent v3.1 (FR pour l’électricité, UE pour tout le reste). Sans autre détail, il est stipulé que des données internes à l’USIRF sur la consommation d’énergie des centrales (77% de la production), leurs émissions dans l’air (73 centrales) et d’autres éléments (8 centrales représentant 3% de la production nationale) ont été utilisés. De manière générale, aucun ICV ne peut être extrait de ces rapports et l’USIRF ne souhaite pas partager ces données. Des données concernant les émissions de fumée des enrobés chauds sont reprises de la base de donnée CIMAROUT mais sont également inaccessibles. On peut trouver des hypothèses ou données agrégées concernant le transport, des consommations des machines au m², des productions de déchets (balayures), des émissions directes dues aux fumées de bitume, des quantités surfaciques de matériaux par couche (de la fondation au roulement) (USIRF 2016c). Cependant, les données ne sont pas réutilisables en l’état puisque les quantités sont agrégées pour toutes les couches d’1m² de chaussée, et que les inventaires ne sont pas publiés. Le rapport cite entre autre deux études relatives à la lixiviation des enrobés bitumineux sans référence (Eurobitume 2005, ESITC 2011). Notons que le rapport ne présente pas de bibliographie, et que certains liens ne sont pas valides (Eurobitume 2005).

2.2.3 Synthèse

Les ICV d’EcoInvent datent pour la plupart des années 1990 ou 2000. Ils ont été remis à jour, mais les informations relatives à ces mises à jour sont très sommaires et ne permettent pas de juger de la représentativité actuelle des données. Les ACV de chaussées, quelle que soit l’échelle considérée – route, couche de roulement, matériaux – utilisent des ICV variés. Certains ICV semblent s’imposer : parfois pour leur adéquation géographique, parfois peut-être parce que ce sont les ICV les plus populaires. D’autres ICV sont développés pour un article particulier, et sont plus ou moins complets en termes d’émissions dans l’air considérés (souvent seules les émissions réglementées sont considérées).

Dans le contexte du resurfaçage des routes interurbaines françaises, les ICV que nous jugeons les plus adaptés sont ceux d’Eurobitume pour les liants hydrocarbonés autant pour leur représentativité

européenne que pour leur caractère récent. Pointons au passage l'actuel travail de mise à jour des ICV qui devraient être publiés par Eurobitume en 2018³⁰⁷. Les ICV de granulats typiques retenus sont ceux de l'UNPG pour leur bonne régionalisation, bien qu'ils négligent l'amortissement des infrastructures et que les données de terrain datent de 2007. Notons en particulier que nous ne connaissons pas les normes d'émissions considérées.

2.3 Développement d'Inventaires français

Développer des ICV français nécessite d'abord de s'intéresser aux réalités des marchés français pour chaque élément du resurfacement routier, ce qui permettra ensuite de modéliser les techniques de resurfacement en passant par le développement régionalisé pour la France de deux niveaux d'inventaires que nous nommerons ainsi : les procédés unitaires et les macroprocédés. Nos définitions de ces niveaux d'ICV sont données ci-après :

1. procédé unitaire : liste de flux élémentaires et quantités associées en entrée et sortie pour chaque procédé unitaire (e.g. extraction d'1t de tel pétrole brut)
2. macro-procédé : liste de procédés unitaires et quantités associées pour réaliser une opération (e.g. mise à disposition d'1t de bitume européen moyen)

Nous comparons ici les connaissances du marché français avec les marchés modélisés dans les ICV les plus adéquats selon la revue de littérature présentée ci-dessus, afin de réaliser une évaluation critique plus fine vers le développement d'ICV français.

2.3.1 Liants

2.3.1.1 Bitume

A/ Marché français

i/ Consommation française

En 2005, l'essentiel du bitume consommé en France était produit sur le territoire, avec seulement un approvisionnement d'appoint depuis les raffineries proches des frontières du pays (GPB 2005a). Toutefois, le marché du bitume a beaucoup évolué en une décennie. En effet, entre 2005 et 2015, trois des 12 raffineries françaises ont fermé (GPB 2005a; Comité Professionnel du pétrole 2017). Aujourd'hui, la France produit à peu près la moitié des 2.5Mt de bitume qu'elle consomme et importe les 50% restants (46% en moyenne entre 2012 et 2016, voir Figure 67), selon une tendance relativement stable depuis 2012. 90% du bitume consommé est utilisé en construction routière (GPB 2015). Parmi les 9 raffineries françaises (dont une Martiniquaise), 6 produisent actuellement du bitume en métropole, situées à Gonfreville-l'Orcher, à Donges, à Port-Jérôme-Gravenchon, à Lavéra, à Feyzin, et à Grandpuits³⁰⁸ (GPB 2015).

³⁰⁷ Echange personnel par e-mail avec M. Jean-Michel Michou, Directeur d'Eurobitume France en octobre 2017

³⁰⁸ La raffinerie de Fos ne produit plus de bitume (entretien Eurobitume 22/11/2017, La Défense)

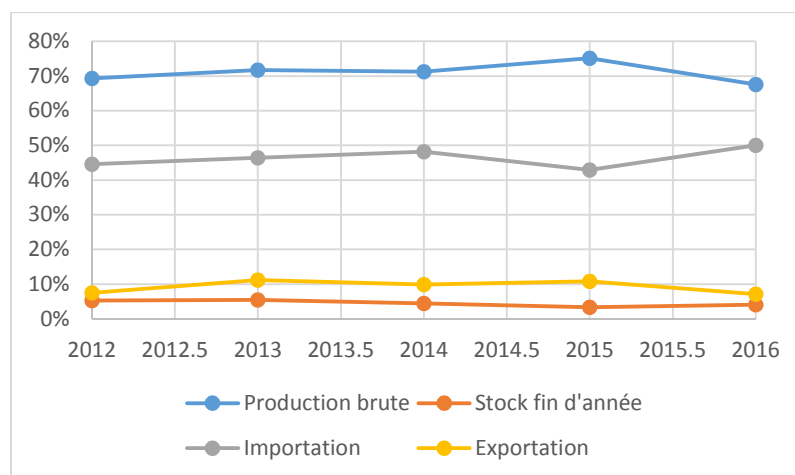


Figure 67 Flux de bitume sur le marché français de 2012 à 2016, avec 100% la consommation annuelle domestique (chiffres issus du Comité Professionnel du pétrole 2017)

ii/ Estimation des imports français (IEA 2017)

Nous n'avons pas trouvé de données sur la provenance des imports de bitume en France. À défaut, nous avons étudié les chiffres d'importations de coproduits pétroliers, incluant le bitume mais tous produits confondus (hors combustibles), rapportés par l'Agence Internationale de l'Énergie entre 2015 à 2017. Premier marché européen du bitume³⁰⁹, la France importe d'ailleurs l'essentiel des coproduits pétroliers qu'elle consomme d'Europe (85% : 22% de Belgique, 20% d'Allemagne, 10% d'Italie, 13% des Pays-Bas et 15% d'Espagne en 2017). Le reste des imports provient principalement des États-Unis (8%). En termes tendanciels sur 3 ans, contrairement aux imports de pétrole qui sont globalement fluctuants, les imports de coproduits pétroliers sont plutôt stables à croissants depuis l'Europe (Espagne + 18%, Royaume-Unis + 28%), avec une hausse des imports en provenance des pays de l'OCDE de 11%, tandis que le faible marché asiatique semble s'effondrer (-85%) à l'inverse du marché des émirats arabes unis qui émerge timidement. Selon les données douanières du CPDP, si 8% des coproduits pétroliers consommés en France viennent des USA, en revanche ceux-ci ne comptent pas de bitume, ou alors en quantité négligeable, mais plutôt des produits lourds types fioul marine ou fioul lourd³¹⁰, et du coke de pétrole (Comité Professionnel du pétrole 2017). Nous excluons donc ce pays des importations de bitume.

Nous modéliserons donc le marché du bitume français ainsi : 50% de production française et 50% de production européenne. Nous choisissons de négliger les marchés asiatique et du Moyen-Orient, qui devront néanmoins être surveillés et modélisés s'ils augmentent.

B/ Inventaires du bitume importé d'Europe

Les ICV d'Eurobitume sont jugés représentatifs du marché des liants hydrocarbonés européen en 2009 (date du questionnaire principal pour la collecte de données sur les importations). Les importations ne sont pourtant pas très proches de la situation actuelle sur une simple considération des provenances de pétroles bruts tous confondus (Tableau 55). En attendant les nouveaux ICV à paraître en 2018 qui considéreront un profil d'importation actualisé – 30% d'Ex-URSS, 45% du MO, 15% d'Amérique du sud et centrale et 10% d'Europe³¹¹ –, nous utiliserons ceux publiés en 2011 dans notre modèle.

³⁰⁹ www.eurobitume.eu/fr/bitume/industrie/

³¹⁰ Entretien avec le directeur d'Eurobitume France, JM Michou, le 22/11/2017 à La Défense

³¹¹ Entretien avec le directeur technique d'Eurobitume, Chris Southern, le 22/11/2017 à La Défense

C/ Inventaires de production française de bitume

Pour créer nos inventaires de production de bitume français, nous souhaitons modéliser trois étapes (Figure 68) : l'extraction des pétroles bruts, leur transport jusqu'aux raffineries, par pipelines et/ou navires pétroliers, aussi appelés tanker ou supertankers pour les plus capacitaires, et enfin la distillation du pétrole en raffinerie permettant d'obtenir plusieurs produits, dont le bitume qui sera ensuite stocké.



Figure 68 Cycle de vie de production du bitume

Pour cela, nous devons décomposer en détail chacune de ces étapes avant production finale.

i/ Provenance des « bruts à bitume »

Pays d'extraction

Le Tableau 55 présente une comparaison des imports de pétrole brut sur les marchés français et européens. Cependant, tous les pétroles bruts ne sont pas des « bruts à bitume » : tous les pétroles bruts ne sont pas assez lourds pour produire du bitume. On fabrique le bitume à partir de bruts sélectionnés (lourds), faute de quoi les rendements sont mauvais et des problèmes d'homologation (qualité du bitume) peuvent survenir. 10% des bruts sont « aptes à bitume » (GPB 2005b) : ce n'est pas le cas des pétroles africains. Les bruts de la Mer du nord sont légers mais peuvent permettre d'obtenir des lubrifiants et bitumes de désasphaltages³¹² : nous les négligerons dans le « baril moyen de brut à bitume » français.

En termes de tendances d'importation en France, entre le choc pétrolier de 1973 et 2012, la part d'importation depuis l'Afrique a crû de 50%, celle depuis l'Ex-URSS a explosé (seulement 2.5% en 1973), celle depuis le Moyen-Orient s'est effondrée (72% en 1973) et celles de la Mer du nord a fait son apparition mais semble en baisse (0.1% en 1973). Le marché français en 2015 (calculé à partir d'un graphe du Ministère, données provenant d'enquêtes auprès des raffineries françaises (Ministère de l'Environnement 2017)) se différencie du marché moyen européen en 2008 principalement par sa forte part d'importations africaines, une part deux fois plus faible en provenance de l'Ex-URSS, et pas d'importations depuis l'Amérique du sud. Le marché de la consommation de pétrole modélisé dans EcoInvent est peut-être plus proche en structure de celui de la France que de celui d'Europe en 2008 selon Eurobitume. À noter que certains experts prévoient une augmentation des importations en provenance du Moyen-Orient du fait des accords passés avec l'Iran en 2016, notamment du fait de l'adéquation du pétrole de ce pays pour la production de bitume de qualité³¹³.

Tableau 55 Sources d'importation du pétrole brut en France et en Europe en pourcent (Source : auteur ; Chiffres : Dones et al. 2007; Blomberg et al. 2011; INSEE 2014; Ministère de l'Environnement 2017)

Marché/Import	Afrique	Ex-URSS	Moyen-Orient	Amérique du sud	Europe / Mer du nord	Autres
Europe (2000)	26	25	37	3	1	14
Europe (2008)	0	61	18	11	10 (EU)	0
France (2012)	37	32	17	0	11 (MN)	3
France (2015)	40	24	30	0	10 (MN)	0

³¹² Echange par e-mail avec Chris Southern, directeur technique d'Eurobitume, le 23/11/2017

³¹³ Entretien avec le directeur d'Eurobitume France, JM Michou, le 22/11/2017

Nous ferons donc l'hypothèse d'une provenance de bruts à bitume exclusivement du Moyen-Orient et de l'Ex-URSS dans notre modèle, avec un arrondi à la hausse du pourcentage provenant du Moyen-Orient constaté en 2015 ($30/(24+30)\%$) sur les importations tous bruts, compte tenu des tendances attendues (Iran) : soit 60% du Moyen-Orient et 40% d'Ex-URSS.

Itinéraires des bruts à bitume consommés en France

Selon Eurobitume, l'Europe est approvisionnée en bruts à bitume principalement par voie maritime à l'exception du brut d'Ex-URSS. Les pétroles bruts de Moyen-Orient arrivent du port de Ju'aymah en empruntant le canal de Suez. Ceux de l'Ex-URSS transitent par pipeline sur 1800 km en moyenne (de Samara jusqu'à la mer baltique), puis sont transportés par tanker jusqu'à la zone Anvers-Rotterdam-Amsterdam (ARA). Dans le cas de la France on considérera que le trajet se prolonge jusqu'au Havre. Ensuite, la France comporte trois portes d'approvisionnement de pétrole brut : Le Havre qui fournit les raffineries de Gonfreville, Gravenchon et Grandpuits, Donges, ainsi que Lavera qui fournit en sus d'elle-même la raffinerie de Feyzin³¹⁴. Les transports de brut au sein de ces trois zones se font par pipeline (Muller, Touboulic, et Michou 2016).

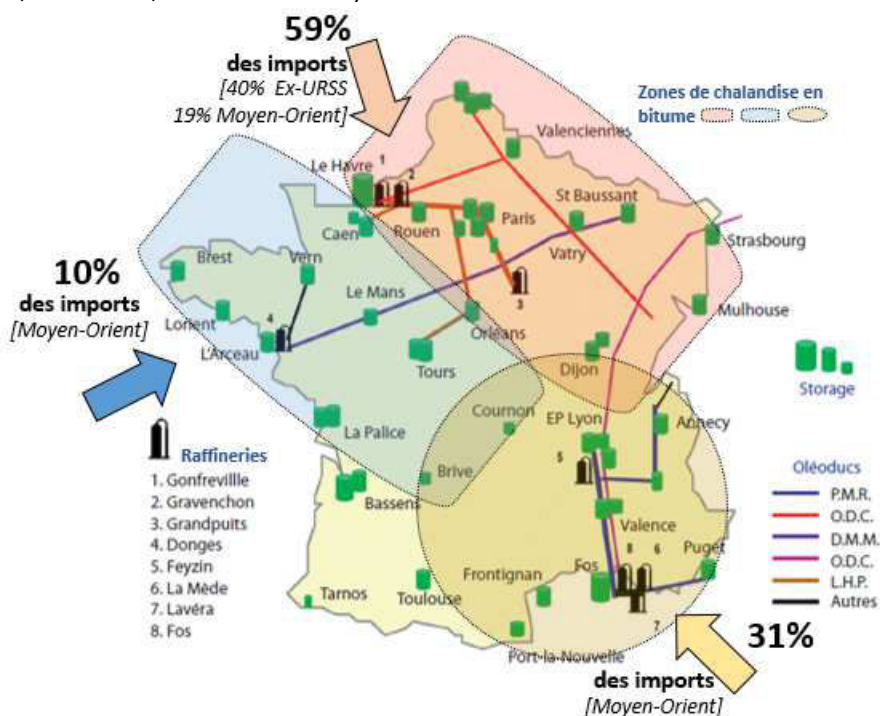


Figure 69 Approvisionnement des raffineries françaises en bruts à bitume (fond de carte : Muller et al (2016))

Les distances et proportions du brut à bitume moyen français dont le calcul est spécifié ci-après sont synthétisées dans le Tableau 56. En s'aidant du calculateur de distances maritimes en ligne Sea-distances³¹⁵, nous calculons les distances de transport maritimes suivantes :

- Ex-URSS : 1489 miles nautiques du port de St Petersburg au port du Havre
- Moyen-Orient : du port de Ju'aymah Crude Oil Export en Arabie Saoudite (premier pays d'importation de pétrole (Ministère de l'Environnement 2017)), en considérant que les tankers passent par le canal de Suez :
 - 6231 miles nautiques jusqu'au port du Havre
 - 6036 miles nautiques jusqu'au port de Donges
 - 4684 miles nautiques jusqu'au port de Lavera

³¹⁴ Entretien avec le directeur d'Eurobitume France, JM Michou, le 22/11/2017 à La Défense

³¹⁵ <https://sea-distances.org/>

À ces distances s’ajoute pour le Moyen-Orient un transport terrestre par pipeline du puits au port d’exportation. La distance calculée en s’aidant de Google Maps et des cartes de pipelines (estimation de distance moyenne) est une distance supplémentaire d’approvisionnement entre le centre de l’Arabie Saoudite et le port de Ju'aymah de 660 km.

À l’arrivée au port, on considérera les distances de transport en pipeline approximatives suivantes, estimée à partir de Google Maps :

- Port du Havre à raffinerie de Gonfreville : 10 km
- Port du Havre à raffinerie de Gravenchon : 40 km
- Port du Havre à raffinerie de Grandpuits : 270 km
- Port de Donges (Saint-Nazaire) jusqu’à raffinerie de Donges : 10 km
- Port de Lavera jusqu’à raffinerie de Lavera : 1 km
- Port de Lavera jusqu’à raffinerie de Feyzin : 310 km

Les hypothèses d’Eurobitume pour calculer la distance moyenne de transport pour le bitume européen se basent ensuite sur une pondération de chaque distance en fonction des importations par port européen. Faute de données sur les importations de bruts à bitume par port et par provenance, nous proposons une autre méthode de modélisation des transports. À partir des données françaises de production massive de bitume par raffinerie (Comité Professionnel du pétrole 2017), nous calculons la contribution de chaque port en production de bitume globale et par hypothèse de linéarité entre masse de bitume produite dans chaque lot de raffineries et masse de brut à bitume importée à chaque port, et nous en déduisons la répartition des imports de bruts à bitume par port : nous obtenons 10% pour Donges, 59% pour le Havre et 31% pour Lavera (voir Figure 69). Les imports d’Ex-URSS étant inférieurs au pourcentage d’import de bruts à bitume calculé pour le Havre, soit 59%, et comme le transport depuis l’Ex-URSS est plus court vers le Havre que vers les deux autres ports, on considère que la totalité des imports d’Ex-URSS arrive au Havre. Les autres approvisionnements (Donge, Lavera et reste du Havre) se font par voie maritime depuis le Moyen-Orient. On considère ensuite un transport des ports aux raffineries par pipeline au prorata des productions de bitume respectives des raffineries, soit 10% pour Donges, 14% pour Feyzin, 20% pour Gonfreville, 15% pour Grandpuits, 16% pour Lavéra et 24% pour Gravenchon.

Tableau 56 Ratios du bitume français moyen et distances de transport estimées entre les différents points de l’approvisionnement en pétroles bruts à bitume

Ratio	Départ	Arrivée	Mode	Distance (km)
40%	Samara	Port de St Pétersbourg	Pipeline	1800
40%	Port de St Pétersbourg	Port du Havre	Tanker	2760
60%	Puits Arabie Saoudite	Port Ju'aymah	Pipeline	660
31%	Port Ju'aymah	Port de Lavera	Tanker	8675
10%	Port Ju'aymah	Port de Donges	Tanker	11180
19%	Port Ju'aymah	Port du Havre	Tanker	11540
16%	Port de Lavera	Raffinerie de Lavera	Pipeline	1
14%	Port de Lavera	raffinerie de Feyzin	Pipeline	310
10%	Port de Donges	Raffinerie de Donges	Pipeline	10
20%	Port du Havre	raffinerie de Gonfreville	Pipeline	10
24%	Port du Havre	raffinerie de Gravenchon	Pipeline	40
15%	Port du Havre	raffinerie de Grandpuits	Pipeline	270

ii/ Synthèse des ICV de mise à disposition des bruts à bitume en raffineries françaises

À partir de ces calculs, il ne nous reste plus qu'à sommer les différentes distances par mode de transport multiplié par leur pondération, en considérant des procédés de types de transport moyens (simplification). Nous reprenons l'allocation d'Eurobitume en termes de consommation de matières premières : 1 tonne de brut donne 1 tonne de bitume³¹⁶. Nous obtenons les ICV du Tableau 57.

Tableau 57 ICV d'extractions et de transport du pétrole brut en raffineries françaises pour obtenir 1 tonne de bitume (ratios calculés à partir du graphe d'importation de pétrole brut en France du Ministère de l'Environnement pour 2015 (Ministère de l'Environnement 2017))

ETAPE	PROCEDE	QUANTITE	UNITE
Extraction	<i>crude oil, at production onshore, RU</i>	0.40	t
	<i>crude oil, at production onshore, RME</i>	0.60	t
Transport	<i>Transport, pipeline, onshore, petroleum</i>	1214	t.km
	<i>Transport, freight, sea, transoceanic tanker, GLO</i>	7105	t.km

Les procédés d'extraction de pétrole brut dans Ecolnvent sont indiqués sous la dénomination « *petroleum* » pour plusieurs provenances et contextes géographiques. RU correspond à l'Ex-URSS tandis que RME correspond au Moyen-Orient.

La consommation du pipeline dépend de plusieurs paramètres clés dont la topographie, et Eurobitume reprend les consommations de celui rejoignant Lavera et Karlsruhe en Allemagne pour sa similitude. Pour notre part, nous prendrons directement le procédé « *market, transport, pipeline, onshore, petroleum* » d'Ecolnvent qui considère une consommation de 0.02 kWh/t.km. Néanmoins ce procédé est assez daté, les données d'émissions étant de 1992 alors que des émissions ont été calculés pour l'Europe et mises à jour en 2016 (European Environment Agency 2016). Pour les autres sources d'approvisionnement, nous considérerons un transport maritime par tanker selon les informations de l'UFIP³¹⁷, nous choisirons le procédé « *market for transport, freight, sea, transoceanic tanker, GLO* ». De même, il pourrait être intéressant de calculer un ICV de transport par pipeline sur le territoire français et au Moyen-Orient. Cela représente dans notre modèle un transport de 100 km en France et 400 km au Moyen-Orient par tonne moyenne de brut, soit respectivement 8 et 33% du transport total par pipe, ce qui est important. D'autant plus que la performance environnementale des pipelines est très variable, d'un facteur 100 en termes d'émissions de GES en Amérique du Nord selon Choquette-Levy et al (2017), les deux paramètres clés étant selon eux la vitesse de transport et le diamètre du pipe. Selon ces auteurs, l'impact kilométrique du transport de pétrole par pipeline est compris entre 0.23 et 20.3 gCO₂eq/baril.km, soit 1.6 et 145³¹⁸ gCO₂eq/t.km, tandis qu'Ecolnvent propose un impact de 15.7 gCO₂eq/t.km (CML 2001 à horizon 100 ans), soit une valeur de l'ordre de grandeur de la moyenne logarithmique de la plage donnée par Levy et al.

iii/ Raffinage en raffinerie française

À défaut de données françaises sur les consommations et émissions en raffineries, nous considérerons une industrie homogène au sein de l'Europe et reprendrons les ICV d'Eurobitume en termes de consommation énergétique, avec les émissions associées à ces consommations énergétiques dans l'air et dans l'eau d'Ecolnvent V3. Les ICV ainsi constitués sont synthétisés dans le Tableau 58.

³¹⁶ Cette allocation peut heurter le sens physique puisqu'elle n'est pas réaliste du point de vue industriel : c'est la plus simple des allocations pouvant être réalisée pour les produits issus du raffinage du pétrole, elle est fortement critiquable et la question de cette allocation est actuellement étudiée par Eurobitume.

³¹⁷ ufip.fr/activites/distribution/un-approvisionnement-en-petrole-et-en-gaz-fortement-dependant-des-importati

³¹⁸ En prenant 1 boe = 140 koe (www.unitjuggler.com/convertir-energy-de-boe-en-koe.html)

Notons tout de même que si nous n’avons pas réussi à y accéder (circuit de demande des données non évidents et manque de temps pour l’explorer), des données désagrégées d’émissions industrielles existent en principe en France. C’est le cas pour les activités de raffinage du pétrole par exemple. Des données européennes pourraient également être exploitées (European Environment Agency 2016).

Tableau 58 ICV de raffinage d'1 tonne de bitume en France

PROCÉDÉ ECOINVENT V3	QUANTITE	UNITE
<i>market for electricity, medium voltage, FR</i>	8.7	MJ
<i>heat production, natural gas, at industrial furnace low-NOx >100kW, Europe without Switzerland</i>	404	MJ
<i>heavy fuel oil, burned in refinery furnace, Europe without Switzerland</i>	97	MJ

Selon Eurobitume, on peut obtenir un bitume plus dur (taux de pénétrabilité) à partir d’un bitume plus mou par oxydation. Le procédé consomme de l’énergie (33MJ/t) et génère des émissions dans l’air (3000 g/t de bitume de CO₂ et 13g/T de SO₂). On ne considèrera toutefois pas dans notre méthode ce procédé.

iv/ Stockage

Le bitume avant d’être utilisé est souvent stocké dans des sites dédiés : à Nantes, Blaye, Bayonne ou Lavéra pour les sites dédiés (hors centrales). EcoInvent propose un procédé relatif au stockage de pétrole (« *oil storage production, 3000l* »). Nous pourrions considérer qu’il s’agit de la même infrastructure (durée de vie : 20 ans. Capacité : 3000 L) et que tout le bitume importé, soit 1.25 Mt, est stocké dans ces infrastructures avant d’être utilisé. Cependant, malgré la multiplication des lieux de stockage, l’approvisionnement en flux tendu semble davantage se développer sur le marché européen (GPB 2015). D’ailleurs, cette gestion est en partie responsable de la pénurie de bitume qui a touché la France durant l’été 2018³¹⁹. Faute de données plus précises, nous prenons les inventaires d’Eurobitume qui a calculé une consommation moyenne de 100 MJ/t (voir parts énergétiques dans le Tableau 59).

Tableau 59 ICV de stockage d'1 tonne de bitume en France

PROCÉDÉ ECOINVENT (V2.2)	QUANTITE	UNITE
<i>market for electricity, medium voltage, FR</i>	9.7	MJ
<i>heat production, natural gas, at industrial furnace low-NOx >100kW, Europe without Switzerland</i>	72.8	MJ
<i>heavy fuel oil, burned in refinery furnace, Europe without Switzerland</i>	17.5	MJ

v/ Amortissement de la raffinerie

À ces inventaires nous pourrions ajouter un procédé relatif à l’amortissement de la centrale d’enrobage au cours du temps. Bien qu’un ICV de raffinerie de pétrole existe (« *petroleum refinery RER* »), les amortissements d’infrastructure considérés dans les ICV de bitume d’EcoInvent V3 utilisent une usine de produits chimiques organiques (« *chemical factory construction, organics, GLO* », 4^{E-7} par tonne de bitume à chaud, 4^{E-8} pour du bitume à froid) dont on ne connaît ensuite pas la méthode d’allocation par tonne de produits. Tout d’abord, la méthode de calcul d’amortissement, selon l’usine type construite, n’est pas expliquée. Ensuite, en utilisant les impacts unitaires d’une tonne de bitume et d’une raffinerie d’EcoInvent V2.2 afin de calculer la contribution de l’amortissement de la raffinerie (1.88^{E-8} raffinerie/t selon Eurobitume) sur 4 indicateurs calculés avec la méthode de caractérisation CML 2001, nous constatons que selon cette modélisation les impacts d’amortissement de la raffinerie

³¹⁹ <https://www.lesechos.fr/industrie-services/immobilier-btp/0301994834816-les-chantiers-sur-les-routes-bloquees-par-un-manque-de-bitume-2193047.php>

sont très faibles (<1% dans notre cas) (voir Tableau 60). Par souci d'homogénéisation des périmètres, nous ajoutons ce sous-procédé dans notre production de bitume français (procédé « petroleum refinery, RER », à hauteur de 1.88^{E-8} raffinerie/t), mais nous aurions probablement pu négliger cet amortissement de l'infrastructure dans le procédé de production de bitume.

Tableau 60 Calcul de contribution d'impact environnemental de l'amortissement d'une raffinerie à la production d'une tonne de bitume selon le modèle d'EcoInvent V2.2, sur 4 indicateurs calculés selon la méthode CML 2001

Impacts	Raffinerie (unité)	Bitume (1t)	Part infrastructure
acidification potential, european	66795	0.005374	0.02%
climate change, 100a	12878000	0.43052	0.06%
human toxicity, HTP infinite	45226000	0.35491	0.24%
depletion of abiotic resources	102100	0.022788	0.01%

2.3.1.2 Production de liants

A/ Transport

i/ Bitume Français

Les bitumes routiers partent des raffineries vers les centrales d'enrobage, en passant éventuellement par des usines à liant (bitumes modifiés ou émulsions). Les usines à liants étaient à l'origine installées près des raffineries mais aujourd'hui, le territoire français est bien maillé³²⁰. Nous considérerons que le transport du bitume entre la raffinerie et la centrale d'enrobage, qu'il passe par une usine à liant ou non, reste le même du fait de ce maillage. En revanche, quand une émulsion de bitume part sur chantier directement (sans passer par centrale), nous considérons un transport de 80 km selon les hypothèses de l'éco-comparateur SEVE.

Nous proposons de calculer une distance moyenne de transport en calculant le barycentre des raffineries et centres de stockage de bitume français, puis en divisant la distance moyenne entre les sites bitumes et le centre de stockage par deux. Nous utilisons pour trouver le barycentre des sites à bitume le site geomidpoint.com³²¹, et nous n'effectuons pas de pondération des sites faute de données sur les flux de transit individuels en bitume. Nous trouvons un barycentre aux alentours de Châteauroux (très proche d'un des centres de la France³²²), et une distance moyenne autour de 460 km. Nous considérerons donc une distance d'approvisionnement moyenne des centrales d'enrobage en bitume de 230 km, en camions 16-32 tonnes aux normes EURO 4.

ii/ Bitumes européen

En France, les dépôts de bitume se sont multipliés, ceux-ci étant approvisionnés par voie fluviale ou maritime ou, depuis peu, par chemin de fer selon le Groupement des Producteurs de Bitume (GPB 2015). Les schémas logistiques ont changé avec une augmentation des échanges en zone Europe, et notamment avec les pays limitrophes dans le cas de la France (GPB 2015). Selon le Groupement des Producteurs de Bitume, en 2015, le transport de bitume européen se fait principalement par semi-remorques sur route (GPB 2015). Ceux-ci misent cependant vers une importance multimodale croissante, avec les bateaux dédiés au transport de bitume et les wagons porte-conteneurs, notamment pour les distances d'approvisionnement les plus éloignées (GPB 2015).

Selon Eurobitume France³²³, le bitume de la zone ARA – raffinerie d'Utrecht (Pays-Bas) et d'Anvers (Belgique) – approvisionne par voie maritime les dépôts à bitume côtiers français – Le Havre, Donges et Bayonne – bien qu'une droiture (i.e. un mode, 100% camion) soit envisageable si l'aspect financier

³²⁰ Echange par e-mail avec le directeur d'Eurobitume France le 23/11/2017

³²¹ www.geomidpoint.com/

³²² <https://meridianes.org/2012/03/10/mais-ou-donc-se-situe-le-centre-de-la-france/>

³²³ Entretien avec le directeur Eurobitume France JM Michou le 22/11/2017 à La Défense

le justifie (e.g. Anvers a pour zone de chalandise les Hauts-de-France par camions). Nous considérerons un approvisionnement en bitume d’Anvers à 50% vers les hauts-de-France en camion et à 50% vers les dépôts côtiers français (33% Le Havre, 33% Donges et 33% Bayonne, 100 km de la raffinerie au port de Rotterdam, 100 km du dépôt côtier à la centrale ou l’usine à liants, et 1024 km par voie maritime (Seadistance)). Depuis Utrecht, nous considérerons un approvisionnement 100% côtier soit 40 km en camion entre la raffinerie et le port d’Amsterdam (Google Maps), 100 km du dépôt côtier à la centrale ou l’usine à liants, et 1066 km par voie maritime (Seadistance). La raffinerie allemande de Karlsruhe exporte principalement en zone Champagne-Ardenne, Lorraine et Alsace. Enfin, les raffineries de Téragone et Bilbao (Espagne et Portugal) approvisionnent le sud de la France par camionnage. Nous reprenons ensuite les statistiques d’imports de produits des raffineries hors combustibles (Voir « i/ Consommation française ») afin de calculer les distances parcourues par une tonne moyenne de bitume importée d’Europe vers les usines (centrales d’enrobage ou usine à liant) de France. Les transports (modes et distances) sont synthétisés dans le Tableau 61.

Tableau 61 Détail du calcul de la distance de transport moyenne du bitume européen importé jusqu'aux sites d'utilisation

PAYS	Départ	Arrivée	Import (%)	Mode	Distance (km)	Contribution (km/t)
Belgique	Anvers	Dépôts côtiers	11%	Tanker	1.02E+03	1.13E+02
		port/usine	11%	Camion	2.00E+02	2.20E+01
		Amiens	11%	Camion	2.60E+02	2.86E+01
Pays-Bas	Utrecht		13%	Tanker	1.07E+03	1.39E+02
			13%	Camion	1.40E+02	1.82E+01
Allemagne	Karlsruhe	Nancy	20%	Camion	2.00E+02	4.00E+01
Italie	Sannazzaro	Grenoble	10%	Camion	3.60E+02	3.60E+01
Espagne			15%			
	Téragone	Albi	7.5%	Camion	5.00E+02	3.75E+01
	Bilbao	Mont-de-Marsan	7.5%	Camion	3.00E+02	2.25E+01

Nous obtenons donc l’inventaire de transport d’une tonne de bitume d’Europe vers les usines de transformation française (centrales d’enrobage ou usine à liant) suivants :

- Camion : 205 km, “transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4, RER”
 - Tanker : 250 km, « Transport, freight, sea, transoceanic tanker, GLO”
- iii/ Synthèse des hypothèses et inventaires de transport du bitume

Le Tableau 62 synthétise les distances estimées dans notre modèle par type de bitume et mode de transport entre raffinerie et centrale d’enrobage ou usine de liant. Notons que ces distances estimées sont plus élevées que celles trouvées dans des ACV routières françaises plus anciennes (Chappat et Bilal 2003; Hoang 2005; Abdo 2011), ce qui pourrait s’expliquer par l’importation croissante et la diminution du nombre de raffineries qui implique un moins bon maillage des territoires européens et donc des distances de transport plus longues.

Tableau 62 Hypothèses de transport du bitume en sortie de raffinerie jusqu'à l'usine de liant française

TRANSPORT	DISTANCE (KM)	ROUTIER (%)	MARITIME (%)	FLUVIAL (%)	FERROVIAIRE (%)
BITUME EUROPEEN OU FRANÇAIS	460	80	0	10	10

Les procédés Ecolnvent utilisés pour modéliser les différents modes sont les suivants :

- routier : « transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4, RER »
- maritime : « market for transport, freight, sea, transoceanic tanker, GLO”
- fluvial : « transport, freight, inland waterways, barge tanker, RER”
- ferroviaire : « transport, freight train, FR »

Parmi ces procédés, ceux des transports fluvial et maritime sont spécifiques au pétrole (mais pas au bitume), et l'hypothèse du type de camion est inspirée de l'ACV de chaussée réalisée par l'USIRF (USIRF 2016c).

B/ Usines à liants

Pour cette étape, nous reprenons les hypothèses d'Eurobitume de nouveau, pour la préparation de bitume modifié aux polymères ou d'émulsion de bitume.

2.3.1.3 Bitume modifié

A/ Production du polymère

Le polymère styrène-butadiène-styrène, appelé SBS, est un caoutchouc synthétique que l'on trouve dans des objets comme les semelles des chaussures, la gomme des pneus, ou encore dans les bitumes modifiés pour augmenter leur stabilité donc leur durée de vie. La base V3 d'EcolInvent ne contient pas de procédé de production de styrène-butadiène-styrène, ce qui laisse trois options : utiliser le procédé EcolInvent du copolymère acrylonitrile-butadiène-styrène qui semble le plus proche possible, utiliser l'ICV partiel du rapport d'Eurobitume (Blomberg et al. 2011) issu d'un éco-profil du SBS qui n'est plus disponible en ligne (The International Institute of Synthetic Rubber Producers 1998), ou utiliser le procédé EcolInvent de gomme synthétique. Notons que PlasticsEurope propose un ICV plus proche du SBS dans la famille des polymères styréconsoniques : le polybutadiène³²⁴. Néanmoins, cet ICV, sous la forme d'un tableur Excel, présente environ 350 flux qui ne sont pas au format EcolInvent : leur implémentation sous OpenLCA est un travail chronophage et source d'incertitude car il n'y a parfois pas de correspondance entre les flux de l'ICV et les flux d'EcolInvent. Le tableur Excel de l'ICV fournit des données d'impact au changement climatique : la production d'un kilogramme de polybutadiène génère 3.9 kgCO₂eq. Nous allons maintenant comparer le logarithme des valeurs normalisées des impacts des 3 procédés envisagés, normalisation réalisée par rapport à la valeur des impacts du « polymère sur le marché français » (acrylonitrile-butadiène-styrène). Ces résultats sont présentés en Figure 70. Les impacts du polymère sur le marché français n'apparaissent pas sur la figure puisque $\log(1)=0$. On remarque que, globalement, les impacts du procédé de l'acrylonitrile-butadiène-styrène sont encadrés par les deux autres, les impacts de la gomme synthétique étant globalement plus élevés (parfois d'un rapport 8), ceux provenant d'Eurobitume étant au contraire bien plus bas. Notons que les polymères utilisés dans le procédé de gomme synthétique sont le polyéthylène et le polypropylène, ensuite transformés avec du noir de carbone, de l'azote, du zinc, de l'huile et des produits chimiques divers. Ce procédé est donc assez complexe. Notons ensuite qu'en termes d'impact au changement climatique, c'est le procédé d'acrylonitrile-butadiène-styrène qui est le plus proche des impacts du polybutadiène : ils sont de 17% supérieurs à ceux-ci, mais le procédé de gomme synthétique d'EcolInvent est quant à lui 22% inférieur à l'impact du polybutadiène, tandis que le procédé d'Eurobitume est 81% inférieur.

Nous choisirons donc, basé sur ce seul impact au changement climatique, le procédé d'acrylonitrile-butadiène-styrène comme proxy au SBS, notamment car le polybutadiène nécessite davantage de polymérisation pour obtenir du SBS, donc un impact environnemental supérieur, ce que semble retranscrire le procédé d'acrylonitrile-butadiène-styrène sur l'indicateur de changement climatique dont l'impact est 17% au polybutadiène.

³²⁴ Téléchargeable en ligne : www.plasticseurope.org/en/resources/eco-profiles

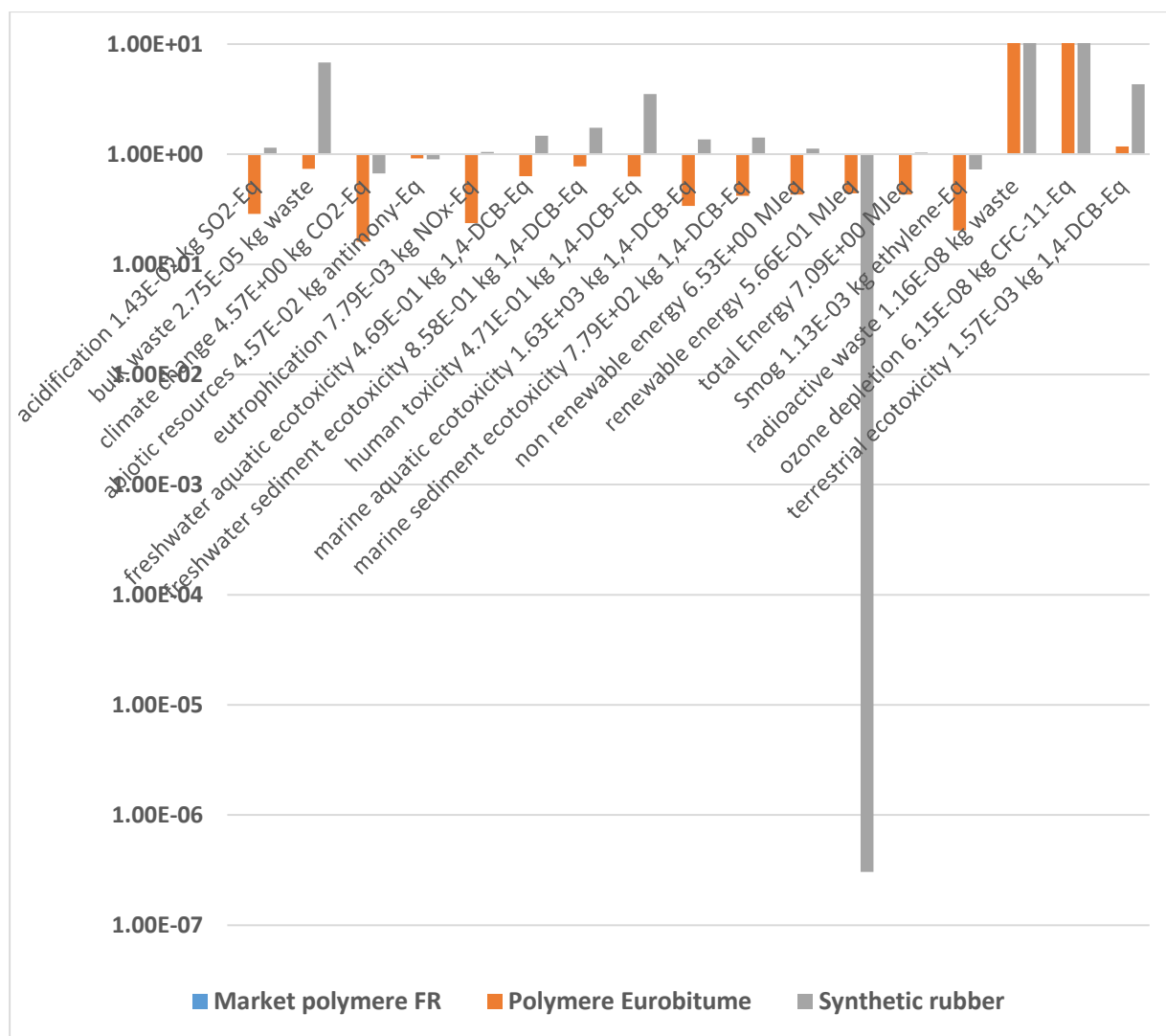


Figure 70 Comparaison logarithmique des impacts de trois procédés comme proxy au SBS : acrylonitrile-butadiène-styrène (« market pokymere FR », incluant du transport) en bleu (choisi comme étalon), procédé de gomme synthétique EcoInvent « synthetic rubber » en vert et ICV tronqué d’Eurobitume en rouge

B/ Procédé de bitume modifié

Nous reprenons l’hypothèse d’EcoInvent avec un transport de 500 km du polymère entre son lieu de production et l’usine à liant.

Étape	Procédé	Quantité	Unité
Bitume	market, bitumen, FR	9.65E+02	kg/t
Polymère	acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer production, RER	3.50E+01	kg/t
Transport polymère	market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4	1.75E+01	t.km/t
Mélange bitume/polymère	market for electricity, medium voltage, FR	2.52E+00	MJ/t

2.3.1.4 Émulsion de bitume

Nous construisons nos inventaires d’émulsion (Tableau 63) en reprenant les hypothèses d’Eurobitume (Blomberg et al. 2011). Ceux-ci utilisent l’éco-profil d’un émulsifiant européen que nous ne sommes pas en mesure d’exploiter. Nous remplacerons donc l’émulsifiant par un produit chimique minéral moyen. La contribution finale de ce flux aux impacts doit en principe être très faible (5% maximum sur les émissions de SO_x) (Bernard, Blomberg, et Southern 2012), ce que nous vérifierons. Eurobitume utilise

un procédé d'acide chlorhydrique dans l'eau à 30% de concentration en masse. Dans EcoInvent, seul un procédé sans eau est disponible.

Tableau 63 Inventaire des matières premières pour la production d'1t d'émulsion de bitume et choix de sous-procédés EcoInvent

Matières premières	Procédé	Quantité (kg/t)
Bitume	market, bitume, FR	6.50E+02
Émulsifiant	market for chemicals, inorganic, GLO	3.00E+00
Acide chlorhydrique (28% <i>m</i>)	market for hydrochloric acid, without water, in 30% solution state, RER	3.00E+00
Eau	market for tap water, Europe without Switzerland	3.44E+02

Nous créons de la même façon le procédé relatif au chauffage de l'eau pour réaliser l'émulsion (Tableau 64), puis à la consommation d'électricité relative au mélange de l'eau aux autres matériaux (Tableau 65). Les émissions dans l'air sont celles par défaut relatives au brûlage de gaz naturel et fioul lourd dans EcoInvent. Eurobitume spécifie les émissions de SO₂ basées sur des données de plus de 10 ans, or les émissions de SO₂ ont presque diminué de 50% entre 2005 et 2015. Nous gardons les émissions d'EcoInvent par défaut, avec pour effet une surestimation des émissions de SO₂ et donc des dommages portés à la biodiversité et à la santé humaine par les opérations de resurfaçage.

Tableau 64 Inventaire de chauffage de l'eau pour une tonne d'émulsion

Source énergétique	Procédé	Énergie (MJ/t)
Gaz naturel	heat production, natural gas, at industrial furnace low-NOx >100kW, Europe without Switzerland	3.87E+01
Fioul lourd	heavy fuel oil, burned in refinery furnace, Europe without Switzerland	9.30E+00

Tableau 65 Inventaire de manufacture de l'émulsion (mélange) pour une tonne d'émulsion

Source énergétique	Procédé	Énergie (MJ/t)
Électricité	market for electricity, medium voltage, FR	72,0

2.3.2 Granulats

2.3.2.1 Marché français

La France compte sur son territoire en 2011 environ 2700 sites de production de granulats dont 2300 carrières et 400 sites de recyclage³²⁵. Les volumes de production des carrières peuvent varier entre eux d'un rapport 100³²⁶. Le BTP consomme des granulats issus à 55% de roches massives, 39% de roches meubles et 6% du recyclage, avec des tendances stables entre 1989 et 2009 : à la hausse d'environ 0.70% pour les roches massives et à la baisse de 0.75% pour les roches meubles. Le différentiel tendanciel s'explique par la montée en puissance de l'utilisation de granulats recyclés (de 2.5 à 5.6% sur la même période, en excluant les matériaux ne passant pas par les plateformes de recyclage car étant recyclés sur place comme c'est parfois le cas sur chantier routier). Alors qu'en 2009 la route consommait 33% du stock d'agrégat d'enrobés (=enrobés en fin de vie, recyclés), elle en consommait 65% en 2013 (USIRF 2014). Le taux de réintroduction des agrégats d'enrobés dans les enrobés bitumineux était de 13% en 2013 contre 6% en 2009 (USIRF 2014). Malgré le fort maillage du territoire en carrières, des pénuries localisées peuvent apparaître, et posent problème dans la mesure où le coût du granulats double tous les 25 km selon l'UNPG, du fait du coût du transport en camion³²⁷.

³²⁵ www.unpg.fr/accueil/dossiers/economie/portrait-economique/

³²⁶ De quelques dizaines de milliers de tonnes à plusieurs millions de tonnes par an selon l'UNPG

³²⁷ www.unpg.fr/accueil/dossiers/economie/portrait-economique/

2.3.2.2 Inventaires français

Les granulats des couches de roulement routières doivent être de qualité idoine pour permettre une adhérence suffisante. De ce fait, l'utilisation de granulats recyclés reste encore timide, et le pourcentage d'intégration d'agrégats d'enrobés sera une de nos entrées. Nous devons donc développer deux inventaires : un inventaire relatif à un granulat vierge et un inventaire relatif aux déchets d'enrobés (croûtes ou fraisats).

Nous proposons de créer un procédé « marché français » de granulat vierge. Selon la répartition de consommation du BTP entre roches massives et roches meubles, nous devrions considérer un mix de $55/(55+39)*100 = 59\%$ de granulats issus de roches massives et 41% issus de roches meubles. Néanmoins, une enquête auprès de 8 centrales d'enrobage françaises réalisée par l'USIRF donne le taux de répartition suivant (USIRF 2016d) : 76.4% de granulats massifs et 23.6% de granulats alluvionnaires. Nous utiliserons les ICV de l'UNPG ((UNPG 2011a, 2011b), bien que les relevés de terrain datent de 2007. Les normes d'émissions des engins et PL ont particulièrement pu évoluer en une dizaine d'années. Nous créerons ensuite le procédé de marché français correspondant aux pourcentages calculés. Les gestionnaires pourront par ailleurs choisir un granulat avec une répartition de types de roches (massive ou meuble) différente. Il sera possible de préciser leur transport, un transport par défaut étant implémenté sur la base d'une enquête confidentielle de l'USIRF auprès de 8 centrales d'enrobage : transport par route, train et fleuve pour les roches massives, par route et train pour les roches alluvionnaires (i.e. meubles) (USIRF 2016d). Les ICV ainsi développés sont synthétisés dans le Tableau 66.

Tableau 66 ICV de mise à disposition d'1 tonne de granulat moyenne en centrale en France

Étape	Procédé	Quantité	Unité
Production	Granulat, roche massive, FR (UNPG)	0.764	t
	Granulat, roche meuble, FR (UNPG)	0.236	t
Transport	transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4, RER	2.88E+01	t.km
	transport, freight train, FR	4.38E+01	t.km
	transport, freight, inland waterways, barge tanker, RER	4.47E+00	t.km

Pour les agrégats d'enrobés (ne concernent que les BB, pas les ESU), les inventaires dépendent du choix méthodologique de modélisation. Dans notre cas, il s'agit d'une boucle fermée, donc nous avons deux options : considérer l'avantage du réemploi en sortie (chantier de raboutage) ou en entrée (chantier de reconstruction). L'utilisation des agrégats en valorisation maximale (couche de surface) n'étant pas encore optimale, nous choisissons de considérer les avantages du réemploi à 100% dans le chantier de resurfaçage : il faudrait donc considérer le différentiel de séchage dû au taux d'humidité différent (souvent plus élevé) des agrégats d'enrobés de celui des matériaux vierges, le concassage et le criblage nécessaire après stockage (les agrégats se collent en amas) en centrale d'enrobage, ainsi que le gain en matériaux vierges (5% de liant et 95% de granulats par défaut, on ne tient pas compte de la baisse de qualité, par exemple celle du liant liée à l'oxydation passée). On néglige également le transport des agrégats du chantier de démolition à l'usine de liant, en considérant que ces matériaux auraient dû être transportés de manière similaire en l'absence de réemplois. L'UNPG propose un procédé d'agrégats recyclés que nous utiliserons (2011c).

Nous créons donc les procédés suivants selon les hypothèses détaillées : « market granulat routier vierge FR » et « market transport granulat routier vierge FR », ce dernier permettant éventuellement de calculer des sur-distances d'approvisionnement dans le cas de pénuries locales en granulat à partir de l'inventaire du Tableau 66 privé des flux de production.

Si l'UNPG avance le contraire, il est possible selon les chercheurs de l'IFSTTAR de Nantes de faire une différenciation d'ICV relative à la granulométrie des granulats utilisés (Martaud 2008). C'est ce que permet par exemple le logiciel MEG (Module d'Élaboration des Granulats) développé dans le cadre

d'une thèse par l'IFSTTAR. Les granulométries utilisées en matériaux routiers vont potentiellement de 0/2 mm à 10/14 mm. Plus la granulométrie maximale est basse, plus cela nécessite d'énergie de concassage. Les impacts environnementaux relatifs à la phase d'extraction (tir de mine) et le transport jusqu'au concasseur primaire est commune à tous les granulats. Ensuite, certains granulats vont sortir directement après le concasseur primaire (0/31.5 par exemple) et d'autres vont re-circuler une ou plusieurs fois dans le concasseur. Goyer et al. (2012) proposent une telle différenciation, en utilisant le logiciel MEG. Les deux granulométries les plus classiques en interurbain français sont le 0/10 et le 0/14. Compte tenu de la faible différence d'électricité nécessaire par tonne de granulat entre les deux granulométries classiques (22.6 MJ pour les granulats 6/10mm et 21.4 MJ pour les granulats 10/14 mm), nous n'en tiendrons pas compte, en négligeant également la très probable différence d'énergie de séchage (on pourrait faire l'hypothèse qu'une plus petite granularité implique une surface développée de la matrice granulaire plus importante, donc plus d'énergie nécessaire au séchage).

2.3.3 Postes d'enrobage

2.3.3.1 Parc français

Un poste d'enrobage est une machine, fixe ou mobile, qui permet le mélange du granulat au liant hydrocarboné. Un poste fixe est appelé « centrale d'enrobage ». Nous avons trouvé peu de données, et relativement datées, sur les postes d'enrobage français en ligne. Planète TP³²⁸ en répertoriait environ 500 en 2007, dont 400 fixes et 100 mobiles avec une répartition paritaire entre les postes continus et discontinus. Des informations obtenues en 2017 par le biais d'Eurovia³²⁹ confirment l'existence de 492 postes d'enrobés (DOM inclus), dont 35% leur appartenant répartis à 55% en production continue et 45% en production discontinue. Selon Planète TP³³⁰, leurs capacités sont variables mais un grand nombre d'entre elles peuvent produire 1000 tonnes d'enrobés par jour. Selon les données internes d'Eurovia, leurs brûleurs (tambours de séchage) sont alimentés par les parts suivantes de combustible : 65 % de gaz naturel, 30 % de fioul lourd, 1 % de gaz naturel liquéfié, 2% de gaz de pétrole liquéfié, 1 % de fioul domestique, et 1% de lignite. La chauffe des cuves à bitume sur le parc d'Eurovia s'effectue à 45% à l'électricité et 55 % au gaz naturel ou fioul domestique. En termes de consommation, le parc d'Eurovia présenterait des consommations d'énergie à la tonne d'enrobé d'environ 80 kWh/tonne toute énergie confondue, les tambours sécheurs représentant 87.5% de cette consommation contre 6.25% pour l'électricité du procédé de mélange et 6.25% pour les cuves à bitume. Ces données industrielles françaises sont synthétisées dans le Tableau 67.

Tableau 67 Synthèse des données de consommation énergétique de centrales d'enrobage françaises par procédé de manufacture et par tonne d'enrobé

Procédé	Source énergétique (%)							Énergie totale enrobage (%)	Énergie (kWh/t)
	Électricité	GN	FL	GNL	GPL	FD	Lignite		
chauffage (cuves)	45	27.5	0	0	0	28	0	6.25	5
Séchage (Brûleurs)	0	65	30	1	2	1	1	87.5	70
Mélange	100	0	0	0	0	0	0	6.25	5

2.3.3.2 Procédé de manufacture d'1t d'enrobé à chaud moyen

Basé sur ces consommations du parc français, nous proposons donc le procédé de manufacture d'1t d'enrobé indiqué dans le Tableau 68. Dans le choix des procédés EcoInvent, par défaut de procédés mieux adaptés, nous assimilons le GNL à du gaz naturel et le GPL à du pétrole brûlé en centrale

³²⁸ <http://www.planete-tp.com/centrales-d-enrobage-a-chaud-a802.html>

³²⁹ Echanges par mail en juillet 2017 avec Pierre Bauquesne (Direction Matériel) et Clara Loringuer (Directrice environnement et qualité) d'Eurovia

³³⁰ <http://www.planete-tp.com/centrales-d-enrobage-a-chaud-a802.html>

thermique pour générer chauffage et électricité. Les émissions dans l'air relatives aux combustions sont celles d'Ecolnvent V.3 par défaut. Il existe des données d'émissions françaises pour le procédé de chauffage récoltées par enquête par l'USIRF récemment (USIRF 2016d). Cependant, par souci d'homogénéité des considérations d'émissions de combustion entre les différentes étapes de vie de nos ICV (e.g. émissions en raffineries, émissions en centrale d'un côté pour le chauffage de l'autre pour le séchage), bien que le séchage soit le principal procédé consommateur d'énergie fossile en centrale, nous conserverons les émissions par défaut d'Ecolnvent. Il pourrait être intéressant de comparer en particulier les NO_x et le SO₂ émis dans l'air selon ces deux modèles (impact d'acidification), des changements normatifs forts ayant été adoptés ces dernières décennies. Une enquête menée par l'USIRF nous permet également de compléter ces consommations d'énergie par des consommations d'eau et des émissions dans l'eau (enquête auprès de 8 centrales d'enrobage françaises).

Tableau 68 Procédé de manufacture d'1t d'enrobé

Procédé Ecoinvent		Chauffage	Séchage	Mélange	Total	Unité
INPUT						
Électricité	<i>market for electricity, medium voltage, FR</i>	2.25E+00		5.00E+00	7.25E+00	kWh
GN (+GNL)	<i>heat production, natural gas, at industrial furnace low-NOx >100kW, Europe without Switzerland</i>	1.38E+00	4.62E+01	0.00E+00	4.76E+01	kWh
FL	<i>heavy fuel oil, burned in refinery furnace, Europe without Switzerland</i>	0.00E+00	2.10E+01	0.00E+00	2.10E+01	kWh
GPL	<i>heat, district or industrial, other than natural gas, heat production, light fuel oil, at industrial furnace 1MW, RER without CH</i>	0.00E+00	1.40E+00	0.00E+00	1.40E+00	kWh
FD	<i>heat, central or small-scale, other than natural gas, heat production, light fuel oil, at boiler 100 kW, non-modulating, RER without CH</i>	1.38E+00	7.00E-01	0.00E+00	2.08E+00	kWh
Lignite	<i>heat, central or small-scale, other than natural gas, lignite briquette, at stove 5-15 kW – RER without CH</i>	0.00E+00	7.00E-01	0.00E+00	7.00E-01	kWh
Eau	<i>market for tap water, Europe without Switzerland</i>				7.00E+02	kg
Eau	<i>Flux "water, well, in ground"</i>				9.53E-05	m3
OUTPUT						
	<i>Wastewater, average, GLO</i>				2.32E-03	m3
	<i>Flux « Nitrate » dans l'eau</i>				3.57E-06	kg
	<i>Flux COD, « Chemical Oxygen Demand », dans l'eau</i>				8.26E-04	kg
	<i>Flux « Biologic Oxygen Demand » dans l'eau</i>				4.84E-05	kg
	<i>Flux « Suspended solids, unspecified » dans l'eau</i>				7.49E-04	kg
	<i>Flux « Hydrocarbons, unspecified » dans l'eau</i>				5.82E-06	kg

2.3.3.3 Procédé de manufacture d'1t d'enrobé à froid en centrale

Le profil de consommation d'un poste d'enrobage pour produire une tonne d'enrobé à froid, ou grave-émulsion, est en revanche très différent. Les granulats n'ont pas besoin d'être chauffés par exemple (Goyer et al. 2012), contrairement aux hypothèses prises par Stripple (2001) qui indiquent des consommations en séchage de granulats même un peu supérieures à celles pour la préparation d'enrobés à chaud. Il est pourtant évident que le séchage de granulats à mélanger à une substance aqueuse (l'émulsion contient 40% d'eau) est totalement superflu. En effet, c'est une fois l'eau évaporée que le bitume de l'émulsion se colle aux différents matériaux pour former une couche liée. Des données de consommation de centrales pour la production de grave-émulsion en France sont disponibles dans la littérature (Goyer et al. 2012) mais ne spécifient que partiellement le type d'énergie consommée. Nous reprendrons donc les données récentes obtenues d'Eurovia relatives à la consommation des centrales d'enrobage à chaud françaises, et supprimerons les consommations dues au chauffage des cuves et au séchage des granulats, pour ne conserver que l'énergie relative au

procédé de mélange des matériaux. Nous obtenons ainsi une consommation de 5 kWh d'électricité par tonne d'enrobé à froid, tandis que les données plus anciennes de la littérature indiquaient une consommation totale de 8.19 MJ, soit environ 2.3 kWh. En France, on peut soit utiliser des unités mobiles qui préparent les enrobés sur place, la consommation de mélange se produisant alors dans l'engin de chantier, soit faire de l'enrobage à froid en centrale, et modéliser les impacts par la consommation électrique susmentionnée.

2.3.4 Matériaux de chantier

2.3.4.1 Transport

Entre la centrale et le chantier, nous reprenons l'hypothèse de transport des matériaux (liant mais aussi granulats) du syndicat de l'industrie routière, soit 30 km en camion Euro 4 (USIRF 2016d).

Ces matériaux émettent des fumées voire des poussières. En termes de fumées, des littératures professionnelles (Boulangé et al. 2016; Molleron et Besse 2016) et académiques (P. Petit 2016) existent sur les émissions d'Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP) provenant des liants (couches d'accrochage, enduits ou enrobés) et leurs effets sur la santé. Nous reprenons les hypothèses de calcul choisies par l'USIRF dans le cadre de leur FDES : on considère que les fumées lors du chargement en centrale dépendent du volume d'air déplacé lors des mouvements de matériaux incluant du liant, et qu'elles sont les mêmes pour un chargement de camion qu'en aval d'un finisseur. On connaît grâce à la BDD privée CIMAROUT les émissions derrière un finisseur lors de la mise en œuvre d'enrobé. On crée donc un procédé « *Fumées bitume HAP* » relatif au déplacement d' 1m^3 d'air derrière un finisseur. On peut ensuite faire l'hypothèse qu'un volume d'air déplacé est égal au volume de matériau considéré, et, à défaut de données spécifiques, que les fumées de mise en œuvre d'enrobé et de liants à chaud sont égaux. On considère les masses volumiques suivantes : $\mu(\text{enrobé}) = 2.35\text{ t/m}^3$ et $\mu(\text{liant}) = 1.02\text{ t/m}^3$ ³³¹. On peut donc obtenir les inventaires d'HAP par tonne d'enrobé et de liant transportée, indiqués dans le Tableau 69, mais nous utiliserons directement dans les procédés de production et mise en œuvre des matériaux le procédé « *Fumées bitume HAP* ». On considère ces émissions en zones à faible densité de population, sauf pour le Benzo(b)fluoranthène, le Benzo(k)fluoranthène, dont la densité de la zone d'émission n'est pas spécifiée (pas de données dans Ecolnvent en zone peu dense).

³³¹ $=0.35*1+0.65*1.03$, avec 35% d'eau de densité 1 et 65% de bitume de densité 1.03 dans l'émulsion

Tableau 69 Procédé « Fumées bitume HAP » : inventaire d'émissions relative au chargement d'une tonne d'enrobé ou de liant (calcul : auteur ; données d'émission : CIMAROUT (USIRF 2016d))

Substance émise	Flux dans l'air	Quantité (kg/t enrobé)	Quantité (kg/t liant)
Fluoranthène	<i>Fluoranthene</i>	3.21E-12	7.42E-12
Pyrène	<i>Pyrene</i>	2.15E-12	4.97E-12
Benzo(a)anthracène	<i>Benzo(a)anthracene</i>	1.02E-13	2.36E-13
Chrysène	<i>Chrysene</i>	4.68E-13	1.08E-12
Benzo(b)fluoranthène	<i>Benzo(b)fluoranthene</i>	2.51E-13	5.79E-13
Benzo(j)fluoranthène	<i>PAH, polycyclic aromatic hydrocarbons</i>	9.34E-14	2.16E-13
Benzo(k)fluoranthène	<i>Benzo(k)fluoranthene</i>	1.06E-13	2.45E-13
Benzo(a)pyrène	<i>Benzo(a)pyrene</i>	1.49E-13	3.43E-13
Benzo(e)pyrène	<i>PAH, polycyclic aromatic hydrocarbons</i>	3.57E-13	8.23E-13
Dibenzo(a,h)fluoranthène	<i>PAH, polycyclic aromatic hydrocarbons</i>	5.95E-14	1.37E-13
Benzo(ghi)pérylène	<i>Benzo(g,h,i)perylene</i>	1.91E-13	4.40E-13
Indeno(1,2,3,cd)pyrène	<i>Indeno(1,2,3-cd)pyrene</i>	7.64E-14	1.76E-13
Naphtalène	<i>Naphtalene</i>	3.97E-07	9.17E-07
Acénaphène	<i>Acenaphtene</i>	8.44E-08	1.95E-07
Fluorène	<i>Fluorene</i>	4.66E-08	1.08E-07
Phénanthrène	<i>Phenanthrene</i>	8.33E-08	1.92E-07
Anthracène	<i>Anthracene</i>	3.88E-09	8.96E-09
Fluoranthène	<i>Fluoranthene</i>	5.19E-09	1.20E-08
Pyrène	<i>Pyrene</i>	3.14E-09	7.25E-09
Benzène	<i>Benzene</i>	7.43E-09	1.72E-08
Cyclopentane	<i>Hydrocarbons, unspecified</i>	8.49E-09	1.96E-08
n-Hexane	<i>Hexane</i>	2.12E-08	4.89E-08
Toluène	<i>Toluene</i>	5.95E-08	1.37E-07
Styrène	<i>Styrene</i>	4.25E-09	9.82E-09
Xylènes	<i>Xylene</i>	1.57E-06	3.62E-06
Ethylbenzène	<i>Benzene, ethyl-</i>	1.49E-06	3.44E-06
Formaldéhyde	<i>Formaldehyde</i>	4.25E-09	9.82E-09

2.3.4.2 Couche d'accrochage

Les hypothèses retenues pour développer ce procédé sont celles du syndicat français de construction routière (USIRF) : 500 g/m² d'émulsion et 30 km de transport entre la centrale et le chantier.

ETAPE	Détail	PROCEDE	QUANTITE	UNITES
Matière première	Émulsion	<i>Marché, émulsion, FR</i>	5.00E+02	g/m ²
Transport	Camion, centrale à chantier	<i>market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4</i>	1.50E-02	t.km/m ²
Mise en œuvre	Épandage	<i>Répannage</i>	1.27E+00	MJ/m ²

2.3.4.3 Béton bitumineux

Les hypothèses retenues pour développer ce procédé (voir ICV dans le Tableau 70) sont celles du syndicat français de construction routière (USIRF) : 4.8% de bitume et 3% de perte en granulats vierges, et 30 km de transport entre la centrale et le chantier. Les hypothèses de l'USIRF incluent également 10% de granulats recyclés, ce que nous ne considérerons pas par défaut, puisque nous n'avons accédé à aucune donnée statistique sur cette incorporation moyenne en France (il est d'ailleurs probable que les granulats soient tous vierges en couche de surface pour des raisons de qualité d'adhérence).

Tableau 70 Procédé «Béton Bitumineux moyen FR» : mise à disposition sur chantier d'1 tonne de béton bitumineux moyen sur le marché français

ETAPE	Détail	PROCEDE	QUANTITE	UNITES
INPUT				
Matériaux	Bitume	Market bitume FR	4.80E+01	kg
	Granulats	Market granulats vierge FR	9.81E+02	kg
Manufacture	(mélange)	Manufacture d'une tonne d'enrobé en centrale, FR	1	Unité
Transport	Camion, centrale à chantier	market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4	3.09E+01	t.km
OUTPUT	(fumées chargement)	Fumées bitume HAP	4.26E-01	Unité

2.3.4.4 Enrobé à froid

Aussi appelé grave-émulsion, l'enrobé coulé à froid (ECF) (voir ICV développés dans le Tableau 71) est l'intermédiaire entre l'enduit superficiel et le béton bitumineux très mince : épais d'environ 10 (monocouche) à 20mm (bicouche), c'est un mélange de granulats, d'émulsion de bitume (5.5 à 11%) – non modifié pour les chaussées à faible et moyen trafic ; modifié pour les chaussées à fort trafic – et d'additifs éventuels (dope, fibres, etc.)³³². En France, selon notre enquête, il est majoritairement utilisé sur réseau départemental secondaire, donc sur routes à faible trafic, soit en monocouche soit en bicouche : nous modéliserons donc un ECF monocouche et un ECF bicouche, à 10.3% d'émulsion de bitume non modifiée (hypothèse SEVE, dans les fiches de TRACC-Expert). Le taux de perte de granulats vierges est de 3%. L'émulsion de bitume, entre la raffinerie et la centrale, est transportée sur 80 km (hypothèse SEVE). Les granulats sont transportés sur 30 km. Quand il est enrobé en centrale, il consomme 5 kWh par tonne. Sinon, il est enrobé directement sur chantier en centrale mobile.

Tableau 71 Procédé « Enrobe a froid centrale FR » : mise à disposition sur chantier d'1 tonne d'enrobé coulé à froid marché français

ETAPE	Détail	PROCEDE	QUANTITE	UNITES
Matériaux	Émulsion	Market emulsion bitume FR	1.03E+02	kg
	Granulats	Market granulats vierge FR	9.24E+02	kg
	Enrobage centrale	market for electricity, medium voltage, FR	5.00E+00	kWh
Transport	Camion, centrale à chantier	market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4	3.59E+01	t.km

2.3.5 Mise en œuvre

2.3.5.1 Consommation d'engins

La mise en œuvre fait intervenir deux aspects important : l'utilisation des engins et les émissions d'HAP lorsque les matériaux bitumineux sont mis en place. En termes d'émissions relatives à la mise en place de matériaux bitumineux, l'USIRF propose un modèle prenant en compte le vent, la durée de mise en œuvre et les volumes d'air déplacés pour calculer les émissions de HAP relatives à la mise en œuvre de l'enrobé.

Calculer la consommation des engins nécessaires au resurfacement nécessite de connaître leurs rendements et leur consommation. Nous utilisons certaines données de consommation de l'outil d'évaluation Gaïa développé par l'entreprise de construction routière Eurovia. Les engins sont utilisés 7h par jour, par intermittence : les données de consommation en tiennent compte. Les rendements des machines, calculés très grossièrement, sont principalement issus des fiches de comparaison environnementale de l'outil TRACC-Expert, téléchargeables gratuitement en ligne³³³. Elles pourraient probablement être améliorées avec des retours d'expérience plus larges, néanmoins il est important de noter la forte variabilité des consommations réelles sur chantier. Les chiffrages obtenus, donnés à

³³² cotita.fr/IMG/pdf_K-DLCF_ECF_choix_Techniques.pdf

³³³ <http://tracc-expert.ifsttar.fr/telecharger-v2-tracc-france/>

titre indicatif, sont indiqués dans le Tableau 72. Ces consommations ont toutefois été croisées avec des données espagnoles³³⁴ afin d'en vérifier l'ordre de grandeur.

Tableau 72 Hypothèses de consommation et rendement des engins de chantier nécessaire au resurfaçage

OPERATION	DÉTAIL	CONSOMMATION	RENDEMENT
		l/j	m ² /j
Rabotage	Raboteuse 2 à 2.2m	6.30E+02	8.40E+02
Finissage	Finisseur enrobé 15-20 t	2.28E+02	7.00E+03
Compactage vibrant	Compacteur tandem vibrant V1	6.40E+01	3.50E+03
Compactage pneu	Compacteur à pneu P1	1.05E+02	7.00E+03
Recyclage à froid	Recycleur en place à froid	1.13E+03	4.28E+04
Épandage	Répandeur liant bitumineux	2.34E+02	7.00E+03
Gravillonnage	Gravillonneur	2.34E+02	4.67E+03
Coulage ECF	Machine ECF	3.05E+02	7.00E+03
Chargement	Petite chargeuse <10t	1.40E+03	7.00E+03

Notons que le recycleur à froid est un engin utilisé pour recycler directement sur chantier les matériaux granulaires, mais aussi pour réaliser d'autres tâches (épandage de chaux en terrassement, etc.). La consommation d'un engin type « recycleur Wirtgen 2500 S³³⁵ » serait de 100 à 150 l/h (utilisation de 9h par jour) selon Eurovia, une consommation d'engin particulièrement élevée. Néanmoins, ce n'est pas nécessairement l'engin utilisé dans le cas des ECF, car les graves-émulsions peuvent être préparées en centrales.

2.3.5.2 Comparaison de modèles d'émissions d'engins

Nous utilisons ensuite ces consommations pour modéliser l'impact environnemental relatif à la mise en œuvre de la chaussée. Pour cela, nous devons connaître les émissions relatives aux consommations de carburant. Nous avons plusieurs possibilités :

1. utiliser simplement le procédé « *diesel, burned in building machine* » d'EcoInvent, qui tient compte à la fois de la consommation du carburant et de l'émission des machines
2. Utiliser le fascicule AFNOR FD P 01-015 relatif à l'émission des engins de chantier³³⁶
3. S'appuyer sur le travail de thèse réalisé par Adrien Capony (2013) à l'IFSTTAR
4. Utiliser les données d'émissions de l'Agence de l'Environnement Européenne (European Environment Agency 2017)

La solution (1) est peu recommandable dans la mesure où les données d'émissions proviennent d'une BDD suisse des années 1990. EcoInvent précise qu'il ne faut pas utiliser ce procédé quand sa contribution est importante dans le système évalué. La solution (2) n'est également pas idéale, dans la mesure où le fascicule est obsolète du fait de changements technologiques importants. Le travail de thèse d'Adrien Capony est plus récent et a étudié des engins en normes Euro IIIA ou B. Le logiciel ECORCE s'appuie sur les données du fascicule FDP01-015 mises à jour par ce travail. Enfin, la solution (4) consiste en l'utilisation des données européennes, relativement récentes (mise à jour du parc et des émissions moyennes en 2016), mais dont les incertitudes n'en sont pas plus faibles pour autant,

³³⁴ <https://en.itec.cat/database/>

³³⁵ <http://www.smdm.ma/pdf/wirtgen/stabilisatrices-de-sol/WR2500S.pdf>

³³⁶ Norme annulée en juin 2017, voire au lien suivant : <https://www.boutique.afnor.org/norme/fd-p01-015/qualite-environnementale-des-produits-de-construction-fascicule-de-donnees-energie-et-transport/article/765471/fa137708>

dans la mesure où l'on propose un inventaire d'émissions générique pour tous les engins industriels et routiers. Les facteurs d'émissions proposés permettraient d'obtenir une erreur relative inférieure à 30 % pour les NOx, 50 % pour le CO et les VOC-NM, 200% pour le N₂O, le NH₃, le CH₄ et les particules en moyenne nationale. C'est cette dernière proposition que nous retenons. Nous obtenons l'ICV indiqué dans le Tableau 73. Notons que depuis 2010, en France tout au moins, les engins de chantier doivent utiliser des carburants à faible teneur en soufre³³⁷. Nous spécifions les émissions en zone à faible densité de population quand cela est possible dans la mesure où nous nous situons sur des routes interurbaines. Un travail encore plus fin serait de calibrer spécifiquement le flux selon la densité réelle par tronçon routier selon une approche davantage spatialisée de l'ACV (Peuportier et al. 2017). Nous ajoutons à cet inventaire d'émissions l'amortissement de la machine de chantier et l'utilisation ainsi que le retraitement du lubrifiant, selon les quantités imputées par EcoInvent dans ses ICV d'engins de chantier. Nous obtenons les inventaires d'utilisation d'engins de chantier présentés dans le Tableau 73.

Tableau 73 Procédé relatif à la combustion d'1 tonne de diesel (basse teneur en soufre) dans un engin de chantier

ETAPE	DETAIL	PROCEDE	QUANTITE	UNITES
INPUT	Diesel	<i>diesel production, low-sulfur, Europe without Switzerland</i>	1.00E+00	t
	Lubrifiant	<i>lubricating oil, RER</i>	2.16E+01	kg
	Machine	<i>building machine, RER</i>	5.63E-03	unité
	Incinération lubrifiant	<i>treatment of waste mineral oil, hazardous waste incineration, Europe without Switzerland</i>	2.16E+01	kg
OUTPUT	BC	<i>Carbon black, elementary flows/air/unspecified</i>	1.31E+03	g
	CH ₄	<i>Methane, elementary flows/air/low pop density</i>	8.30E+01	g
	CO	<i>Carbon monoxide, fossil, elementary flows/air/low pop density</i>	1.08E+04	g
	CO ₂	<i>Carbon dioxide, fossil, elementary flows/air/low pop density</i>	3.16E+03	kg
	N ₂ O	<i>Dinitrogen monoxide, elementary flows/air/low pop density</i>	1.35E+02	g
	NH ₃	<i>Ammonia, elementary flows/air/low pop density</i>	8.00E+00	g
	NMVOOC	<i>NMVOOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin, elementary flows/air/low pop density</i>	3.38E+03	g
	NOx	<i>Nitrogen oxides, elementary flows/air/low pop density</i>	3.26E+04	g
	PM ₁₀	<i>Particulates, < 10 um, elementary flows/air/low pop density</i>	2.10E+03	g
	PM _{2.5}	<i>Particulates, < 2.5 um, elementary flows/air/low pop density</i>	2.10E+03	g
	TSP	<i>Particulates, > 2.5 um, and < 10um, elementary flows/air/low pop density</i>	2.10E+03	g
	Cadmium	<i>Cadmium, elementary flows/air/low pop density, long-term</i>	1.00E-02	mg
	Copper	<i>Copper, elementary flows/air/low pop density</i>	1.70E+00	mg
	Chromium	<i>Chromium, elementary flows/air/low pop density</i>	5.00E-02	mg
	Nickel	<i>Nickel, elementary flows/air/low pop density</i>	7.00E-02	mg
	Selenium	<i>Selenium, elementary flows/air/low pop density</i>	1.00E-02	mg
	Zinc	<i>Zinc, elementary flows/air/low pop density</i>	1.00E+00	mg
	Benz(a)-anthracène	<i>Benz(a)anthracene, elementary flows/air/unspecified</i>	8.00E+01	µg
	Benzo(b)-fluoranthène	<i>Benzo(b)fluoranthene, elementary flows/air/unspecified</i>	5.00E+01	µg
	Dibenzo(a,h)-anthracène	<i>Dibenz(a,h)anthracene, elementary flows/air/low pop density</i>	1.00E+01	µg
Benzo(a)pyrène	<i>Benzo(a)pyrene, elementary flows/air/unspecified</i>	3.00E+01	µg	
Chrysène	<i>Chrysene, elementary flows/air/unspecified</i>	2.00E+02	µg	
Fluoranthène	<i>Fluoranthene, elementary flows/air/low-pop density</i>	4.50E+02	µg	
Phénanthrène	<i>Phenanthrene, elementary flows/air/low-pop density</i>	2.50E+03	µg	

³³⁷ <https://www.lemoniteur.fr/article/engins-de-chantier-naissance-du-gazole-non-routier-13234764>

Attention : il faut spécifier que les émissions dans l'air de CO₂ et de CO sont d'origine fossile, sans quoi les impacts de ces flux ne sont pas pris en compte dans OpenLCA avec EcolInvent 3.3.

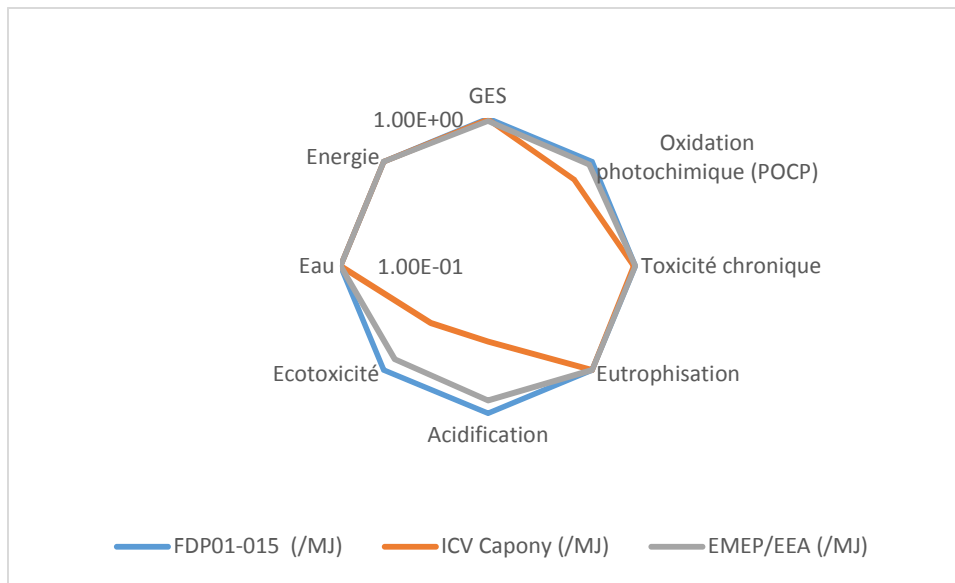


Figure 71 Comparaison des résultats de quantification de quelques impacts environnementaux (jeux d'indicateurs de l'éco-comparateur routier ECORCE) du procédé de combustion des engins de chantier selon les méthodes (2), (3) et (4)

À titre de comparaison, nous présentons les résultats de quantification de quelques impacts environnementaux : ceux calculés sur le jeu d'indicateurs de l'éco-comparateur routier ECORCE pour les méthodes (2), (3) et (4) sur le diagramme radar de la Figure 71, et ceux calculés selon un set d'indicateurs utilisant les méthodes CML 2001 et EDIP pour trois procédés – ceux des méthodes (1) et (4) et le procédé EcolInvent « *machine operation, diesel, >= 18.64 kW and < 74.57 kW, steady-state* » d'utilisation d'une machine de chantier de puissance comprise entre 19 et 75 kWh utilisée en continu aux USA (émissions de l'US-EPA, MOVES).

La Figure 71 met en évidence des impacts plus faibles en écotoxicité, acidification et oxydation photochimique dans le modèle de Capony, qui tient compte d'un engin en norme Euro III. Cela signifierait qu'en moyenne, le parc européen actuel est plus émetteur qu'un engin Euro III puisque le modèle de l'EMEP présente des résultats plus élevés. Ils sont en revanche un peu plus faibles sur ces trois indicateurs que les émissions du fascicule FDP01-015. La Figure 72 montre une diminution de l'impact en eutrophisation, acidification et toxicité humaine relatifs à l'utilisation des engins de chantier, entre les années 1990 (procédé suisse) et les années 2000 (procédé américain) et 2010 (procédé EMEP), suivant des contraintes d'émissions toujours plus strictes dans le temps. L'impact inférieur du procédé américain par rapport au procédé européen plus récent en termes d'acidification et d'eutrophisation est cependant étonnant. Il est possible que les émissions de NO_x des engins américains aient été sous-estimés (cf. le « diesel gate »), tandis que les contributions du SO₂ sont totalement en accord avec la législation de 2010. Comme Vidal et al. (2013), nous adopterons donc la modélisation de l'Agence Européenne pour l'Environnement, qui s'appuie sur des données de parcs actualisés régulièrement (dernière actualisation en mai 2017) selon des taux de pénétration des technologies.

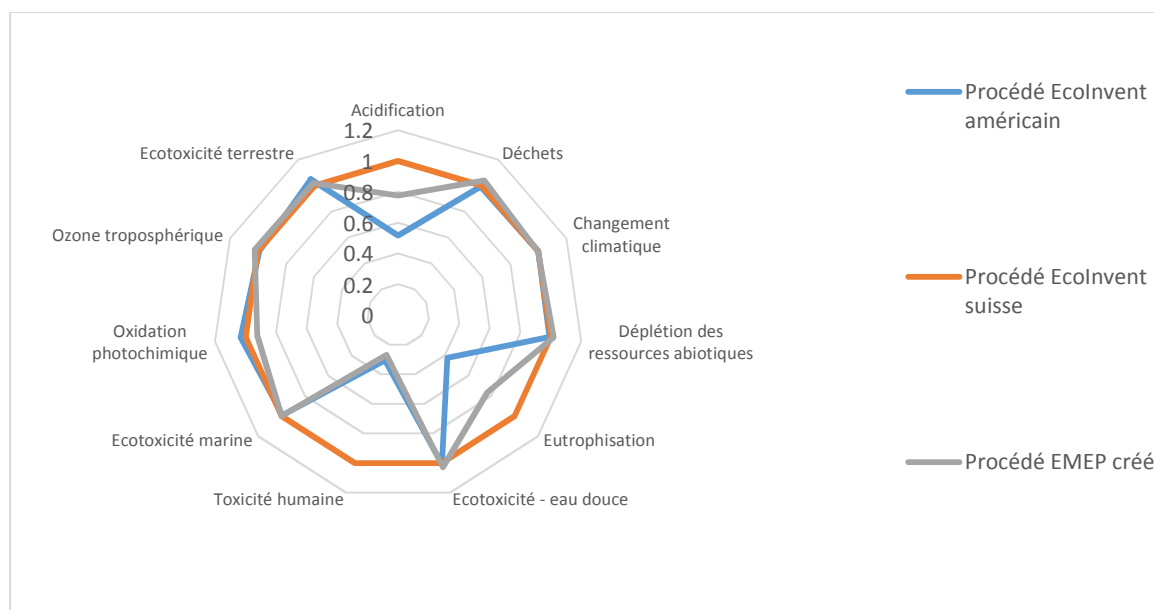


Figure 72 Comparaison des résultats de quantification de quelques impacts environnementaux des engins de chantier selon les méthodes (1) et (4) et pour le procédé d'utilisation d'une machine de chantier de puissance comprise entre 19 et 75 kWh utilisée en continu aux USA

2.3.5.3 Procédés d'utilisation de machines créés

Les procédés d'utilisation de machines ainsi créés sont indiqués dans le Tableau 74, par journée d'utilisation, en s'appuyant sur l'inventaire de combustion créé selon les données de l'Agence Européenne de l'Environnement, et présenté dans le Tableau 73.

Tableau 74 Procédé d'utilisation journalière des engins de mise en œuvre routière principaux

ETAPE	PROCEDE	QUANTITE	UNITE
RABOTAGE	Engin de chantier, RER	5.32E-01	unité/j
FINISSAGE	Engin de chantier, RER	1.93E-01	unité/j
COMPACTAGE VIBRANT	Engin de chantier, RER	5.41E-02	unité/j
COMPACTAGE PNEU	Engin de chantier, RER	8.87E-02	unité/j
RECYCLAGE A FROID	Engin de chantier, RER	9.51E-01	unité/j
EPANDAGE	Engin de chantier, RER	1.98E-01	unité/j
GRAVILLONNAGE	Engin de chantier, RER	1.98E-01	unité/j
COULAGE ENROBE A FROID	Engin de chantier, RER	2.58E-01	unité/j
CHARGEMENT	Engin de chantier, RER	1.18E+00	unité/j

2.3.6 Synthèse des inventaires développés

2.3.6.1 Macroprocédés en amont du chantier

Nous récapitulons dans le Tableau 75 les macroprocédés relatifs aux productions matériaux du chantier de resurfaçage.

Tableau 75 Macroprocédés créés relatifs aux productions de matériaux de chantier de resurfaçage

Macroprocédé créé	Description
Bitume européen importe RER	1t de bitume produit en Europe, à disposition en centrale ou usine à liant française
Bitume FR	1t de bitume produit en France, à disposition en centrale ou usine à liant française
Market bitume FR	1t de bitume consommée en France, à disposition en centrale ou usine à liant française
Market granulats routier vierge FR	1t de granulats moyen mis à disposition en centrale en France
Market polymère FR	1t de polymère, à disposition en usine à liant
Market bitume modifiée FR	1t de bitume modifié à disposition en usine à liant/centrale
Market émulsion de bitume FR	1t d'émulsion en centrale
Enrobage béton bitumineux FR	Manufacture d'1t d'enrobé en centrale française (hors matériaux)
Béton Bitumineux moyen sur chantier FR	Mise à disposition d'1 tonne de BB moyen (4.8% de bitume, 3% de perte en granulats)
Enrobe à froid FR	Mise à disposition d'1 tonne d'enrobé à froid moyen (7% d'émulsion)

2.3.6.2 Macroprocédés de techniques types

A/ Accrochage

Nous avons créé un macroprocédé « couche d'accrochage 1 m² », à 500 g/m² (USIRF 2016d), en utilisant des données de consommation et de rendement de la répanduse ainsi que des hypothèses de transport (80 km, type de camion) provenant de l'industrie routière française³³⁸. Son inventaire est indiqué dans le Tableau 76 ci-dessous.

Tableau 76 ICV du macroprocédé « couche d'accrochage, 1m² »

ETAPE	Détail	PROCEDE	QUANTITE	UNITES
Matière première	Émulsion	Market émulsion FR	5.00E+02	g/m ²
Transport	Camion, centrale à chantier	Market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4	4.00E-02	t.km/m ²
Mise en œuvre	Épandage	Epannage 1 jour	2.82E-05	j/m ²

B/ Couche de surface

Nous avons développé les ICV des techniques de resurfaçage que l'on retrouve sur réseau interurbain français selon les réponses obtenues à notre questionnaire (voir Figure 73). Une opération de rabotage peut être ajoutée ou pas selon le cas d'étude (voir procédé créé sous le nom « rabotage, 1m² »). Le BBSG et les ESU sont les techniques les plus populaires, suivies du BBM et de l'ECF.

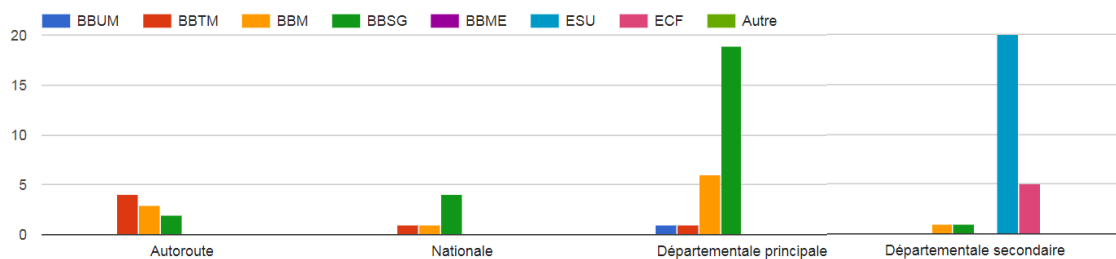


Figure 73 Réponse de gestionnaires de routes interurbaines françaises à la question "quelle technique de resurfaçage majoritaire utilisez-vous sur votre réseau"

Ces ICV sont présentés dans le Tableau 77. Les données en termes de choix d'engins et de rendement sont issues de la littérature professionnelle française (USIRF, SEVE, TRACC-Expert, etc., voir ci-dessus selon le procédé). Les épaisseurs retenues pour les techniques sont respectivement 6cm d'enrobé pour

³³⁸ Outils Gaïa, SEVE, et TRACC-Expert

le BBSG, 4cm pour le BBM, 2.5cm pour le BBTM, et 1.5cm pour le BBUM. Les quantités surfaciques d'émulsions et de granulats pour les ESU proviennent de TRACC-Expert. Notons que les ESU peuvent également être réalisés avec du bitume en lieu et place de l'émulsion. Les épaisseurs des ECF sont issues de notre questionnaire. Notre calcul de masse surfacique en ECF est effectué en considérant un taux de vide de 12% (contre 8% pour les enrobés à chaud), et corrobore les masses surfaciques trouvées sur internet³³⁹. La mise en œuvre est considérée identique en mono- et bicouche. Les opérations de balayage sont négligées faute de données. Néanmoins, l'erreur impliquée est supposée très faible.

Tableau 77 Synthèse des ICV développés par technique

TECHNIQUE	ETAPE	Détail	PROCEDE	QUANTITE	UNITES
BBSG	Accrochage		Accrochage 1m2	1.00E+00	m ²
	Enrobé		Béton Bitumineux moyen, FR	1.41E-01	t/m ²
	Mise en œuvre	Émissions HAP répandage	Fumées bitume HAP	6.01E-02	unités/m ²
		Finisseur	Finissage 1 jour	1.43E-04	j/m ²
Compacteur V1		Compactage vibrant 1 jour	2.86E-04	j/m ²	
BBM	Accrochage		Accrochage 1m2	1.00E+00	m ²
	Enrobé		Béton Bitumineux moyen, FR	9.41E-02	t/m ²
	Mise en œuvre	Émissions HAP répandage	Fumées bitume HAP	4.00E-02	unités/m ²
		Finisseur	Finissage 1 jour	1.43E-04	j/m ²
Compacteur V1		Compactage vibrant 1 jour	2.86E-04	j/m ²	
BBTM	Accrochage		Accrochage 1m2	1.00E+00	m ²
	Enrobé		Béton Bitumineux moyen, FR	5.89E-02	t/m ²
	Mise en œuvre	Émissions HAP répandage	Fumées bitume HAP	2.50E-02	unités/m ²
		Finisseur	Finissage 1 jour	2.50E-02	j/m ²
Compacteur V1		Compactage vibrant 1 jour	2.86E-04	j/m ²	
BBUM	Accrochage		Accrochage 1m2	1.00E+00	m ²
	Enrobé		Béton Bitumineux moyen, FR	3.53E-02	t/m ²
	Mise en œuvre	Émissions HAP répandage	Fumées bitume HAP	1.50E-02	unités/m ²
		Finisseur	Finissage 1 jour	1.43E-04	j/m ²
Compacteur V1		Compactage vibrant 1 jour	2.86E-04	j/m ²	
ECF monocouche mobile	Matériaux		Enrobe a froid FR	1.50E-02	t/m ²
	Mise en œuvre	Machine ECF	Coulage enrobe froid 1 jour	1.43E-04	j/m ²
		Petite chargeuse <10t	Chargement 1 jour	1.43E-04	j/m ²
		Balayeuse aspiratrice	RAS		j/m ²
Compacteur V1		Compactage vibrant 1 jour	1.43E-04	j/m ²	
ECF bicouche centrale	Matériaux		Enrobe a froid FR	3.00E-02	kg/m ²
			Enrobage a froid	3.15E-01	t/m ²
	Mise en œuvre	Finisseur	Finissage 1 jour	1.43E-04	j/m ²
		Petite chargeuse <10t	Chargement 1 jour	1.43E-04	j/m ²
		Balayeuse aspiratrice	RAS		j/m ²
		Compacteur V1	Compactage vibrant 1 jour	1.43E-04	j/m ²

339

<http://entretiendesroutes.ca/wp-content/uploads/2014/12/edrfichedescriptiveecfv4.pdf>

ou

http://www.cotita.fr/IMG/pdf_K-DLCF_ECF_choix_Techniques.pdf

ESU bicouche					
Matières premières	Granulats	<i>Market granulats vierge FR</i>	2.00E+01	kg/m ²	
	Émulsion	<i>Market emulsion FR</i>	2.50E+00	kg/m ²	
Transport	Camion	<i>transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4</i>	6.75E-01	t.km/m ²	
Mise en œuvre	Répandeuse de liant bitumineux	<i>Epandage 1 jour</i>	1.43E-04	j/m ²	
	Gravillonneur	<i>Gravillonnage 1 jour</i>	4.29E-04	j/m ²	
	Compacteur à pneu P1	<i>Compactage pneu 1 jour</i>	1.43E-04	j/m ²	
ESU bicouche pregravillonne					
Matières premières	Granulats	<i>Market granulats vierge FR</i>	3.00E+01	kg/m ²	
	Émulsion	<i>Market emulsion FR</i>	3.50E+00	kg/m ²	
Transport	Camion	<i>transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4</i>	1.01E+00	t.km/m ²	
Mise en œuvre	Répandeuse de liant bitumineux	<i>Epandage 1 jour</i>	1.43E-04	j/m ²	
	Gravillonneur	<i>Gravillonnage 1 jour</i>	4.29E-04	j/m ²	
	Compacteur à pneu P1	<i>Compactage pneu 1 jour</i>	1.43E-04	j/m ²	

2.3.6.3 Limites et perspectives

En termes de matériaux de resurfacement, nous faisons le choix de modéliser par défaut un seul procédé moyen de production d'enrobé, et un procédé d'enduit. Sur la base des procédés différenciés développés précédemment pour le cas de la France, les utilisateurs de la méthode seront à même de spécifier leurs techniques de resurfacement. Il serait également possible, dans un second temps et en se basant sur la littérature, de développer des modèles plus fins selon la température de manufacture de l'enrobé, le taux d'AE, et en permettant de spécifier le type de centrales et ses sources d'énergie.

Les améliorations suivantes nous semblent importantes pour une suite de ces travaux : développer des inventaires d'émission spécifiques aux usines françaises (raffineries, centrales), a minima en SO₂, car globalement ces émissions ont un impact important (en termes d'acidification en particulier) ; développer des inventaires spécifiques aux additifs des liants : polymères, fluxants, etc. Comme le montrent les impacts du liant modifié, 3.5% de copolymère dans le liant implique un impact environnemental substantiel, notamment en termes de changement climatique ; développer des ICV spécifiques à l'exploitation actuelle des pétroles bruts, et à leur transport par pipelines et tankers selon les chaînes logistiques en effet suivies, puisque l'impact va dépendre fortement de la motorisation, du carburant, et du profil de vitesse et d'accélération pour les tankers, quand celui des pipelines dépend fortement de la topographie des pipes elle-même.

Notons que les émissions de HAP liées aux liants bitumineux ne sont prises en compte qu'au chargement en usine à liant ou centrale d'enrobage et sur chantier. Il n'y a pas de raison que de telles émissions ne se produisent pas sur la chaîne complète de transformation du pétrole. Toutefois, à défaut de données spécifiques, nous négligeons ces émissions de HAP en amont.

3 ICV de maintenance des véhicules routiers

Le Conseil Européen pour la R&D automobile (EUCAR) a publié dès 1997 son guide d'application de l'ACV au secteur automobile, qui a permis une multiplication d'études de cas d'ACV sur l'automobile et plus généralement sur les véhicules routiers. Parmi les études d'équipementiers, citons celle du partenariat des équipementiers automobiles des États-Unis (USAMP/LCA 1998), de Volkswagen (Volkswagen AG 2008b, 2008a; Schweimer et Levin 2000), de Renault (Renault 2011, 2015), de Fiat-

Chrysler Automobile³⁴⁰, bien que d'autres compagnies comme Ford, FCA, IVECO ou VOLVO se soient également saisies du sujet. Nous nous intéressons plus précisément à la phase d'entretien des véhicules routiers et en particulier aux opérations dont la fréquence est influencée par l'état de surface de la route : changement des amortisseurs et des pneumatiques. Cette phase est parfois présentée comme ayant peu d'impact sur le cycle de vie d'une automobile complet. Cependant, cette déclaration se base sur la seule considération de l'impact au changement climatique (Volkswagen AG 2008a): une ACV multicritère utilisant la méthode CML 2001 sur deux modèles de fiat 500 – électrique et thermiques – a montré que cette phase contribuait de l'ordre de 50% à l'impact potentiel de déplétion de la couche d'ozone par exemple (Capitano 2015).

3.1 Revue de littérature des ICV

3.1.1 Modélisation d'EcoInvent

Les données relatives aux ICV d'EcoInvent sont détaillées dans le rapport n°14 d'EcoInvent, consacré aux services de transport (Spielmann, Bauer, et Dones 2007). Les modèles présentés dans ce rapport sont ceux des ICV en versions V2, majoritairement reprises dans les versions V3.

3.1.1.1 Voiture particulière

Deux inventaires se rapportent à l'entretien des VP : « *maintenance, passenger car* » ou « *maintenance, passenger car, electric, without battery* » (+ versions de marchés « *market...* »). Pour la VP classique, il s'agit d'inventaires relatifs à une Golf A4 en 2000 dans un contexte allemand (issus du « Super Ordinate Plan », pas d'informations supplémentaires), que l'on prend en première estimation pour l'Europe. Une Golf A4 fait un poids à vide compris entre 1083 et 1477 kg. Dans la V2, cet ICV inclut les matériaux utilisés du fait de la consommation de pièces d'usure (dont transport par rail et route des pièces) ainsi que la consommation d'électricité des garages pour le changement de ces pièces.

3.1.1.2 Véhicules Utilitaires Légers

Cet ICV, sous le nom de procédé « *Maintenance, van < 3.5t* », est partiellement issu de deux publications ((Frischknecht et al. 1996; Maibach, Peter, et Seiler 1999) complétées par l'ICV des VP ajusté (détails de calculs inconnus). Il serait représentatif de conditions d'utilisation de 30 000 km/an (Spielmann, Bauer, et Dones 2007).

3.1.1.3 PLF

Dans la V2 d'EcoInvent, la *maintenance* des PLF est évaluée à partir de l'article de Frischknecht et al. (1996), de ASTAG (1991) et d'informations provenant d'IVECO (constructeur de PL), complétées de dires d'experts. Les ICV de l'entretien de 3 types de véhicules sont proposés : « *maintenance, lorry 16t* », « *28t* » et « *40t* ». On considère que les véhicules roulent 70 000 km/an sur routes interurbaines. La performance des pneumatiques dépend du nombre d'essieux, et du nombre de stops and starts.

3.1.1.4 Bus

L'ICV du procédé « *maintenance, bus* » a été réalisé à dires d'experts, et inclut les matériaux des pièces d'usure et l'électricité consommée en garages estimée annuellement sur la base de données des services de garagistes des entreprises de transport suisse de la ville de Berne : consommations d'électricité (5.4 MWh/bus.an), de gaz naturel et de fioul (3.2 GJ/bus.an pour chaque énergie pour le chauffage), et d'eau (39 m³/bus.an) entre autres.

³⁴⁰ <http://reports.fcagroup.com/sustainability/2015/products-and-processes/product-innovation-and-responsible-mobility/design-vehicle-life/application#start>

3.1.2 Autres études

3.1.2.1 Entretien véhiculaire hors pneumatiques

L'évaluation environnementale de la phase d'entretien des véhicules routiers a été abordée par deux types d'ACV : l'ACV hybride et l'ACV procédés. La première approche a été choisie par un chercheur en Californie (Chester 2008) : pour combler les lacunes en données physiques, il a utilisé des coûts kilométriques moyens en pneumatique (0.008 \$/VMT) et autres postes d'entretien (0.05 \$/VMT : 0.056 \$/VMT), issus de l'American Automobile association (USAMP/LCA 1998), et les a relié aux impacts environnementaux générés selon une méthode d'EIO. Il n'y a dans cette étude ni détails des pièces usées, ni paramétrisation possible selon l'âge kilométrique du véhicule. L'étude américaine originelle propose des ICV détaillés mais non-sécables entre sous-systèmes et étapes du cycle de vie du véhicule modélisé. Elle montre néanmoins que l'énergie grise de la suspension d'un véhicule sur son cycle de vie (incluant un changement d'amortisseurs sur la durée de vie totale de 120 000 km) est loin d'être négligeable : elle représente 14% du total de l'énergie grise d'un véhicule de 1500 kg (USAMP/LCA 1998), soit 7% par jeu complet d'amortisseurs. L'approche ACV procédés est quant à elle utilisée depuis la fin des années 1990. ECOBILAN S.A. (1997) répertorie toutes les premières études d'ACV réalisées dans le secteur automobile. Cette revue de littérature listait déjà 25 études en 1996 relatives aux pièces et matériaux des véhicules en Europe, études restées internes ou rendues publiques. Quatre études auraient pu être particulièrement intéressantes dans le cadre de l'entretien routier, mais sont difficile à tracer : celle de Fiat sur les disques de freins (non publiée), celles de l'université de Stuttgart sur les filtres à air (pas de référence) et les filtres à huile (Eyerer 1994), et celle de la Dow Chemical Company contenant des ICV de roues et d'amortisseur à lame (Fussler et Krummenacher 1991) (lien de publication non fonctionnel). De nombreuses études traitent de l'aspect environnemental des pneumatiques ou de la gomme : nous les présentons dans la section suivante.

Des durée de vie typiques des composants des éléments de suspension sont rapportés dans un article de Capitano (2015) (source originelle : annexes d'un article de Ridge (1998)³⁴¹) et basées sur un sondage auprès de 7 concessionnaires allemands entre avril et juillet 1994 et sur les données du centre pour l'énergie de Munich (Zentrum für angewandte energiewirtschaft, Munich). Six DVT – minimale, moyenne et maximale en milliers de kilomètres (mkm) et en nombre d'années – sont fournis pour les amortisseurs avant (80/103/130 mkm – 7/7.3/8 ans) et arrière (60/103/130 mkm ; 7/7.3/8 ans), les ressorts avant et arrière (130/140/150 mkm ; 10/10/10 ans), les rotules (« wheel bearing », 50/92/150 mkm ; 10/10/10 ans), les joints (90/110/160 mkm ; 10/10/10) et les butées en caoutchouc avant et arrière (100/125/150 mkm ; 6/6/6 ans). Les DVT ont toutefois possiblement évolué en une vingtaine d'années.

Plus récemment, (Hawkins et al. 2013)(Hawkins et al. 2013)Hawkins et al. (2013) ont publié des inventaires de pneumatiques, de châssis, et d'entretien comprenant consommation d'énergie du garage et usure des pneus et freins, consultables dans un tableur Excel joint à l'article. L'usure des freins est basée sur Garg et al. (2000), celle des pneus sur le travail de Röder (2001) (cependant, aucun travail sur l'usure des pneus n'a été trouvé dans le travail cité). Des ACV réalisées par Renault (Renault 2011, 2015) tiennent également compte d'une phase de maintenance des véhicules incluant un panel d'opérations, dont la seule qui varie avec l'état des routes est celle du changement de pneumatiques.

3.1.2.2 Pneumatiques

Plusieurs études d'ACV se sont intéressées aux pneumatiques routiers dans différents contextes géographiques et temporels. Nombreux sont ceux ne mettant pas à disposition leurs ICV dans les versions consultées (Saur et al. 1997; Continental 1999; ETRMA 2017). L'étude réalisée par Pré-Consultant pour l'ETRMA, portant sur un pneu européen type (2001), ne semble même plus disponible en ligne : la synthèse mise à disposition ne permet pas de remonter aux ICV. Récemment, plusieurs

³⁴¹ Après commande et lecture de l'article, nous n'avons pas trouvé trace de ces données.

études ont proposé des ICV de pneumatiques (CRR 2008; Cobert 2009; Sun et al. 2016), certaines s'intéressant plus précisément au rechapage (Boustani et al. 2010; CRR 2008), à la fin de vie (ETRMA 2009, 2015b; US EPA 2015), et aux matériaux alternatifs (Lin, Chien, et Chiu 2016; Rasutis 2014; Soratana et al. 2017). Une thèse de master publiée a posteriori en revue (Bras et Cobert 2011) a même été l'occasion de réaliser l'ACV d'un pneumatique novateur sans chambre à air (Cobert 2009) en contexte américain. Des articles plus sommaires sur l'aspect environnemental traitent également de la question de l'économie des pneumatiques (Ferrer 1997; E&Y 2016). Le rapport de Cobert (2009) présente l'avantage de très bien détailler les ICV récupérés dans la littérature ou réalisés, sous la forme de liste de procédés et flux EcoInvent, en annexe : gomme synthétique et naturelle, noir de carbone, oxyde de zinc, acide stéarique, etc. D'autres inventaires au format EcoInvent (notamment de gomme) peuvent également être trouvés en annexe d'un rapport de master plus récent (Rasutis 2014). La publication d'ICV de gomme naturelle dans la littérature est relativement récente (Cobert 2009; Rasutis 2014; Soratana et al. 2017).

Les trois études qui nous semblent les plus intéressantes pour développer nos inventaires de production de pneus de tourisme sont celles présentées dans le Tableau 78.

Tableau 78 Sélection des trois ACV les plus pertinentes pour la construction de nos inventaires de production de pneus de tourisme

Auteur principal	Année	Contexte géographique	Représentativité technologique	Type de pneu
ETRMA	2001	Europe	2000?	P195/65 R15
Cobert	2009	États-Unis	1995 et 2000	P205/45R17
Sun	2016	Chine	2014	P205/55R16

Ces trois études présentent des différences en termes de composition massique de types de matières premières mais également en termes d'énergie de manufacture comme le montre la Figure 74. Notre attention est attirée par la différence de 30% entre la consommation énergétique de manufacture d'un pneu chinois dans l'étude de Sun et al. et celle du pneu américain dans l'étude de Cobert. Nous avons donc fait appel à un expert de Michelin pour critiquer ces chiffres³⁴² : selon lui, on peut considérer actuellement une consommation d'énergie de manufacture d'environ 20-25 kWh/pneu de 10kg, soit environ 80 MJ. Ce chiffre corrobore tout à fait l'étude chinoise (Sun et al. 2016) et est en-deçà des données du rapport de Cobert (2009). Cependant, Sun et al. ne considèrent que deux types de consommations – 45% d'électricité et 55% de vapeur. À dire d'expert, le mix énergétique de cette consommation varierait fortement, mais se répartirait plutôt à 40% en électricité, 20% en vapeur et 40% en gaz naturel³⁴³. Enfin, les impacts calculés dans ces études ne nous permettent aucune comparaison, dans la mesure où Cobert (2009) utilise la méthode de caractérisation EcoIndicator99-score unique tandis que Sun et al. (2016) ont choisi la méthode CML 2001.

³⁴² Echange par e-mail en décembre 2016 avec Romain Muggeo, spécialiste ACV chez Michelin

³⁴³ Echange par e-mail en janvier 2018 avec Romain Muggeo, spécialiste ACV chez Michelin

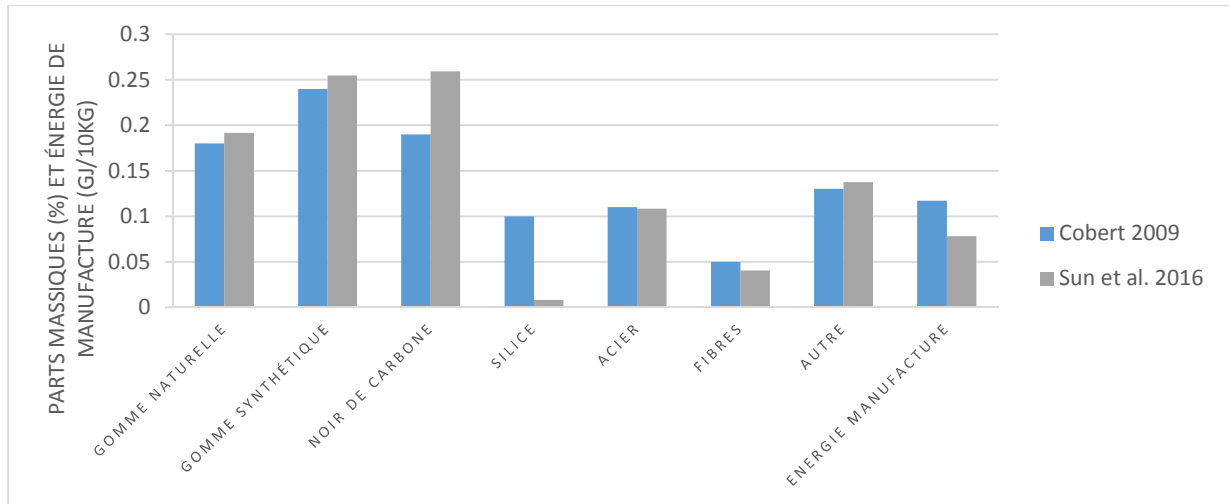


Figure 74 Comparaison des données d'inventaires de production de pneumatiques touristes

En ce qui concerne les PL, nous n'avons trouvé qu'une référence ancienne sur une approche de métabolisme industriel (Beukering et Janssen 2000). Quelques études donnent des bilans massiques de composition en matériaux (Evans et Evans 2006; Boustani et al. 2010; Pacheco-Torgal et al. 2014; ETRMA 2015a). Les pneumatiques PL contiendraient davantage de gomme naturelle en proportion par rapport aux proportions réciproques des pneus de tourisme (ETRMA 2015a; Dunn et Jones 1991).

La conception des pneumatiques est adaptée aux conditions climatiques, aux charges, à l'état des routes et au consommateur³⁴⁴. De ce fait, les matériaux sont assez variables et il est difficile de modéliser un pneu type. Les données d'ICV sont donc plutôt de basse qualité, tandis qu'il est possible d'avoir des données de rechapage précises directement des entreprises concernées (CRR 2008). Non seulement la masse des pneumatiques analysés varie selon les études, mais la proportion des matériaux également : sur trois études comparées³⁴⁵ par Boustani et al. (2010), les matériaux avec la plus grande variabilité en contribution massique sont la gomme naturelle (15% de variation), le textile (15%) et le noir de carbone (10%). Un même nom générique de matériau peut également recouvrir une certaine diversité : selon une étude réalisée par ERR Limited (Evans et Evans 2006), un pneumatique typique en 2006 manufacturé par Goodyear contenait une variété de 30 gommes synthétiques, 8 gommes naturelles, 8 noirs de carbone, et une quarantaine de produits chimiques, cires, huiles, pigments, silices et argiles. En ce qui concerne la gomme naturelle, plusieurs pratiques, climats (Blagodatsky, Xu, et Cadisch 2016) et arbres (Soratana et al. 2017) existent au sein des exploitations sylvicoles, impliquant une variabilité des impacts de la production de gomme naturelle par exemple sur le changement climatique (Blagodatsky, Xu, et Cadisch 2016).

La Figure 75 présente les compositions en grands types de matières premières de pneumatiques évalués dans la littérature. En bleu, nous avons regroupé les pneumatiques de tourisme (VP), en gris les pneumatiques de VUL (le pneumatique RMA est VUL/PL), et en orange un pneumatique PL. On remarque que la composition en gomme totale est toujours de l'ordre de 40-45%, sauf pour un VUL où elle est plus basse. La part de noir de carbone semble relativement stable dans les pneus VP, autour de 22%, part que l'on retrouve dans la composition du pneumatique PL. Elle peut être plus variable et élevée dans les pneus VUL. La part de silice est très variable et semble se retrouver en quantité non négligeable uniquement dans certains pneus VP. La part d'acier varie assez, surtout pour les VUL. La part en fibre est stable pour les pneus VP, autour de 5%, mais peut être plus importante dans les VUL, jusqu'à 11%. Elle semble absente des pneus PV, qui compenseraient avec une part plus importante en

³⁴⁴ Entretien avec Jean-François Deldon, ingénieur R&D de Michelin, le 3/10/2013

³⁴⁵ Ferer 1997 ; Lutsey et al. 2006 ; RMA 2009 dans (Boustani et al. 2010)

acier. Le reste des matériaux est assez variable, de 5 à 16%, et plus ou moins détaillé dans les sources consultées.

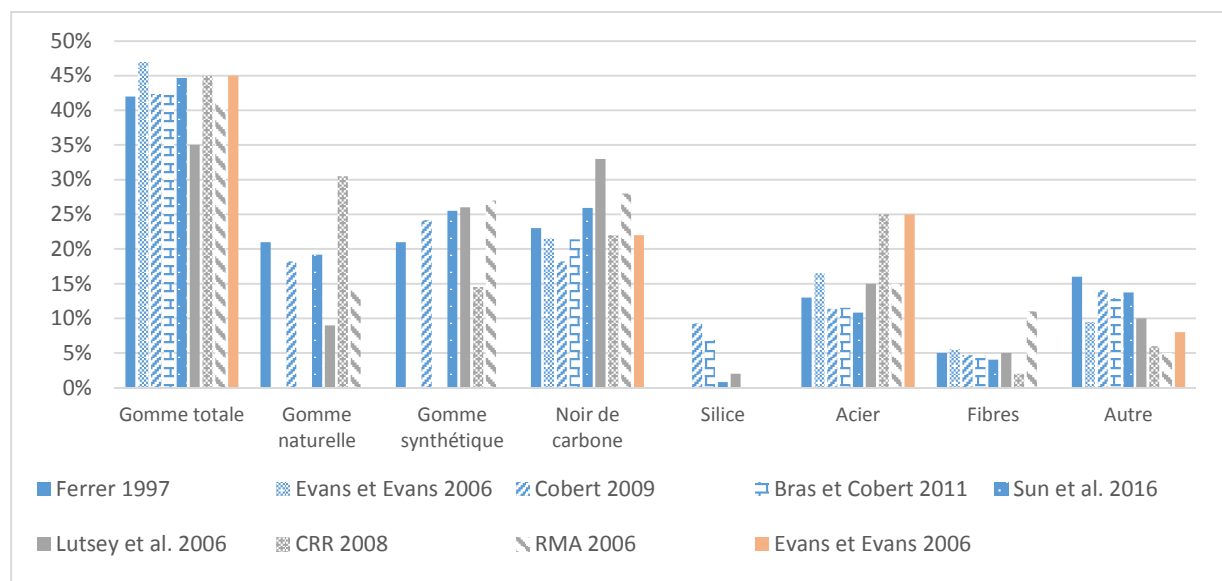


Figure 75 Compositions massiques de quelques pneumatiques (bleu : VP ; gris : VUL ; orange : PL)

Parmi ces autres matériaux, on trouve nécessairement oxyde de zinc, soufre et acide stéarique qui sont nécessaires à la vulcanisation de la gomme. On trouve ces 3 composés détaillés, ou inclus partiellement ou totalement sous des dénominations du type « additifs » (Evans et Evans 2006) ou « plastifiants » (Lutsey et Sperling 2006; RMA 2006). Certains auteurs spécifient une teneur en huiles (Cobert 2009; Bras et Cobert 2011) que l'on pourrait assimiler à des plastifiants. On retrouve enfin parfois spécifiée la part d'accélérateurs (Bras et Cobert 2011). Ce qui se dégage globalement de la composition de cette catégorie « autre » est présentée dans le Tableau 79, en spécifiant le nombre de sources permettant d'avancer l'intervalle de chaque composant.

Tableau 79 Composition de la catégorie « autre » en intervalles de part massique, avec nombre de sources concordant sur 7 études

COMPOSE	OXYDE DE ZINC	SOUFRE	ACIDE STEARIQUE	HUILES	AUTRES ADDITIFS
PART MASSIQUE (%)	1-2	1-1.3	0.3-1	5-10	0-6
NOMBRE DE SOURCES	4	3	3	4	calculé

3.1.3 Synthèse

Les inventaires Ecoinvent sur l'entretien des véhicules sont assez sommaires, et représentatifs des conditions datant d'une quinzaine d'années, sur tout le cycle de vie des véhicules. Or, selon l'INSEE, l'entretien des véhicules a beaucoup évolué ces dernières années. De plus, leur format ne permet pas de remonter à des opérations d'entretien particulières ou à des ICV de pièces d'usures particulières, même si le rapport n°14 d'EcoInvent informe du nombre d'éléments usés au cours de la phase d'usage typique des véhicules. Dans le reste de la littérature, et concernant particulièrement les pneumatiques, des ICV détaillés pour les automobiles existent : leur adéquation au marché français ainsi que leur représentativité technologique et temporelle doivent être vérifiées. En effet, les pneumatiques ont beaucoup évolués en 20 ans³⁴⁶, et peu d'éléments sont disponibles pour les pneumatiques des autres catégories de véhicules que la VP. Il n'existe pas d'ICV de pièces de rechange pour le système de suspension ni d'inventaire permettant de calculer les impacts environnementaux relatifs à l'utilisation des locaux de maintenance pour une opération de maintenance particulière.

³⁴⁶ Remplacement de l'agent renforçant constitué de noir de carbone par des dérivés de silices, et passage d'une majorité de pneus à carcasse diagonale par des pneus radiaux comme dit précédemment

Nous proposons donc de développer nos propres inventaires adaptés à la prise en compte de l'influence de l'état de surface de chaussée sur l'usure lors de la phase d'usage des véhicules en France : locaux de maintenance, pneumatiques des différentes catégories de véhicules, et pièces d'usure des systèmes de suspension sensibles aux sollicitations verticales.

3.2 Développement d'Inventaires français

Nous traitons ici des ICV relatifs aux opérations d'entretien qui dépendent de l'état de surface de la chaussée, soit le changement des éléments du système de suspension et les pneumatiques. Nous construisons les inventaires relatifs au changement de l'ensemble des pièces et de l'utilisation de locaux pour ces opérations d'entretien pour nos 4 catégories de véhicules – VP, VUL, petit PL et gros PL. Il est nécessaire pour construire nos inventaires de connaître le marché, soit de savoir d'où viennent les pièces consommées, puisque les impacts des procédés de production peuvent énormément varier, ne serait-ce que par la composition du mix électrique considéré³⁴⁷. Par exemple, le mix électrique chinois en 2012 est composé à 78% de charbon, 20% d'ENR (majorité : hydroélectricité), 1% de nucléaire et 1% de gaz naturel (EIA 2009). La Corée du sud présente quant à elle une production d'électricité provenant principalement à 30% du nucléaire, 45% du charbon, et 20% du gaz naturel, pour un impact au kWh deux fois plus faible que le kWh chinois en termes de changement climatique (méthode CML, horizon 100 ans) et presque 3 fois plus faible en termes d'acidification (id). Comparé au mix chinois, le mix moyen européen (en haute tension) est respectivement 60% et 70% inférieur en termes d'impacts sur le changement climatique et l'acidification (id).

3.2.1 Locaux de maintenance

3.2.1.1 Possibilités de modélisation

L'impact de l'utilisation des locaux d'entretien pour changer les amortisseurs ou les pneumatiques pourra être modélisé a minima comme dans les ICV d'EcoInvent sur l'entretien général des véhicules routiers par une consommation électrique. Mais il y a également d'autres types de consommations directes, tels que celles en génie civil pour la construction des locaux eux-mêmes, une consommation d'équipements, d'autres consommations énergétiques (e.g. gaz naturel, fioul) (Explicit 2008; Chester 2008). EcoInvent considère implicitement ces impacts, tel que l'amortissement des bâtiments, négligeables. EcoInvent utilise des données suisses anciennes (Maibach, Peter, et Seiler 1999). Pour avoir des données plus récentes et correspondant au contexte de la France, nous voyons trois méthodes possibles.

La méthode « environmental input-output » (W. Leontief 1970; Lave et al. 1995; IFEN 2008; Suh 2009) permettrait de relier le coût de l'opération d'entretien à ses impacts environnementaux par une considération agrégée des impacts du secteur « commerce et réparation de véhicules à moteurs », selon une méthode déjà connue (W. Leontief 1970; Lave et al. 1995; IFEN 2008; Suh 2009; Carnegie Mellon University s. d.). Les bases de données, si elles étaient à l'origine focalisées sur les GES, commencent à être de plus en plus fournies en flux élémentaires. Parmi les 5 BDD principales, dont le site internet environmentalfootprints.org propose une comparaison, la base EXIOBASE contient environ 700 flux élémentaires, 200 secteurs productifs, et est entre autres adaptée au contexte français. Néanmoins, elle agrège l'activité de commerce de véhicules et celle de vente de véhicules, activités loin d'être homogènes.

Deux approches un peu similaires mais plus fines (davantage de données nécessaires) pourraient être envisagées. Pour les deux, on commence par calculer les consommations intermédiaires de ce secteur agrégé, hors consommations de véhicules ou pièces détachées (puisque l'on souhaite uniquement

³⁴⁷ Selon l'EIA (2016), en 2012, la production d'électricité de la planète était générée à 25% par les énergies renouvelables, à 45% pour le charbon, 25% par le gaz naturel, 10% par le nucléaire et très peu par le pétrole. Parmi les ENR, le mix est largement dominé par l'hydroélectricité (80%), suivi par l'éolien (10%).

comptabiliser les impacts dus à l'utilisation des locaux et équipements) par euro facturé. Ceci se fait à partir des matrices de Leontief.

À partir des consommations intermédiaires, on peut ensuite soit prendre les impacts dans Exiobase de chaque secteur correspondant à chaque produit consommé intermédiairement, et faire le calcul d'impacts (calcul des flux d'abord, puis caractérisation de l'impact avec les facteurs d'impacts des méthodes relatives aux indicateurs choisis); soit faire correspondre à chaque consommation intermédiaire un procédé EcoInvent quand il existe. Cette dernière approche nécessite au préalable de connaître la valeur HT de chaque procédé afin de transformer des euros en flux physiques. Cependant, il y a assez peu de consommations intermédiaires qui peuvent se traduire en procédés d'EcoInvent de façon directe.

3.2.1.2 Calcul d'inventaire par extension du modèle de Leontief

Nous développons maintenant cette seconde approche, avec la liste de consommations intermédiaires éligibles à l'approche présentée dans le Tableau 80. Cet inventaire n'est qu'une proposition d'amélioration de l'approche d'EcoInvent : nous avons composé une liste élargie de services nécessaires au fonctionnement de base d'un garage (combustible, électricité, production de déchets) à partir des consommations intermédiaires agrégées des garages et commerces de véhicules. La sélection de ces consommations croise deux critères : une identification d'une consommation intermédiaire qui se partage équitablement sur toutes activités d'un garage et pour lesquelles un procédé EcoInvent existe. Nous avons considéré l'inclusion de la consommation intermédiaire en traitement des déchets. Cependant, la fin de vie relative aux éléments entretenus dans notre modèle – suspensions et pneumatiques – sera considérée par ACV procédés, et les déchets de base de fonctionnement d'un garage (papiers, emballages, etc.) sont supposés faibles. Nous avons donc fixé cette liste aux consommations énergétiques – électricité et chauffage – et à l'eau – eau potable et traitement. On voit dans le Tableau 80 que les consommations intermédiaires sélectionnées ont une contribution très faible à la valeur de la production (en prix de base).

Les coûts associés aux consommations intermédiaires doivent être considérés au prix de base, soit au prix facturé par le producteur, augmenté des subventions sur les produits et diminué des impôts sur ces mêmes produits.

Les prix de base (i.e. prix hors TVA ici) des énergies sont issues de la BDD Pégase³⁴⁸ (Pétrole, Électricité, Gaz et Autres Statistiques de l'Énergie), qui comporte les séries statistiques longues entre 1983 et 2015 relatives aux consommations énergétiques françaises, et notamment les prix et tarifs industriels, hors taxes. Le prix hors taxe de l'électricité en 2013 est sélectionné pour une entreprise, pour la tranche « IB » soit des consommations comprises entre 20 et 500 MWh, selon l'enquête. La tranche IB a été sélectionnée sur la base d'une enquête réalisée par le bureau d'étude Explicit pour le compte de l'ADEME et d'ARENE auprès de 508 commerces et services en Ile-de-France (IdF) afin de connaître leurs consommations (2008). Les statistiques dégagées sur 18 garages (réparation automobile uniquement) annoncent une consommation moyenne de 67 MWh/an, répartie physiquement (en kWh) en 41 % de gaz naturel, 30.5% d'électricité, 17 % de fioul domestique et 11.5% de propane. Le prix du gaz naturel en €₂₀₁₃HT provient de l'enquête d'Eurostat, également indiquée dans la BDD Pégase, pour une entreprise et la tranche I1 (i.e. consommation strictement inférieure à 250 MWh PCI par an) sélectionnée selon les données de l'enquête Explicit à nouveau. Le prix du fioul provient également de la BDD pégase, prix pour une entreprise, en euros hors TVA. Enfin, le prix du propane, à défaut d'être répertorié dans la base ministérielle française, provient du site internet Citerne.info³⁴⁹, dont les prix des autres électricités coïncident bien avec ceux de Pégase.

³⁴⁸ <http://developpement-durable.bsocom.fr/Statistiques/ReportFolders/reportFolders.aspx>

³⁴⁹ <http://citerne.info/faq/prix-propane-gaz-naturel>

Les coûts de consommation en eau potable sont issus de l’Observatoire des services publics d’eau et d’assainissement³⁵⁰. Ces coûts sont donnés pour les particuliers, pour 2013, avec leur structure : prix total, part de la mise à disposition de l’eau potable, part de l’assainissement, taxes et redevances. Les taxes étant de 22.5% en moyenne, et la structure des coûts de 52% attribuée à l’eau potable et 48% à l’assainissement, on en déduit un coût du m3 d’eau potable de 1.57 €₂₀₁₃HT. Nous avons par ailleurs vérifié que les tarifs des professionnels soient les mêmes que ceux des particuliers³⁵¹.

À partir de ces coûts, on peut en déduire des consommations physiques de flux par euro facturé (pièces et main d’œuvre) en multipliant le coefficient technique de consommation intermédiaire par le coût unitaire du flux relatif à cette consommation intermédiaire. Le calcul est direct pour l’électricité et l’eau potable. Toutefois, le produit « combustible » mélange à la fois du gaz naturel, du fioul et du propane selon l’enquête Explicit. Nous connaissons les parts énergétiques consommées par un garage grâce à cette enquête – en 41 % de gaz naturel, 30.5% d’électricité, 17 % de fioul domestique et 11.5% de propane – à partir desquelles, en enlevant l’électricité, on peut en déduire des parts de consommation énergétiques de ces 3 combustibles en kWh. En multipliant chacune de ces parts par le coût unitaire du combustible et en additionnant ces trois produits, on en déduit le coût total HT de consommation de combustible, et l’on peut ensuite recalculer les parts de chacun de ces combustibles en allocation économique. Ces parts permettent, à partir de la consommation intermédiaire globale en combustible de la branche véhiculaire, de calculer le coefficient technique associé à chacun de ces 3 combustibles, respectivement 0.12%, 0.04% et 0.007%. Ces nouveaux coefficients permettent, par multiplication de chacun par le coût unitaire du combustible, de calculer les consommations physiques de chacun des trois combustibles par euros facturé hors taxe.

Enfin, on n’utilise pas le coefficient technique relatif à la consommation d’assainissement, mais on considère que le volume d’eau potable consommé par le garage est le même que celui qui part dans le réseau d’assainissement. Il est vrai que les garages peuvent avoir des règles de dépollution des eaux particulières, qui pourrait nécessiter une modélisation plus complexe. Néanmoins, EcoInvent ne nous permet pas à l’heure actuelle de faire mieux, car il n’existe pas de procédé adapté à cette dépollution.

Tableau 80 Composition du coût d'une opération de réparation de véhicule

FLUX	ÉLECTRICITE	COMBUSTIBLES (0.23%)			EAU POTABLE	ASSAINISSEMENT
		Gaz naturel	Fioul	Propane		
CONSUMMATION INTERMEDIAIRE	0.67%	0.12%	0.04%	0.07%	0.09%	0.16%
COÛT UNITAIRE (PRIX DE BASE)	11.08	6.09	4.98	12	1.57325	N/A
UNITE COÛT		€2013/100kWh			€2013/m3	

À partir du prix de facturation de l’opération de maintenance, nous sommes donc en mesure de proposer un inventaire relatif à l’utilisation des locaux de maintenance pour 1€ HT facturé en faisant un simple produit en croix entre consommation intermédiaire et coût unitaire. On obtient l’inventaire du Tableau 81.

³⁵⁰ <http://www.services.eaufrance.fr/>

³⁵¹ Analyse de factures d’eau du garage lot-et-garonnais « Mr Automobile » de 2016 à défaut d’informations génériques disponibles

Tableau 81 Procédé d'utilisation d'un garage : inventaires de consommation d'un garage par euro hors taxe facturé

FLUX	PROCEDE	QUANTITE	UNITE
INPUT			
ELECTRICITE	<i>market for electricity, low voltage, FR</i>	6.05E-04	kWh
GAZ NATUREL	<i>heat production, central or small scale, natural gas, at boiler condensing modulating <100kW</i>	1.97E-04	kWh
FIOUL	<i>heat production, central or small scale, light fuel oil, at boiler 10kW, non-modulating, Europe without Switzerland</i>	8.39E-05	kWh
PROPANE	<i>heat production, district or industrial, propane, at industrial furnace >100kW, Europe without Switzerland</i>	5.67E-04	kWh
EAU POTABLE	<i>market for tap water, RER without CH</i>	5.72E-06	m3
OUTPUT			
ASSAINISSEMENT D'EAU	<i>market for wastewater, average, GLO³⁵²</i>	5.72E-06	m3

3.2.1.3 Critique de l'approche

Le choix des consommations intermédiaires sélectionnées mène à mettre en regard à la fois le choix du périmètre d'évaluation dans l'inventaire d'entretien des véhicules d'EcoInvent, l'allocation économique en ACV, l'ACV hybride et l'EIO. En effet, le seul flux de consommation sélectionné dans le procédé de maintenance de véhicules d'EcoInvent (en dehors des pièces détachées et des fluides d'entretien) – l'électricité – n'est pas le plus représenté du point de vue des consommations intermédiaires que nous avons calculées. En effet, les produits le plus consommés (CI > 0.01) seraient dans l'ordre d'importance la construction de véhicules automobiles et fabrication de carrosseries et remorques (0.0428), la fabrication d'équipement (0.0326), les activités de sièges sociaux (0.0251), la réparation et l'installation de machines et d'équipements (0.0208), le transport routier de fret (0.0197), les activités administratives (0.0191), la fabrication de machines et équipements d'usage général (0.0188), l'entreposage et services auxiliaires des transports (0.0173), la location et l'exploitation de biens immobiliers (0.0161), l'activités de location (0.0133) et la cokéfaction et raffinage (0.0108). L'électricité n'arrive qu'en 17^{ème} position des produits les plus consommés par la branche, quand les produits chimiques arrivent en 26^{ème} position, les déchets en 32^{ème} position, les combustibles en 42^{ème}, le traitement de l'eau en 50^{ème}, et enfin l'eau en 66^{ème} sur 138 produits. Bien sûr, des incertitudes sont ajoutées du fait de l'agrégation du commerce de réparation d'automobiles et de motos avec le commerce de vente de ces véhicules. C'est particulièrement évident avec la part de consommation intermédiaire majoritaire, relative à la construction de véhicules automobiles et la fabrication de carrosseries et remorques, qui ne concerne clairement que le commerce de véhicules, et non leur entretien. On pourrait ainsi classer certaines consommations pour désagréger les secteurs. Malheureusement, les données disponibles ne permettent pas de la faire entièrement. Ainsi, nous ne sommes pas en mesure de désagréger de manière juste les deux sous-branches. Nous pourrions considérer que, pour capter les impacts environnementaux avec une incertitude réduite, nous pourrions adopter un seuil de coupure économique, tel que le seuil de coupure massique de 5% permis par la norme ISO 14044 (AFNOR 2006b). Cependant, cela sous-entendrait une proportionnalité des impacts environnementaux à la valeur des consommations intermédiaires, ce qui n'a absolument pas de sens lorsque l'on analyse rapidement les données d'Exiobase. Notre proposition d'inventaire étendu peut donc faire sens, dans la mesure où l'amortissement des infrastructures (bâtiments et machines) serait effectivement négligeable et que les consommations de pièces véhiculaires de rechange seront prises en compte selon une ACV procédés réalisées ci-après.

³⁵² Ce flux est à positionner en input avec un signe « - » dans OpenLCA, sans quoi ses impacts ne sont pas pris en compte

3.2.2 Suspensions

Pour développer ces inventaires, nous avons tenté d'obtenir des données fines de la part des principaux acteurs de la production d'amortisseurs : Kyb France, Sachs, TRW Automotive distribution France, ZF, ainsi que la Collective des Amortisseurs et la Fédération des Industries des Équipements pour Véhicules ont tous été contactés. Faute de réponse, nous nous sommes basés sur les maigres données de masses globales de pièces particulières que l'on trouve, encore rarement, dans les catalogues constructeurs en ligne, ainsi que sur des hypothèses de répartition massiques des matériaux. Ces inventaires constituent donc un premier travail qu'il serait bon d'approfondir si la part de l'impact du changement des amortisseurs sur différentes stratégies d'entretien venait à être significatif.

3.2.2.1 Pièces d'usure et entretien

Les pièces d'usure d'une suspension sont généralement les mêmes quel que soit le véhicule, bien que le vocabulaire varie selon les équipementiers : amortisseur d'un essieu, tête d'amortisseur, et butée, associés à chaque roue. Le schéma en Figure 76 montre en bleu la tête d'amortisseur, parfois aussi appelée coupelle, en jaune la butée, et en rouge l'amortisseur (vérin). Sur les trains avant, on trouve d'autres pièces d'usure telles que les silentblochs et les rotules. Faute de données de modélisation nous les négligeons.

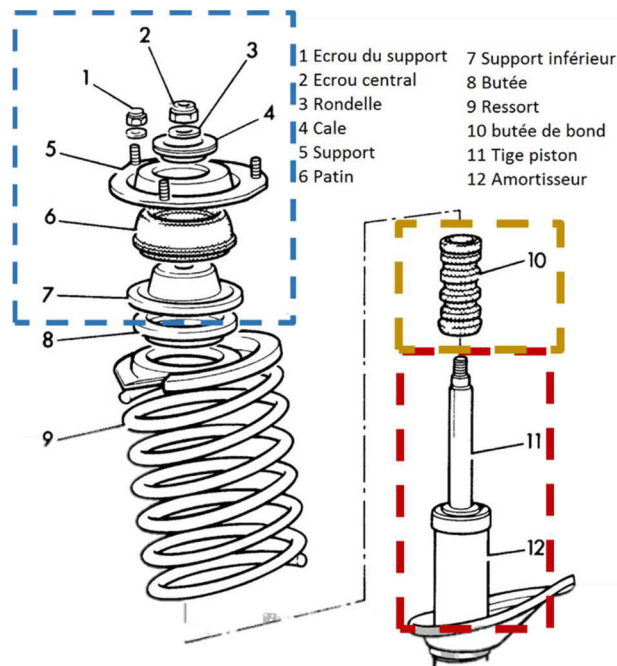


Figure 76 Schéma d'un kit complet d'amortisseur hydraulique et identification des pièces d'usure (bleu : tête d'amortisseur ; jaune : butée ; rouge : vérin)

La longévité kilométrique moyenne des pièces sera prise égale 103 000 km (Capitano 2015). En effet, selon le site professionnel 44tonnes.com, la longévité kilométrique des amortisseurs des PL est la même que celle des VL, de l'ordre de 80 à 150 000 km, selon le type de routes et le conducteur. Il est conseillé de changer les butées et têtes d'amortisseur au même moment que les amortisseurs³⁵³, qui se remplacent par paires.

Notons qu'il existe deux grands types d'amortisseurs : hydraulique (à huile ou à gaz) ou pneumatique. Dans le cas hydraulique, il s'agit d'un vérin fait d'acier et de plastique³⁵⁴, contenant un fluide visqueux

³⁵³ www.44tonnes.com/amortisseurs-camion-36

³⁵⁴ nikkoevolution.fr/voitures_et_pieces/350/Big-Dictator-Amortisseur-avant-AVG.html

tel que de l'huile (ainsi que du gaz (diazote)³⁵⁵ s'il s'agit d'un amortisseur hydraulique à gaz), et éventuellement peint. L'amortisseur pneumatique ne concerne que les PL.

3.2.2.2 Suspension de Voiture particulière

La quasi-totalité des automobiles est équipée d'amortisseurs hydrauliques³⁵⁶. On considèrera arbitrairement une répartition 95/5% en masse entre acier et plastique (polypropylène). Un jeu de deux amortisseurs avant pour une petite VP type Clio pèse dans les 4 kg³⁵⁷. La quantité de fluide lubrifiant dans les pistons est comprise entre 300 et 500 mm³/kg³⁵⁸, soit environ 1200 kg / 2 * 400 mm³ = 2.4 10⁻⁴ m³ de fluide pour une paire d'amortisseurs d'automobile de 1200 kg. La densité du fluide hydraulique a été prise égale à 0.9. Nous négligeons le diazote, gaz inerte.

Les têtes de suspension pèsent dans les 0.2 kg l'une³⁵⁹, et les butées environ 0.1 kg³⁶⁰ pièce. On considèrera en masse une répartition 80/20% entre acier et caoutchouc (patin) pour la tête, et 100% de caoutchouc pour la butée.

L'ICV relatif au remplacement d'un kit d'amortisseurs (avant ou arrière) que nous modélisons ainsi est indiqué dans le Tableau 82.

Tableau 82 Inventaire de production d'un kit d'amortisseurs VP (avant ou arrière)

MATÉRIAUX		VERINS	TÊTES	BUTÉES	
Procédé EcoInvent		Unités	2	2	
Total		kg	4	0.4	0.2
Acier inoxydable	<i>market for steel, low-alloyed, hot rolled, GLO</i>	kg	3.8	0.32	0
	<i>steel production, electric, low-alloyed, GLO</i>	kg	-3.8	-0.32	0
Plastique	<i>polypropylene production, granulate, GLO</i>	kg	0.2	0	0
	<i>thermoforming production, with calendering, GLO</i>	kg	0.2	0	0
	<i>inert waste, for final disposal, GLO</i>	kg	0.2	0	0
Caoutchouc	<i>synthetic rubber production, GLO</i>	kg	0	0.08	0.2
	<i>inert waste, for final disposal, GLO</i>	kg	0	0.08	0.2
Lubrifiant	<i>lubricating oil production, GLO</i>	kg	4E-04	0	0

Le procédé d'acier choisi dans EcoInvent V3.2 correspond au marché européen, et inclut la production du matériau (acier) et sa manufacture (laminage à chaud). Le procédé de production de granulés de polypropylène est dérivé des éco-profilés de l'industrie des plastiques européen (PlasticsEurope), ensuite nous considérons que ces granulés sont thermoformés, i.e. fondus et mis en forme. Ils pourraient également être soufflés par la suite, mais, dans le cas de nos pièces, cette hypothèse est peu probable. La fin de vie des pièces est estimée à dire d'experts³⁶¹, en l'absence de statistiques officielles : mise en décharge du caoutchouc et envoi des pièces métalliques chez un ferrailleur, que nous considérerons comme de la valorisation en acier de seconde fonte.

³⁵⁵ norelem.fr/xs_db/DOKUMENT_DB/www/NORELEM/DataSheet/fr/26/26200_Datasheet_14810_V_rin_gaz--fr.pdf

³⁵⁶ fr.wikipedia.org/wiki/Amortisseur

³⁵⁷ pluspiecesauto.com/pièces/jeu-de-2-amortisseurs-avant-854/vehicules/renault/types/clio-iii-1-5-dci-19052.html

³⁵⁸ <http://eric.cabrol.free.fr/DynamiqueVehicule/amort.html>

³⁵⁹ <http://www.pluspiecesauto.com/equipementiers-auto/kyb-85/pièces/kit-de-butée-de-suspension-1180.html>

³⁶⁰ pluspiecesauto.com/equipementiers-auto/blue-print-10565/pièces/butée-élastique-de-suspension-1182.html

³⁶¹ Echange par e-mail avec le président de la SAS MR Automobile

Les préconisations de recyclage demandent d'effectuer plusieurs trous dans les vérins afin d'évacuer l'huile et le gaz éventuel pour traitement isolé³⁶². Nous pourrions ensuite considérer un traitement adéquat en utilisant le procédé EcolInvent « *disposal, used mineral oil, 10% water, to hazardous waste incineration* ». Néanmoins, cette pratique serait peu répandue à cause du temps qu'elle demande pour des quantités d'huile qui sembleraient jugées négligeables par les garagistes³⁶³. La fin de vie du fluide hydraulique a été négligée faute de procédé adapté. Nous aurions pu considérer des fuites d'huile dans les sols lors du processus de la fin de vie des vérins.

3.2.2.3 Suspension de VUL

Les amortisseurs des VUL sont du même type mais plus imposants à l'avant que ceux des VP. En prenant comme exemple le modèle de camionnette Mercedes Sprinter 2 (2 essieux), nous faisons l'hypothèse qu'un amortisseur arrière pèse environ 2 kg³⁶⁴, quand un amortisseur avant en pèse 6.5³⁶⁵. Nous calculerons les masses totales des têtes et butées par prorata à la masse des amortisseurs respectivement avant et arrières, et les masses d'huile de lubrification sur la base d'un poids total du véhicule de 3.5 t. Les ICV ainsi calculés sont présentés en Tableau 83.

Tableau 83 Inventaire de production d'un kit d'amortisseur VUL

Matériaux	Procédé EcolInvent	Unités	AVANT			ARRIERE		
			VERINS	TÊTES	BUTÉES	VERINS	TÊTES	BUTÉES
Total		kg	2	2	2	2	2	2
			13	1.3	0.65	4	0.4	0.2
Acier inoxydable	<i>market for steel, low-alloyed, hot rolled, GLO</i>	kg	12.35	1.04	0	3.8	0.32	0
	<i>steel production, electric, low-alloyed, GLO</i>	kg	-12.4	-1.04	0	-3.8	-0.32	0
Polypropylène	<i>polypropylene production, granulate, GLO</i>	kg	0.65	0	0	0.2	0	0
	<i>thermoforming production, with calendering, GLO</i>	kg	0.65	0	0	0.2	0	0
	<i>inert waste, for final disposal, GLO</i>	kg	0.65	0	0	0.2	0	0
Caoutchouc	<i>synthetic rubber production, GLO</i>	kg	0	0.26	0.65	0	0.08	0.2
	<i>inert waste, for final disposal, GLO</i>	kg	0	0.26	0.65	0	0.08	0.2
Lubrifiant	<i>lubricating oil production, GLO</i>	kg	0.00126	0	0	0.00126	0	0

3.2.2.4 Suspensions de PL

Il existe 3 types d'amortisseurs PL : les amortisseurs avant, les amortisseurs arrière, et les amortisseurs de cabine. Les amortisseurs avant et arrière sont souvent de type hydraulique – bien qu'à l'arrière on puisse également trouver des amortisseurs à coussin d'air – tandis que les amortisseurs de cabine sont des amortisseurs avec coussin d'air³⁶⁶. Ces derniers pèsent dans les 10 kg³⁶⁷, et sont principalement composés d'acier et de caoutchouc : nous ferons l'hypothèse d'une répartition 50/50. En prenant comme modèle un gros PLF de type FRUEHAUF, un amortisseur sur tracteur pèse 4.5 kg³⁶⁸, tandis qu'un amortisseur de semi-remorque pèse 5.5 kg³⁶⁹. Nous considérerons les mêmes répartitions entre

³⁶² www.norelem.fr/xs_db/DOKUMENT_DB/www/NORELEM/Disposal_of_Gas_Spring_09_2012.pdf

³⁶³ Echanges par e-mail avec un garagiste à l'automne 2017

³⁶⁴ www.toddchrono.com/catalogue/amortisseur-arriere-pour-mercedes-sprinter-2/pXy8

³⁶⁵ www.toddchrono.com/catalogue/amortisseur-avant-pour-mercedes-sprinter-2/pAlw

³⁶⁶ www.toddchrono.com/catalogue/coussin-12-x2-sazana-pour-remorque-fruehauf/pb419

³⁶⁷ www.toddchrono.com/catalogue/coussins-d-air/cWV

³⁶⁸ www.toddchrono.com/catalogue/amortisseur-type-oeiloeil-pour-fruehauf/pqBAR

³⁶⁹ www.toddchrono.com/catalogue/amortisseur-type-oeiloeil-pour-fruehauf-smb-trailor/pwAOK

matériaux et le même ratio pour calculer la quantité de lubrifiant que pour la VP. Nous considérerons que les petits PL pèsent 6t et ont 2 jeux d'amortisseurs hydrauliques : un à l'avant, l'autre à l'arrière. Les gros PL seront quant à eux modélisés comme des PLF 5 essieux de masse totale 44t, avec deux jeux d'amortisseurs avant – une paire hydraulique et une paire de suspensions pneumatiques pour la cabine³⁷⁰ – et 4 jeux d'amortisseurs arrière hydrauliques. Nous calculerons les masses totales des coupelles et butées par prorata à la masse des amortisseurs respectivement avant et arrières. Les ICV ainsi modélisés sont présentés respectivement pour les petits PL et gros PL dans les Tableau 84 et Tableau 85.

Tableau 84 Inventaire de production d'un kit d'amortisseur d'un petit PL

Matériaux	Procédé Ecolvent	Unités	AVANT			ARRIERE		
			Vérin	Tête	Butée	Vérin	Tête	Butée
			2	2	2	2	2	2
Total		kg	9	0.9	0.45	11	1.1	0.55
Acier inoxydable	<i>market for steel, low-alloyed, hot rolled, GLO</i>	kg	8.55	0.72	0	10.45	0.88	0
	<i>steel production, electric, low-alloyed, GLO</i>	kg	-8.55	-0.72	0	-10.5	-0.88	0
Polypropylène	<i>polypropylene production, granulate, GLO</i>	kg	0.45	0	0	0.55	0	0
	<i>thermoforming production, with calendering, GLO</i>	kg	0.45	0	0	0.55	0	0
	<i>inert waste, for final disposal, GLO</i>	kg	0.45	0	0	0.55	0	0
Caoutchouc	<i>synthetic rubber production, GLO</i>	kg	0	0.18	0.45	0	0.22	0.55
	<i>inert waste, for final disposal, GLO</i>	kg	0	0.18	0.45	0	0.22	0.55
Lubrifiant	<i>lubricating oil production, GLO</i>	kg	0.002	0	0	0.002	0	0

Tableau 85 Inventaire de production d'un kit d'amortisseur d'un gros PL

Matériaux	Procédé Ecolvent	Unités	AVANT				ARRIERE		
			Vérin	Tête	Butée	Sus. Pneu.	Vérin	Tête	Butée
			2	2	2	2	8	8	8
Total		kg	9	0.9	0.45	10	44	4.4	2.2
Acier inoxydable	<i>market for steel, low-alloyed, hot rolled, GLO</i>	kg	8.55	0.72	0	5	41.8	3.52	0
	<i>steel production, electric, low-alloyed, GLO</i>	kg	-8.55	-0.72	0	-5	-41.8	-3.52	0
Polypropylène	<i>polypropylene production, granulate, GLO</i>	kg	0.45	0	0	0	2.2	0	0
	<i>thermoforming production, with calendering, GLO</i>	kg	0.45	0	0	0	2.2	0	0
	<i>inert waste, for final disposal, GLO</i>	kg	0.45	0	0	0	2.2	0	2.2
Caoutchouc	<i>synthetic rubber production, GLO</i>	kg	0	0.18	0.45	5	0	0.88	0
	<i>inert waste, for final disposal, GLO</i>	kg	0	0.18	0.45	5	0	0.88	0
Lubrifiant	<i>lubricating oil production, GLO</i>	kg	0.003	0	0	0	0.013	0	0

³⁷⁰ faimg1.forum-auto.com/mesimages/127002/Suspension%20arriere2.JPG

3.2.2.5 Synthèse des inventaires du changement des amortisseurs d'un véhicule entier

Le Tableau 86 synthétise les sous-procédés Ecolinvent et les quantités relatives au changement de l'ensemble des amortisseurs d'un véhicule par catégorie. Nous appelons respectivement ces procédés « Amortisseurs 1 VP », « Amortisseurs 1 VUL », « Amortisseurs 1 Petit PL », et « Amortisseurs 1 gros PL ».

Tableau 86 Synthèse des inventaires du changement des amortisseurs d'un véhicule entier

PROCÉDÉ ECOINVENT	1 VP	1 VUL	1 PETIT PL	1 GROS PL	UNITÉ
<i>inert waste, for final disposal, GLO</i>	9.60E-01	1.01E+00	2.40E+00	1.14E+01	kg
<i>lubricating oil production, RER</i>	8.64E-04	2.52E-03	4.32E-03	1.58E-02	kg
<i>polypropylene production, granulate, GLO</i>	4.00E-01	8.50E-01	1.00E+00	2.65E+00	kg
<i>steel production, electric, low-alloyed, GLO</i>	-	-	-2.06E+01	-5.96E+01	kg
	8.24E+00	1.75E+01			
<i>steel, low-alloyed, hot rolled, GLO</i>	8.24E+00	1.75E+01	2.06E+01	5.96E+01	kg
<i>synthetic rubber production, GLO</i>	5.60E-01	1.19E+00	1.40E+00	6.51E+00	kg
<i>thermoforming production, with calendering, GLO</i>	4.00E-01	8.50E-01	1.00E+00	2.65E+00	kg

3.2.3 Pneumatiques

Nous allons maintenant développer un modèle d'ICV pour chacune des 4 catégories de pneumatiques utilisées sur nos flottes de véhicules : VP, VUL, petit PL et gros PL. Pour cela nous reprenons certaines données et hypothèses de masses indiquées précédemment.

3.2.3.1 Hypothèses générales

Modéliser un pneumatique moyen nécessiterait donc d'avoir des statistiques sur les ventes de chaque catégorie de pneumatiques, leur composition, puis de composer un « parc moyen » de pneumatiques. Malheureusement nous n'avons pas assez de ressources pour réaliser une telle étude et nous contenterons de modéliser un pneumatique par type de véhicules, en espérant qu'il soit suffisamment représentatif.

A/ Marché français des pneumatiques

On choisira, pour notre inventaire de consommation d'électricité dans les usines de production du pneumatique moyen consommé en France, les ratios présentés dans le Tableau 87.

Tableau 87 Mix électrique considéré dans l'inventaire de production du pneumatique français

PAYS PRODUCTEUR	FRANCE	ALLEMAGNE	ESPAGNE	ROYAUME-UNI	POLOGNE	ITALIE	CHINE
PART MARCHÉ FRANÇAIS (%)	32.5	17.3	16.3	11.1	9.99	7.22	5.50

B/ Masses et compositions

Sur la base de notre revue de littérature, nous ferons les hypothèses de masses pneumatiques typiques indiquées dans le Tableau 88. On trouve en France des pneumatiques de tourisme allant de 14 à 18 pouces³⁷¹. En dehors de statistiques sur les ventes de pneumatiques, on peut faire l'hypothèse d'un pneu moyen de 16 pouces. Selon les études passées, la taille semblant assez peu influencer la masse du pneu, qui vaut environ 10 kg pour un pneu 16 ou 17 pouces de largeur 205 mm selon des études ACV passées (Cobert 2009; Sun et al. 2016). La masse du pneu VP que l'on choisit dans ce travail correspond à un pneu de 16 pouces et de largeur 205 mm (Sun et al. 2016). La masse du pneu VUL est choisie selon l'hypothèse de l'étude du Center for Remanufacturing and Reuse (CRR 2008), et entre bien dans la catégorie de masse des pneus de VUL d'Aliapur présentée précédemment. La masse des

³⁷¹ pneusenligne.net/tailles.htm

pneumatiques de PL est choisie selon la masse moyenne de la catégorie Aliapur (56.11 kg) et l'intervalle de masse de la catégorie relative aux PL : on décide arbitrairement qu'un pneu de petit PL pèse 40 kg et celui d'un gros 70 kg. Si l'on fait l'hypothèse d'une répartition de la flotte PL en France à 50% en gros PL (5 essieux et 10 pneus) et 50% en petits PL (2 essieux et 4 pneus), on calcule une masse moyenne des pneumatiques de 61 kg, ce qui est un peu plus élevé que la moyenne d'Aliapur. Sachant que dans cette catégorie Aliapur se trouvent également des pneumatiques VUL, nous considérons que cette hypothèse est plausible.

Tableau 88 Hypothèses de masses pneumatiques par grande typologie de véhicules

Catégorie de véhicule	VP	VUL	Petit PL	Gros PL
Masse pneu moyen (kg)	9.50	26.5	40.0	70.0

La composition des pneumatiques est, comme on l'a déjà dit, à la fois très complexe et variable, entre les catégories de véhicules sur lesquels ils sont montés mais aussi au sein d'une même catégorie, et le secret industriel implique une difficulté supplémentaire dans la collecte des données nécessaires à la réalisation d'une ACV.

Pour réaliser nos inventaires de production, nous avons repris les parts en matériaux rapportées dans les études présentées précédemment, et réalisé une moyenne pour un pneu VP (Ferrer 1997; Evans et Evans 2006; Cobert 2009; Bras et Cobert 2011; Sun et al. 2016), un pneu VUL (Lutsey et Sperling 2006; CRR 2008; RMA 2006) ainsi qu'un pneu PL toute taille (RMA 2006; Evans et Evans 2006). De cette manière, nous avons une représentation plus variée de formules de pneumatiques, et en particulier concernant les parts en noir de carbone et silice qui peuvent varier très fortement pour les VP selon les experts pneumatiques³⁷², malgré la part relativement stable en noir de carbone observée dans les études référencées sur la Figure 75. Nous obtenons les compositions rapportées dans le Tableau 89. Nous constatons néanmoins que la supériorité de part massique en gomme naturelle par rapport à la part de gomme synthétique pour les pneus PL n'est absolument pas vérifiée. Nous décidons donc de retenir une composition massique provenant de l'expertise d'un manufacturier international important³⁷³ (colonne 5 du Tableau 89). La catégorie « autres additifs » inclut 2.7% de produits chimiques non spécifiés, auxquels s'ajoutent 0.4% de silane, 0.2% de résine et 0.2% de sel de cobalt.

Tableau 89 Hypothèse de composition massique de nos pneumatiques par catégorie

TYPE DE PNEU	VP	VUL	PETIT ET GROS PL (THEORIE)	PETIT ET GROS PL (EXPERT)
GOMME NATURELLE	19%	18%	14%	38%
GOMME SYNTHETIQUE	24%	23%	27%	10%
NOIR DE CARBONE	22%	28%	25%	21%
SILICE	3%	1%	0%	2%
ACIER	13%	18%	20%	23%
FIBRES	5%	6%	6%	0%
OXYDE DE ZINC	2%	2%	2%	2%
SOUFRE	1%	1%	1%	2%
ACIDE STEARIQUE	1%	1%	1%	0%
HUILES	7%	0%	0%	0%
AUTRES ADDITIFS	6%	4%	5%	3.5%

³⁷² Ces deux dernières substances sont utilisées comme charges renforçantes (mécaniques). Selon un échange par e-mail du 12 janvier 2018 avec Romain Muggeo, spécialiste ACV chez Michelin, on pourrait considérer 20% de noir de carbone et 10% de silice dans un pneu VP type. Un fort taux de silice correspond à un pneu technologiquement plus avancé qu'un pneu avec une forte part de noir de carbone.

³⁷³ Echange par e-mail du 12 janvier 2018 avec Romain Muggeo, spécialiste ACV chez Michelin France (R&D)

C/ Gomme naturelle : inventaire de production

Ces dernières années, plusieurs inventaires de production de gomme naturelle ont été réalisés et publiés dans la littérature académique (Cobert 2009; Rasutis 2014; Soratana et al. 2017). Une présentation donnée lors de la conférence internationale de la gomme en 2012 est également un point de comparaison sur certaines hypothèses chiffrées (Mohd Nor 2012). Cependant, la base d'EcoInvent ne contient pas d'ICV de gomme naturelle, malgré sa part importante dans la composition des pneumatiques routiers. Les chiffres avancés dans les publications ne coïncident pas toujours. Nous présentons sur la Figure 77 les flux entrants et sortants communs à plusieurs publications relatifs à la production d'1kg de gomme naturelle dans un but de comparaison. Si certains chiffres semblent cohérents, comme la consommation d'énergie ou d'espace, d'autres sont assez différents, comme la consommation d'eau ou la consommation d'ammoniac. Les flux considérés dans une seule étude ne sont pas présentés sur ce graphe. Notons en particulier la prise en compte de consommations en pesticides (RoundUp®, Ridomil®, validamycine) uniquement par Cobert (2009) (supprimée du graphique pour plus de lisibilité) ou celles en fertilisants (N, P) de Rasutis (2014) (id), tandis que les autres études n'en rapportent aucune.

Le travail de Rasutis s'appuie principalement sur des données relatives à la culture du latex en Thaïlande et sa transformation en gomme issue de l'étude de Jawjit et al. (2010). Il se base sur un rendement moyen entre 1967 et 2007, soit 1600 kg de latex par hectare et par an. Toutefois, les rendements sur cette période sont passés de 300 à 3000 kg/ha.an. Nous estimons plus adapté dans notre étude de nous intéresser à la réalité de la production de gomme naturelle actuelle. La Figure 77 reprend donc ces chiffres en considérant un rendement de 3 t/ha.an de latex, et un rendement latex/gomme de 2:1, hypothèse commune à Rasutis (2014) et Mohd Nor (2012). Les hypothèses de transport sont également assez variées selon les sources.

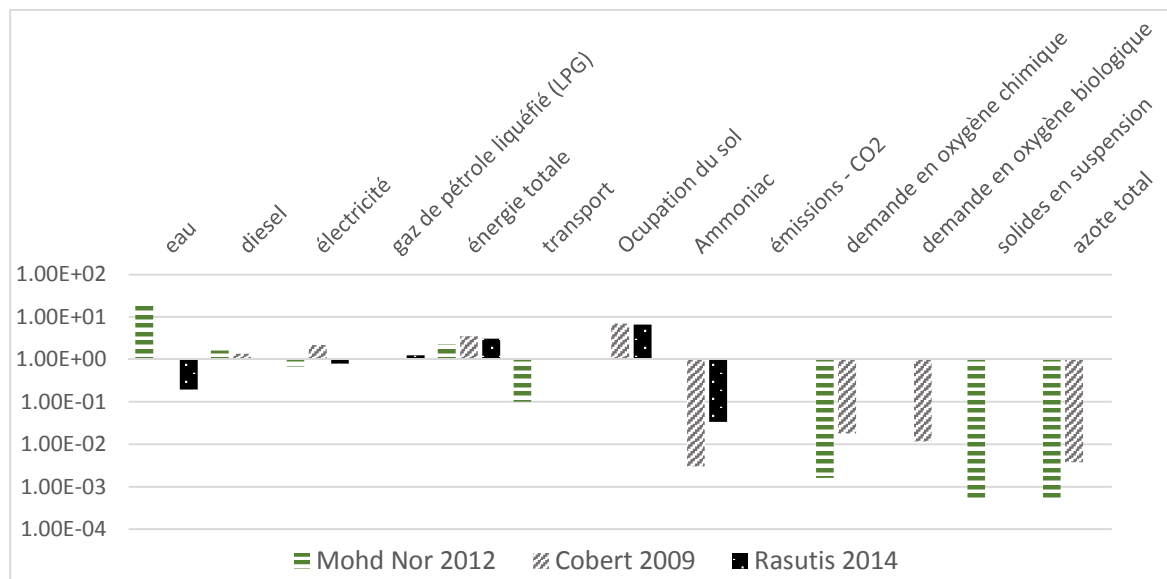


Figure 77 Flux entrants et sortants principaux pour la production d'1kg de gomme naturelle en échelle logarithmique – comparaison de 3 études

95% de la production mondiale de gomme naturelle provient d'Asie. Parmi les pays producteurs majoritaires, la Thaïlande arrive en tête, avec 30% de la production, contre 27% pour l'Indonésie et environ 10% pour la Malaisie et pour l'Inde³⁷⁴. Les données de Jawit et al. (2010) paraissent donc particulièrement pertinentes, autant pour leur adéquation temporelle (étude de moins de 10 ans) que pour leur pertinence géographique (Thaïlande pays producteur principal). Nous proposons donc de retenir l'ICV développé par Rasutis (2014) (voir tableau en annexe A, p115) en adaptant la production

³⁷⁴ <https://www.planetoscope.com/entreprises/1325-production-mondiale-de-caoutchouc.html>

aux dernières données disponibles, le choix d'un rendement moyen sur 40 ans étant une hypothèse permettant de valoriser du point de vue environnemental la gomme alternative produite aux USA et évaluée comparativement dans ce rapport. Du point de vue du calcul, cela revient à considérer les flux rapportés par Rasutis à ceux pour une production 50% supérieure sans changement des quantités d'entrants (amélioration des pratiques culturales). Nous obtenons ainsi les inventaires de production de gomme présentés dans le Tableau 90. L'énergie totale consommée pour la culture du latex et la production de gomme naturelle est d'environ 3 MJ/kg de produit fini (en dehors du transport). Le procédé de consommation d'eau pour l'irrigation est pris à 100% en contexte malaysien, car il est frontalier et de climat proche de la Thaïlande, ce qui est donc représentatif à presque 2/3 de la situation réelle. L'électricité consommée est choisie sur le mix malaysien à moyenne tension, les petites industries étant souvent alimentées sous cette catégorie de voltage. Pour le transport du champ à la sortie d'usine, nous reprenons les hypothèses de Rasutis : 60 km en camion pour le latex de la plantation à l'usine de gomme, puis 250 miles en camion de l'usine au port, enfin 435 miles en camion jusqu'à l'usine pneumatique, soit environ 1200 km en camions. L'outil « seadistance.org » nous permet d'estimer à 17000 km le transport maritime de la gomme du port de Johor en Malaisie au port d'Hambourg en Allemagne. Nous choisissons d'ajouter la prise en compte des phénomènes de lessivages et de ruissellement de fertilisants dans les eaux relevés par Cobert (2009) sur la base d'une étude de Pré Consultants, en termes d'émissions d'azote, de demande d'oxygène chimique et de demande d'oxygène biologique dans l'eau par kilogramme de gomme produite. Notons que l'ajout de ces flux n'implique aucun changement d'impact sauf sur certains indicateurs d'eutrophisation (sur l'eutrophisation d'eau douce calculée avec IMPACT World+ et sur l'eutrophisation générique calculée avec CML 2001 (+23%, en kg PO4-Eq) par exemple).

Tableau 90 Inventaire de production d'1kg de gomme naturelle

FLUX	PROCEDE ECOINVENT	UNITE	QUANTITE
CONSOMMATIONS			
EAU	<i>irrigation, MY</i>	m3	1.93E-04
DIESEL	<i>diesel, burned in building machine, GLO</i>	MJ	1.02E+00
OCCUPATION DU SOL	<i>occupation, forest, intensive, normal</i>	m ² a	6.67E+00
AMMONIAC	<i>market for ammonia, liquid, RoW</i>	kg	3.40E-02
FERTILISANT N	<i>Nitrogen fertilizer, as N, RoW</i>	kg	4.67E-02
FERTILISANT P	<i>Phosphate fertiliser, as P2O5, RoW</i>	kg	2.33E-02
ELECTRICITE	<i>market group for electricity, medium voltage, MY</i>	MJ	7.92E-01
GAZ DE PETROLE LIQUEFIE (LPG)	<i>propane, burned in building machine, GLO</i>	MJ	1.25E+00
TRANSPORT EN CAMION	<i>market for transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO4, GLO</i>	t.km	1.20E+00
TRANSPORT MARITIME	<i>transport, freight, sea, transoceanic ship, GLO</i>	t.km	1.70E+01
EMISSIONS			
AZOTE	<i>elementary flows/water/unspecified/nitrogen</i>	g	3.80E+00
DEMANDE D'OXYGENE CHIMIQUE	<i>elementary flows/water/unspecified/COD</i>	g	1.79E+01
DEMANDE D'OXYGENE BIOLOGIQUE	<i>elementary flows/water/unspecified/ BOD5</i>	g	1.17E+01

Notons le choix du procédé « *propane, burned in building machine, GLO* » comme GLP utilisé lors du processus de préparation de la gomme : le climat des zones de production de latex étant assez chaud, le type de GPL utilisé serait plus probablement du butane (température de vaporisation Tv autour de 0°C) que du propane (Tv=-44°C). Toutefois, cela ne devrait rien changer en termes d'impact environnemental, et nous choisissons le procédé relatif au propane en l'absence de procédé équivalent pour le butane dans Ecolnvent.

3.2.3.2 Inventaire de production de pneumatiques types

On utilise les bilans massiques calculés précédemment pour chaque type de pneumatique pour quantifier les matières premières nécessaires à la production des pneus. Afin de spécifier le type de matières textiles, nous reprenons les données de Sun et al. (2016) : ils considèrent à peu près une répartition à 80% de polyester et 20% de nylon. Concernant les fibres polyester, elles sont généralement composées de cellulose, de polyester de type polybutylène téréphtalate (PBT), de polyester de type polyéthylène téréphtalate (PET) et de polyamide 6-6 (PA 6-6) selon Aliapur. Nous utiliserons donc le procédé Ecolnvent « *fleece, polyethylene, GLO* ». Le choix de certains procédés Ecolnvent peut être discutable, comme celui de « *fatty acid, GLO* » pour l'acide stéarique, ou encore « *paraffin production, GLO* » pour l'huile. Néanmoins, nous avons effectué ces choix avec le souci d'être le plus proche possible de la réalité chimique du procédé de production de pneumatique.

Pour la manufacture, en termes de consommation d'eau, d'émissions dans l'air, dans l'eau et de production de déchets, nous reprenons les données de Sun et al. (2016) pour le pneu VP du fait des données provenant directement d'une usine, les usines chinoises étant aussi performantes que les usines européennes³⁷⁵. Pour la consommation d'énergie, nous reprenons le mix annoncé par Michelin (40% gaz naturel, 40% électricité et 20% vapeur) ainsi qu'une consommation d'énergie totale de 80 MJ/10kg de pneus des estimations d'expert (proches de la quantité d'énergie dans Sun et al., vapeur et électricité confondues). Nous choisissons d'appliquer un ratio massique à ces quantités pour obtenir les inventaires relatifs aux autres types de pneumatiques, en considérant que les consommations, émissions et déchets sont proportionnels à la masse du pneumatique, et que le pouvoir calorifique de la vapeur est de 697 kWh/t. Nous créons donc deux procédés : le procédé « *consommations de manufacture pneumatique* » (Tableau 91) qui comptabilise les consommations d'eau et d'énergie relatives à la manufacture d'un kilogramme de pneumatique en usine de production, et un procédé « *Emissions de manufacture pneumatique* » (Tableau 92) relatif aux émissions dans l'air et dans l'eau dues à la manufacture d'un kilogramme de pneumatique en usine.

Tableau 91 Consommations d'eau et d'énergie relatives à la manufacture d'un kg de pneumatique, en usine de pneumatiques

Type de consommation	Procédé	Unité	Quantité
Electricité en France	<i>market for electricity, high voltage, FR</i>	MJ	1.09E+00
Electricité en Allemagne	<i>market for electricity, high voltage, DE</i>	MJ	5.83E-01
Electricité en Espagne	<i>market for electricity, high voltage, ES</i>	MJ	5.49E-01
Electricité en Grande Bretagne	<i>market for electricity, high voltage, GB</i>	MJ	3.74E-01
Electricité en Pologne	<i>market for electricity, high voltage, PL</i>	MJ	3.37E-01
Electricité en Italie	<i>market for electricity, high voltage, IT</i>	MJ	2.43E-01
Electricité en Chine	<i>market for electricity, high voltage, CH</i>	MJ	1.85E-01
Eau	<i>tap water, Europe without Switzerland</i>	kg	2.48E+00
Vapeur	<i>steam, in chemical industry, GLO</i>	kg	6.71E-01
Gaz naturel	<i>heat production, district or industrial, natural gas, at industrial furnace low-NOx >100kW, GLO</i>	MJ	3.37E+00

Dans l'inventaire de production de chaque type de pneumatique, ces procédés sont à ajouter, au prorata de la masse du pneumatique modélisé, aux procédés de matières premières. On calcule également, en se basant des chiffres de l'étude de Sun et al. (2016), les productions de déchets solides au kilogramme de pneumatique lors de la manufacture, que l'on réutilise ensuite pour chaque type de pneumatique selon sa masse : on calcule une somme de 1.20^{E-01} kg de déchets solides divers pour un pneumatique de 9.50 kg, soit 1.26^{E-02} kg de déchets par kilogramme de pneumatique manufacturé. Pour prendre en compte le traitement de ces déchets dans notre évaluation environnementale, nous choisissons le procédé « *market for municipal solid waste, GLO* » qui correspond au « traitement

³⁷⁵ Echange par e-mail en février 2017 avec Romain Muggéo, spécialiste ACV chez Michelin

moyen » par incinération réalisé sur les déchets municipaux dans le monde. D'autre part, les usines de pneumatiques sont de grandes installations alimentées en courant haute tension.

Tableau 92 Émissions dans l'air et l'eau relatives à la manufacture d'un kg de pneumatique, en usine de pneumatiques

Catégorie d'émissions	Type de flux	Flux EcoInvent	Unité	Total
Dans l'air	Particules fines	Particulates, < 10 um, low population density	g	2.56E+01
	COV	VOC, volatile organic compounds, low population density	g	5.26E-04
Dans l'eau	Demande d'oxygène chimique	COD, Chemical Oxygen Demand, water, unspecified	g	1.82E-01
	NH4+-N	Ammonium nitrate, water, unspecified	g	2.00E-02
	Particules en suspension	Suspended solids, water, unspecified,	g	7.26E-02

On obtient alors les inventaires de productions indiqués dans le Tableau 93.

Tableau 93 Inventaire de production de pneumatiques par catégorie, tels que définis dans le rapport (masses, compositions), à l'usine

Étape	Flux	Procédé	Unité	« pneu X »			
				VP	VUL	Petit PL	Gros PL
Matériau	Gomme naturelle	Gomme naturelle	kg	1.85E+00	4.73E+00	1.50E+01	2.63E+01
	Gomme synthétique	synthetic rubber, GLO	kg	2.24E+00	5.96E+00	4.00E+00	7.00E+00
	Noir de carbone	carbon black production, GLO	kg	2.09E+00	7.33E+00	8.40E+00	1.47E+01
	Silice	sodium silicate production, spray powder, 80%, GLO	kg	3.22E-01	1.77E-01	8.00E-01	1.40E+00
	Fils d'acier	steel, low-alloyed	kg	1.20E+00	4.86E+00	9.00E+00	1.58E+01
		wire drawing, steel, GLO	kg	1.20E+00	4.86E+00	9.00E+00	1.58E+01
	Nylon 6-6	nylon 6-6, GLO	kg	9.10E-02	3.18E-01	0.00E+00	0.00E+00
	Fibre polyester	fleece, polyethylene, GLO	kg	3.64E-01	1.27E+00	0.00E+00	0.00E+00
	Oxyde de zinc	zinc oxide, GLO	kg	1.43E-01	3.98E-01	8.00E-01	0.00E+00
	Soufre	Market for sulfur, GLO	kg	1.09E-01	3.05E-01	6.00E-01	1.05E+00
	Acide stearique	fatty acid, GLO	kg	6.65E-02	1.86E-01	0.00E+00	0.00E+00
	Huile (plastifiant)	paraffin production, GLO	kg	6.65E-01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
	Autres	chemical organic GLO	kg	5.70E-01	1.06E+00	1.16E+00	2.03E+00
	Silane	silicone product production, GLO	kg	0	0	1.60E-01	2.80E-01
Résine	polyester resin, unsaturated, GLO	kg	0	0	8.00E-02	1.40E-01	
Manufacture	Consommation	Consommations de manufacture pneumatique	Unité	9.50E+00	2.65E+01	4.00E+01	7.00E+01
	Émissions	Emissions de manufacture pneumatique	Unité	9.50E+00	2.65E+01	4.00E+01	7.00E+01
Déchets solides totaux	Déchets divers	market for municipal solid waste, RoW	kg	1.20E-01	3.34E-01	5.04E-01	8.82E-01

Le choix du procédé EcoInvent pour modéliser la silice n'a rien d'évident. La silice utilisée dans les pneumatiques est en fait du silicate de sodium, obtenu après de nombreuses réactions chimiques réalisées sur du sable, à l'aide entre autres de carbonate de sodium et d'acide sulfurique³⁷⁶. Plusieurs procédés existent sur EcoInvent, dont nous avons comparé les impacts (cf. Annexe 66). Notre choix s'est arrêté sur le procédé « sodium silicate production, spray powder, 80% », un silicate de sodium solide directement utilisable dans les gommages pneumatiques. Ses impacts sont globalement

³⁷⁶ usinenouvelle.com/expo/silice-precipitee-p50012.html

supérieurs aux autres procédés testés, à l'exception du procédé de production de cryolite, cryolite qu'il est peu probable de retrouver dans la production de pneumatiques.

3.2.3.3 Inventaires de fin de vie

A/ Deux filières de valorisation

Selon Aliapur, organisme collectif qui collecte et valorise plus de 75 % du gisement actuel de pneus usagés en France soit environ 300 000 tonnes par an, les pneumatiques français en fin de vie sont à 18% réutilisés par réemploi (rechapage, occasion), à 38% valorisés énergétiquement (principalement en cimenteries ou pour le chauffage urbain), et à 44% valorisés pour leur matière (diverses filières)³⁷⁷. Sachant que les pneus réutilisés sont principalement les pneus PL, on considérera dans notre modèle qu'un pneumatique, une fois sa longévité kilométrique atteinte, sera valorisé en filière énergétique à 54% et en matière à 46%. Selon Aliapur, 170 Mt de pneus sont brûlés chaque année en cimenteries. L'utilisation en centrale de chauffage urbain reste plus rare. On considérera que les pneus valorisés énergétiquement sont à 100% destinés aux cimenteries en France. Nous considérons que les pneumatiques, en vue de leur recyclage, sont transportés par camions 16-32t Euro 4 sur 125 km, selon les données utilisées par l'ATILH dans leur modèle environnemental des ciments (les cimenteries utilisent la majeure partie des pneumatiques valorisés sous forme d'énergie) (ATILH 2017).

Pour les PL en revanche, les pneumatiques sont souvent rechapés ou recreusés : 40% des pneus PL étaient vendus rechapés en France en 2015 (E&Y 2016). Néanmoins, avec l'essor de l'importation de pneus d'Asie, cette pratique est à la baisse (-8% de parts de marché entre 2010 et 2014) (E&Y 2016). En première approche nous ne modéliserons pas ces pratiques, et prendrons les mêmes hypothèses de fin de vie pour tous les types de pneus.

B/ Inventaire de valorisation matière

Les 44% de pneumatiques valorisés pour leur matière sont utilisés dans des objets très divers : sols d'aire de jeux, bétons, carrières, éclisses de tramway, écrans acoustiques, enrobés routiers, gazons synthétiques, murs de soutènement, objets moulés, pièces automobiles, pistes d'athlétisme, bassins de rétention, roues de chariots de manutention, sols équestres. Ces utilisations permettent d'économiser des matières premières (béton, plastiques) mais aussi parfois d'améliorer la qualité d'objets, qu'elle soit mécanique pour les bétons qui absorbent mieux les vibrations, ou encore sécuritaire pour les sols d'aires de jeux pour enfants qui permettent d'amortir les chutes.

Nous n'avons pas de chiffre sur ces valorisations respectives. Nous considérerons seulement une production de gomme recyclée et d'acier en France. Nous utilisons les inventaires de fin vie de pneumatique VP de Sun et al. (2016). Ils tiennent compte des transformations nécessaires à l'obtention de la matière – consommation d'électricité, d'eau, et de diesel, et émissions dans l'air – et de pertes de matières. Nous extrapolons ces chiffres au procédé de valorisation matière de toutes les catégories de pneumatiques, bien que cela ne soit pas exact puisque la constitution de ces pneumatiques n'est à l'origine pas la même, avec notamment davantage d'acier pour les pneus PL. Les ICV ainsi développés sont présentés dans le Tableau 94.

³⁷⁷ <https://www.aliapur.fr/fr/les-applications/qu-est-ce-que-la-valorisation>

Tableau 94 Inventaire relatif à la fin de vie en valorisation matière d'un kilogramme de pneumatiques toute catégorie en France

	Flux	Procédé EcolInvent	Quantité	Unité
Input	Électricité	<i>market for electricity, high voltage, FR</i>	770.5	Wh
	Eau	<i>tap water, Europe without Switzerland</i>	7.1	kg
	Diesel	<i>diesel production, low-sulfur, RER without CH</i>	0.01	kg
	Transport	<i>market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4, RER</i>	0.125	t.km
Output	Gomme recyclée (<i>impact évité</i>)	<i>synthetic rubber, GLO</i>	0.67	kg
	Acier (<i>impact évité</i>)	<i>steel production, electric, low-alloyed, GLO</i>	0.07	kg
	SO ₂	<i>Sulfur dioxide, air, unspecified</i>	0.72	g
	NO _x	<i>Nitrogen oxides, unspecified</i>	0.38	g
	H ₂ S	<i>hydrogen sulfide, air, unspecified</i>	0.18	g
	Poussières	<i>Particulates, unspecified</i>	0.19	g
	COVNM	<i>NM VOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin</i>	0.76	g

On néglige la production de fibres recyclées ainsi que l'émission de fumées dont font état Sun et al. (2016) et que nous ne savons pas comment modéliser avec EcolInvent. Le choix du procédé de gomme synthétique pour modéliser la gomme recyclée générée est critiquable, puisque cette gomme « de seconde main » ne sera pas utilisée à niveau de performance égal aux gommes synthétiques. On aurait pu considérer que cette gomme économisait une production de béton, d'enrobé ou encore de plastiques selon les éléments qualitatifs d'Aliapur déjà présentés.

C/ Inventaire de valorisation énergétique

L'industrie du ciment est responsable d'une consommation énergétique importante. Pour des raisons financières et environnementales (Gandar-Gervais 2008), depuis les années 1990 (Bertolini 2008), elle a de plus en plus recouru à des combustibles alternatifs aux énergies fossiles conventionnelles dans les fours à clinker. Bien que les technologies de ces fours et donc leurs consommations soient variables, on peut considérer à l'exception des combustibles alternatifs ou minoritaires les chiffres des statistiques de l'industrie cimentière en 2016 (Infociments 2016) : 78 % de coke de pétrole, 18% de charbon et 4% de gaz. Deux façons de modéliser l'incinération des pneus en lieu et place des combustibles traditionnels : considérer que les pneumatiques viennent remplacer la consommation de ces ressources, ou bien considérer le procédé complet de combustion de ces ressources (incluant extractions et transports amont). La première hypothèse sous-tend la stabilité des émissions entre combustions de pneumatiques et des ressources fossiles considérées, l'autre hypothèse considère zéro émission lors de la combustion des pneus. À défaut de données sur les émissions de combustion de pneumatiques, on considèrera l'hypothèse conservatrice de stabilité des émissions, et l'on optera pour la première possibilité. Pour la gomme naturelle, les émissions de CO₂ de sa combustion sont en réalité plus ou moins compensées par la consommation de CO₂ de l'Hévéa pour produire le latex : notre modèle tend à minimiser les bénéfices de l'incinération des pneumatiques.

Bertolini (2008) donne le pouvoir calorifique du coke de pétrole comme valant 33 000 MJ/t. Le charbon a le même PCI que le coke de pétrole³⁷⁸. Le PCI du gaz naturel sera considéré comme égal à 39 MJ/m³³⁷⁹. Selon Sibieude et Sibieude (1993), les pneumatiques PL et VL n'auraient pas le même contenu calorifique. Selon Aliapur, un pneu VL présente un pouvoir calorifique de 30.2 MJ/kg (dont 20.3% en biomasse), tandis qu'un pneu PL apporte 26.7 MJ/kg (dont 29.7% en biomasse) (Aliapur R&D 2009). Pour 1 MJ apporté par un combustible alternatif, on évite la consommation de 0.78 MJ

³⁷⁸ jpcmansson.wordpress.com/2012/06/01/thermochimie-le-pouvoir-calorifique-inferieur-des-combustibles/

³⁷⁹ <http://www.world-nuclear.org/information-library/facts-and-figures/heat-values-of-various-fuels.aspx>

provenant de coke de pétrole, 0.18 MJ obtenues à partir de charbon et 0.04 MJ obtenues à partir de gaz naturel.

De plus, les fours à clinker, chauffés à 2000°C, détruiraient les déchets sans en engendrer de nouveaux car les molécules organiques seraient complètement détruites, tandis que métaux lourds, soufre et chlore seraient piégés dans la matière du clinker. Selon l'ATILH³⁸⁰, les résidus matières, environ 20 à 25% en masse des pneus brûlés (on considèrera 250g de production de cendres pour clinker par kilogramme de pneu incinéré), sont valorisés en tant que matières (cendres) directement dans la production du clinker (fractions principalement de SiO₂ et Fe₂O₃).

On obtient donc les inventaires du Tableau 95.

Tableau 95 Inventaire relatif à la fin de vie en valorisation énergétique d'un kilogramme de pneumatiques VL et PL en France

Nom du procédé		<i>"Fin de vie, valorisation énergétique, pneumatique VL"</i>		
	Ressource	Procédé EcolInvent	Quantité	Unité
INPUT	Transport	<i>market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4, RER</i>	1.25E-01	t.km
OUTPUT	coke de pétrole (<i>impact évité</i>)	<i>petroleum coke, GLO</i>	7.14E-01	kg
	charbon (<i>impact évité</i>)	<i>hard coal mine operation, RoW</i>	1.65E-01	kg
	gaz naturel (<i>impact évité</i>)	<i>natural gas, high pressure, RU</i>	3.10E-02	m3
	cendres pour clinker (<i>impact évité</i>)	<i>hard coal ash - RER without CH</i>	0.25	kg

Nom du procédé		<i>"Fin de vie, valorisation énergétique, pneumatique PL"</i>		
	Ressource	Procédé EcolInvent	Quantité	Unité
INPUT	Transport	<i>market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4, RER</i>	1.25E-01	t.km
OUTPUT	coke de pétrole (<i>impact évité</i>)	<i>petroleum coke, GLO</i>	6.31E-01	kg
	charbon (<i>impact évité</i>)	<i>hard coal mine operation, RoW</i>	1.46E-01	kg
	gaz naturel (<i>impact évité</i>)	<i>natural gas, high pressure, RU</i>	2.74E-02	m3
	cendres pour clinker (<i>impact évité</i>)	<i>hard coal ash - RER without CH</i>	0.25	kg

Dans ces inventaires, on néglige le broyage des pneumatiques en vue d'être incinérés faute de données. On choisit le procédé de production de gaz naturel russe car c'est un producteur essentiel pour le marché français. Toutefois, nous devrions ajouter un procédé de transport par gazoduc en impact évité également. La quantité de gaz considérée étant faible, l'erreur engendrée est tout à fait négligeable.

4 Conclusion

Nous venons de construire les données environnementales spécifiques au cas de l'entretien routier en France. Cette construction s'est effectuée par un recensement des données d'ICV existantes pour chaque type de produit – ceux de resurfaçage routier et ceux de consommation véhiculaire. Dans le cas des produits de resurfaçage, un certain nombre d'ICV étaient préexistants, mais datés ou peu adaptés au contexte technologique de la France. Ce travail a permis une contextualisation des ICV de resurfaçage, ICV à la fois adaptés aux techniques d'entretien françaises et aux matériaux utilisés sur le marché intérieur. Dans le cas des consommations de pièces d'usure véhiculaires, quelques ICV existaient pour certaines catégories de pneumatiques tandis que nous n'avons trouvé trace d'aucune donnée environnementale concernant le cycle de vie des pièces d'usure des suspensions. Nous avons relevé des inconsistances entre certaines publications relatives aux impacts environnementaux des

³⁸⁰ Échange par e-mail en janvier et février 2018 avec Jean-Aymeric Costa, ingénieur construction durable à l'ATILH

pneumatiques, ainsi qu'une variabilité de technologies élevée. Notons que faute de données industrielles précises, les ICV des pneumatiques de ces quatre typologies de véhicules restent une première version, particulièrement innovante dans les cas des déclinaisons VUL, PPL et GPL. Finalement, nous avons construit des ICV les plus adaptés possibles à la réalité du cycle de vie de ces produits sur le marché actuel français, en nous appuyant sur la littérature publique. Des ICV plus actuels ou exacts pourraient être réalisés en accédant à des données industrielles de meilleure qualité. D'ailleurs, il convient d'actualiser régulièrement les ICV pour assurer leur bonne représentativité technologique, entre autres.

La construction de ces données environnementales était la dernière pièce manquante pour permettre l'utilisation de la méthode d'évaluation construite au chapitre 4. Nous pouvons maintenant passer à une démonstration d'utilisation de notre méthode sur un cas d'étude, qui fera l'objet du Chapitre 6.

5 Bibliographie

Abdo, Joseph. 2011. « Analyse du cycle de vie de structures routières ». T89. Collection Technique CimBéton - BÉTON ET DÉVELOPPEMENT DURABLE. CIMBÉTON. <http://www.infociments.fr/publications/route/collection-technique-cimbeton/ct-t89>.

AFNOR. 2006. « NF EN ISO 14044 Octobre 2006 - Management environnemental - Analyse du cycle de vie - Exigences et lignes directrices ». <https://www.boutique.afnor.org/norme/nf-en-iso-14044/management-environnemental-analyse-du-cycle-de-vie-exigences-et-lignes-directrices/article/651688/fa138266>.

———. 2012. « FD ISO/TR 14049 Juillet 2012 Management environnemental - Analyse du cycle de vie - Exemples illustrant l'application de l'ISO 14044 à la définition de l'objectif et du champ d'étude et à l'analyse de l'inventaire ». <https://www.boutique.afnor.org/norme/fd-iso-tr-14049/management-environnemental-analyse-du-cycle-de-vie-exemples-illustrant-l-application-de-l-iso-14044-a-la-definition-de-l-obj/article/801429/fa169651>.

Aliapur R&D. 2009. « Utilisation des pneus usagés comme combustible alternatif - Valeurs de référence et protocoles de caractérisation ». https://www.aliapur.fr/sites/default/files/files/RetD/Pneus_usages_comme_combustible_alternatif_extrait.pdf?rewrite.

Althaus, Hans-Jörg, Roland Hischier, Maggie Osses, Alex Primas, et Niels Jungbluth. 2007. « Life Cycle Inventories of Chemicals - Data v2.9 (2007) ». EcoInvent Report n°8.

ASTAG. 1991. « Die selbstkosten des gütertransports mit nutzfahrzeugen ». Bern: Schweizer Nutzfahrzeugverband.

Athena Institute. 2006. « A life cycle perspective on concrete and asphalt roadways: embodied primary energy and global warming potential ». Ottawa, Canada: Cement Association of Canada.

ATILH. 2017. « Déclaration Environnementale de Produit - Ciments courants français CEM I - En conformité avec la norme NF EN 15804+A1 et son complément national NF EN 15804/CN ». http://www.infociments.fr/telecharger/document/pdf/developpement-durable/construction-durable/dep-ciments/dep-ciments-ATILH_DEP_CEM%20I_17-02-17.pdf.

Aurangzeb, Qazi, Imad L. Al-Qadi, Hasan Ozer, et Rebekah Yang. 2014. « Hybrid Life Cycle Assessment for Asphalt Mixtures with High RAP Content ». *Resources, Conservation and Recycling* 83 (février): 77-86. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.12.004>.

AzariJafari, Hessam, Ammar Yahia, et Mourad Ben Amor. 2016. « Life Cycle Assessment of Pavements: Reviewing Research Challenges and Opportunities ». *Journal of Cleaner Production* 112 (janvier): 2187-97. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.080>.

Balaguera, Alejandra, Gloria Isabel Carvajal, Jaume Albertí, et Pere Fullana-i-Palmer. 2018. « Life Cycle Assessment of Road Construction Alternative Materials: A Literature Review ». *Resources, Conservation and Recycling* 132 (mai): 37-48. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.01.003>.

Bernard, Frédérick, Timo Blomberg, et Mike Southern. 2012. « Life Cycle Inventory : bitumen ». In . Nantes, France.

Bertolini, Gérard. 2008. « Les contours de la concurrence entre cimenterie et incinération spécialisée de déchets en Europe ». *Revue francophone d'écologie industrielle*, n° n°49. http://odel.irevues.inist.fr/dechets-sciences-techniques/docannexe/file/1415/2_bertolini.pdf.

Beukering, Pieter J. H., et Marco A. Janssen. 2000. « A Dynamic Integrated Analysis of Truck Tires in Western Europe ». *Journal of Industrial Ecology* 4 (2): 93-115. <https://doi.org/10.1162/108819800569825>.

Blagodatsky, Sergey, Jianchu Xu, et Georg Cadisch. 2016. « Carbon Balance of Rubber (*Hevea Brasiliensis*) Plantations: A Review of Uncertainties at Plot, Landscape and Production Level ». *Agriculture, Ecosystems & Environment* 221 (avril): 8-19. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.01.025>.

Blomberg, Timo, Jeff Barnes, Frédéric Bernard, Philippe Dewez, Stéphane Le Clerc, Marco Pfitzmann, Laurent Porot, Mike Southern, et Ron Taylor. 2011. « Life Cycle Inventory: Bitumen ». Brussels, Belgium. <http://www.eurobitume.eu/fileadmin/pdf-downloads/LCI%20Report-Website-2ndEdition-20120726.pdf>.

Boulangé, Laurence, Erick Lemonnier, Franck Ollivier, Lionel Bobeau, et Jean-Pierre Baud. 2016. « Exposition professionnelle aux fumées de bitume - Principales conclusions de la campagne nationale de 2015 ». *Revue Générale des Routes et de l'Aménagement*, n° 939: pp 62-68.

Boustani, Avid, Sahni Sahni, Timothy Gutowski, et Steven Graves. 2010. « Tire Remanufacturing and Energy Savings ». Massachusetts Institute of Technology, Sloan School of Management, Environmentally Benign Manufacturing Laboratory. <http://web.mit.edu/ebm/www/Publications/MITEI-1-h-2010.pdf>.

Bras, Bert, et Austin Cobert. 2011. « Life-Cycle Environmental Impact of Michelin Tweel® Tire for Passenger Vehicles ». *SAE International Journal of Passenger Cars - Mechanical Systems* 4 (1): 32-43. <https://doi.org/10.4271/2011-01-0093>.

Capitano, Kyle Jordan. 2015. « Methodologies for Life Cycle Assessment of Passenger Vehicles ». Thèse de master, Ontario, Canada: University of Windsor. <http://scholar.uwindsor.ca/cgi/viewcontent.cgi?article=6459&context=etd>.

Capony, Adrien. 2013. « Evaluation environnementale d'un chantier de terrassement - mise au point d'un outil paramétrable de mesures d'émissions relatives aux engins de terrassement ». Ecole Centrale de Nantes. <http://www.theses.fr/2013ECDN0002>.

Carnegie Mellon University. s. d. « CMU - Economic Input-Output Life Cycle Assessment - Carnegie Mellon University ». Consulté le 23 janvier 2018. <http://www.eiolca.net/index.html>.

Chappat, Michel, et Julian Bilal. 2003. « The Environmental Road of the Future - Life Cycle Analysis - Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions ». Colas Group.

Cheng, Ling, Dezhen Chen, Guojie Yan, et Hang Zheng. 2010. « Life Cycle Assessment of Road Surface Paving with Warm Mix Asphalt (WMA) Replacing Hot Mix Asphalt (HMA) ». In , 1-5. IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICEEE.2010.5660713>.

Chester, Mikhail. 2008. « Life-cycle Environmental Inventory of Passenger Transportation in the United States ». Dissertations. Berkeley: Institute of Transportation Studies, UC Berkeley.

Chiu, Chui-Te, Tseng-Hsing Hsu, et Wan-Fa Yang. 2008. « Life Cycle Assessment on Using Recycled Materials for Rehabilitating Asphalt Pavements ». *Resources, Conservation and Recycling* 52 (3): 545-56. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2007.07.001>.

Chong, Dan, et Yuhong Wang. 2017. « Impacts of Flexible Pavement Design and Management Decisions on Life Cycle Energy Consumption and Carbon Footprint ». *The International Journal of Life Cycle Assessment* 22 (6): 952-71. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1202-x>.

- Choquette-Levy, Nicolas, Margaret Zhong, Heather L MacLean, et Joule A. Bergerson. 2017. « COPTTEM: A Model to Investigate the Factors Driving Crude Oil Pipeline Transportation Emissions ». *Environmental Science & Technology*, novembre. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b03398>.
- Chowdhury, Raja, Defne Apul, et Tim Fry. 2010. « A Life Cycle Based Environmental Impacts Assessment of Construction Materials Used in Road Construction ». *Resources, Conservation and Recycling* 54 (4): 250-55. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2009.08.007>.
- Cobert, Austin. 2009. « Environmental comparison of Michelin Tweel™ and pneumatic tire using life cycle analysis ». Master's of Science Thesis in the School of Mechanical Engineering, Georgia Institute of Technology. https://smartech.gatech.edu/bitstream/handle/1853/37202/cobert_austin_m_200912_mast.pdf.
- Comité Professionnel du pétrole. 2017. « L'intégral - Pétrole 2016 - Statistiques existante sur l'industrie pétrolière et aperçu sur les autres énergies, en France et dans le monde. »
- Continental. 1999. « Life Cycle Assessment of a car tire ». Continental. http://www.proyectaryproducir.com.ar/public_html/Seminarios_Posgrado/Material_de_referencia/LCA%20of%20a%20Car%20Tire%20-%20Continental.pdf.
- Cross, Stephen, Warren Chesner, Henry Justus, et Edward Kearney. 2011. « Life-Cycle Environmental Analysis for Evaluation of Pavement Rehabilitation Options ». *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2227 (décembre): 43-52. <https://doi.org/10.3141/2227-05>.
- CRR. 2008. « Carbon footprints of tyre production – new versus remanufactured - A report comparing the carbon footprint of a new and a retread tyre for use by light commercial vehicles ». Center for Remanufacturing and Reuse. <http://www.remanufacturing.org.uk/pdf/story/1p158.pdf>.
- Cuenoud. 2011. « Valorcol : asphalt mix complying with environment and sustainable development ». *European Roads Review* Spring.
- Dones, Roberto, Christian Bauer, Rita Bolliger, Bastian Burger, Thomas Heck, Alexander Röder, Mireille Faist Emmenegger, Rolf Frischknecht, Niels Jungbluth, et Matthias Tuchschnid. 2007. « Life Cycle Inventories of Energy Systems : results for current systems in Switzerland and other UCTE countries - Data v2.0 ». EcoInvent Report.
- Dunn, J.R, et R.H Jones. 1991. « Automobile and truck tires adapt to increasingly stringent requirements ». *Elastomerics*, 1991, Palmerton, New York, NY, ETATS-UNIS édition.
- ECOBILAN S.A. 1997. « Overview of life-cycle assessment studies in the automotive sector. » IPTS Technical Report Series. Luxembourg: Office of the European Union. <https://publications.europa.eu/fr/publication-detail/-/publication/7426f51d-a304-48eb-a732-a21890028c97>.
- EEA. 2013. « EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2009. Technical guidance to prepare national emission inventories ». European Environment Agency Technical report n°12/2013. Luxembourg: European Environment Agency. <http://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2013>.
- ETRMA. 2001. « Life cycle assessment of an average European car tyre ». ETRMA. <http://www.etrma.org/tyres/ELTs/LCA-ELTs>.
- . 2009. « Tyre Generic Exposure Scenario End of Life Tyre Guidance ». ChemRisk LLC. <http://www.etrma.org/uploads/Modules/Documentsmanager/chemrisk--09-12-16-end-of-life-tyre.pdf>.

———. 2015a. « End-of-life Tyre - REPORT 2015 ». ETRMA. <http://www.etrma.org/uploads/Modules/Documentsmanager/elt-report-v9a---final.pdf>.

———. 2015b. « The ETRMA statistics report ». Statistics Edition 2015. ETRMA. <http://www.etrma.org/uploads/Modules/Documentsmanager/20151214--statistics-booklet-2015-final2.pdf>.

———. 2017. « European tyre & rubber industry - Statistics - Edition 2016 ». ETRMA. <http://www.etrma.org/uploads/Modules/Documentsmanager/20161208---statistics-booklet-2016-final5.pdf>.

European Commission, Joint Research Centre, et Institute for Environment and Sustainability. 2011. *International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook: Framework and Requirements for Life Cycle Impact Assessment Models and Indicators*. Luxembourg: Publications Office.

European Environment Agency. 2016. *EMEP/EEA Air Pollutant Emission Inventory Guidebook 2016: Technical Guidance to Prepare National Emission Inventories*. <http://bookshop.europa.eu/uri?target=EUB:NOTICE:THAL16020:EN>.

———. 2017. « EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2016 – Update May 2017 ».

Evans, Anne, et Russ Evans. 2006. « The Composition of a Tyre: Typical components ». Project code: TYR0009-02. EER Limited. <http://www.wrap.org.uk/sites/files/wrap/2%20-%20Composition%20of%20a%20Tyre%20-%20May%202006.pdf>.

Explicit. 2008. « Enquête sur les consommations d'énergie des commerces et services de proximité en région Ile-de-France ». ADEME-ARENE. https://www.google.fr/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=3&cad=rja&uact=8&ved=0ahUK EwilnMijta_XAhXGqxoKHW-fA4EQFgg7MAI&url=http%3A%2F%2Fwww.arenidf.org%2Ffile%2Fenquetesurlesconsommationsden ergiedescommerc.pdf%2Fdownload%3Ftoken%3DYVRBMFFV&usg=AOvVaw3rf4v3j-9r9929spA8hYrB.

E&Y. 2016. « L'impact socio-économique du rechapage poids lourd en France et en Europe - L'économie circulaire du pneu en danger ». [http://www.ey.com/Publication/vwLUAssets/ey-l-impact-socio-economique-du-rechapage-poids-lourd-en-france-et-en-europe/\\$FILE/ey-l-impact-socio-economique-du-rechapage-poids-lourd-en-france-et-en-europe.pdf](http://www.ey.com/Publication/vwLUAssets/ey-l-impact-socio-economique-du-rechapage-poids-lourd-en-france-et-en-europe/$FILE/ey-l-impact-socio-economique-du-rechapage-poids-lourd-en-france-et-en-europe.pdf).

Eyerer, P. 1994. « Life Cycle Assessment of automotive products made out of steel, aluminium and polymers on the example oil filter for passenger car engines ». *Polymers in the automobile*, VDI-Verlag, 5-42.

Farina, Angela, Maria Chiara Zanetti, Ezio Santagata, et Gian Andrea Blengini. 2017. « Life Cycle Assessment Applied to Bituminous Mixtures Containing Recycled Materials: Crumb Rubber and Reclaimed Asphalt Pavement ». *Resources, Conservation and Recycling* 117 (février): 204-12. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.10.015>.

Fawer, Matthias, Dennis Postlethwaite, et Hans -Jürgen Klüppel. 1998. « Life cycle inventory for the production of zeolite a for detergents ». *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 1998, Volume 3, Issue 2 édition.

Ferrer, Geraldo. 1997. « The Economics of Tire Remanufacturing ». *Resources, Conservation and Recycling* 19 (4): 221-55. [https://doi.org/10.1016/S0921-3449\(96\)01181-0](https://doi.org/10.1016/S0921-3449(96)01181-0).

Frischknecht, R, U Bollens, S Bosshart, M Ciot, L Ciseri, G Doka, R Dones, U Gantner, et R Hischier. 1996. « Ökoinventare von energiesystemen: grundlagen für den ökologischen vergleich von
406

- energiesystemen und den einbezug von energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz ». Auflage n°3. Pau Scherrer institute: Groupe Energie - Stoffe - Umwelt (ESU).
- Fussler, C.R, et B Krummenacher. 1991. « Ecobalances: a key to better environmental material choices in automobile design ». *Materials & Design*.
- Gandar-Gervais, Catherine. 2008. « La responsabilité environnementale des cimenteries ». *Idées économiques et sociales* 153 (3): 57. <https://doi.org/10.3917/idee.153.0057>.
- Garg, Bhagwan D., Steven H. Cadle, Patricia A. Mulawa, Peter J. Groblicki, Chris Laroo, et Graham A. Parr. 2000. « Brake Wear Particulate Matter Emissions ». *Environmental Science & Technology* 34 (21): 4463-69. <https://doi.org/10.1021/es001108h>.
- Giani, Martina Irene, Giovanni Dotelli, Nicolò Brandini, et Luca Zampori. 2015. « Comparative Life Cycle Assessment of Asphalt Pavements Using Reclaimed Asphalt, Warm Mix Technology and Cold in-Place Recycling ». *Resources, Conservation and Recycling* 104 (novembre): 224-38. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.08.006>.
- Goyer, Sarah, Michel Dauvergne, Louise Wendling, Vincent Gaudefroy, et Christophe Ropert. 2012. « Environmental data of cold mix using emulsified bitumen for a better selection of road materials ». In . <https://trid.trb.org/view.aspx?id=1262605>.
- GPB. 2005a. « Le marché du bitume ». *Bitume Info*, Numéro spécial, , n° n°1: pp10-12.
- . 2005b. « Qualité, normes et spécifications ». *Bitume Info*, Numéro spécial, , n° n°1: p20.
- . 2015. « La disponibilité en bitume - du bitume de qualité et pour longtemps ». *Bitume Info* Eté-Automne 2015 (n°32): pp4-5.
- Häkkinen, T, et K Mäkelä. 1996. « Environmental impact of concrete and asphalt pavements ». 1752. Research Notes. Finland: Technical Research Center of Finland.
- Hall, Charles A.S., Jessica G. Lambert, et Stephen B. Balogh. 2014. « EROI of Different Fuels and the Implications for Society ». *Energy Policy* 64 (janvier): 141-52. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.05.049>.
- Hawkins, Troy R., Bhawna Singh, Guillaume Majeau-Bettez, et Anders Hammer Strømman. 2013. « Comparative Environmental Life Cycle Assessment of Conventional and Electric Vehicles: LCA of Conventional and Electric Vehicles ». *Journal of Industrial Ecology* 17 (1): 53-64. <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2012.00532.x>.
- Hoang. 2005. « Tronçons autoroutiers : une méthodologie de modélisation environnementale et économique pour différents scénarios de construction et d'entretien ».
- Huang, Yue, Roger Bird, et Margaret Bell. 2009. « A Comparative Study of the Emissions by Road Maintenance Works and the Disrupted Traffic Using Life Cycle Assessment and Micro-Simulation ». *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 14 (3): 197-204. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2008.12.003>.
- Huang, Yue, Roger N. Bird, et Oliver Heidrich. 2007. « A Review of the Use of Recycled Solid Waste Materials in Asphalt Pavements ». *Resources, Conservation and Recycling* 52 (1): 58-73. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2007.02.002>.
- IEA. 2017. « Oil Information 2017 ». International Energy Agency.

IFEN. 2008. « Global environmental and sustainable development indicators - Report and Summary of the Ifen Science Council Meeting 25 June 2007 ». n°11. les dossiers ifen. http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/fileadmin/documents/Produits_editoriaux/Publications/Etudes_et_documents/2008/dossier11_CS_indicateursGlobaux_anglais.pdf.

Infociments. 2016. « Infociments 2016 - l'essentiel ». <http://www.infociments.fr/publications/industrie-cimentiere/statistiques/st-g08-2015>.

INSEE. 2014. « Tableaux de l'Économie Française - Édition 2014 - Pétrole - Charbon ». INSEE RÉFÉRENCES. <https://www.insee.fr/fr/statistiques/1288394?sommaire=1288404>.

Inyim, Peeraya, Jose Pereyra, Michael Bienvenu, et Ali Mostafavi. 2016. « Environmental Assessment of Pavement Infrastructure: A Systematic Review ». *Journal of Environmental Management* 176 (juillet): 128-38. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.03.042>.

Jawjit, Warit, Carolien Kroeze, et Suwat Rattanapan. 2010. « Greenhouse Gas Emissions from Rubber Industry in Thailand ». *Journal of Cleaner Production* 18 (5): 403-11. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2009.12.003>.

Jullien, A., M. Dauvergne, et V. Cerezo. 2014. « Environmental Assessment of Road Construction and Maintenance Policies Using LCA ». *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 29 (juin): 56-65. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2014.03.006>.

Jullien, A., C. Proust, T. Martaud, E. Rayssac, et C. Ropert. 2012. « Variability in the Environmental Impacts of Aggregate Production ». *Resources, Conservation and Recycling* 62 (mai): 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.02.002>.

Jullien, Agnès, Vincent Gaudefroy, Anne Ventura, Chantal de la Roche, Régis Paranhos, et Pierre Monéron. 2010. « Airborne Emissions Assessment of Hot Asphalt Mixing: Methods and Limitations ». *Road Materials and Pavement Design* 11 (1): 149-69. <https://doi.org/10.1080/14680629.2010.9690264>.

Jungbluth, Niels. 2004. « Erdöl. In : Sachbilanzen von energiesystemen : Grundlagen für den ökologischen vergleich von energiesystemen und den einbezug von energisystemen in Ökobilanzen für die Schweiz (Ed. Dones R.) ». EcoInvent.

Kang, Seunggu. 2013. « The development of a regional inventory database for the material phase of the pavement life-cycle with updated vehicle emission factors using moves ». Thèse de master, University of Illinois at Urbana-Champaign. https://www.ideals.illinois.edu/bitstream/handle/2142/45592/Seung%20Gu_Kang.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

Kang, Seunggu, Rebekah Yang, Hasan Ozer, et Imad Al-Qadi. 2014. « Life-Cycle Greenhouse Gases and Energy Consumption for Material and Construction Phases of Pavement with Traffic Delay ». *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2428 (décembre): 27-34. <https://doi.org/10.3141/2428-04>.

Kellenberger, Daniel, Hans-Jörg Althaus, Tina Künniger, Martin Lehmann, Niels Jungbluth, et Philipp Thalmann. 2007. « Life Cycle Inventories of Building Products ». EcoInvent Report n°7. EcoInvent. https://db.ecoinvent.org/reports/07_BuildingProducts.pdf?area=463ee7e58cbf8.

Keoleian Gregory A., Kendall Alissa, Dettling Jonathan E., Smith Vanessa M., Chandler Richard F., Lepech Michael D., et Li Victor C. 2005. « Life Cycle Modeling of Concrete Bridge Design: Comparison

- of Engineered Cementitious Composite Link Slabs and Conventional Steel Expansion Joints ». *Journal of Infrastructure Systems* 11 (1): 51-60. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1076-0342\(2005\)11:1\(51\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1076-0342(2005)11:1(51)).
- Kucukvar, Murat, Mehdi Noori, Gokhan Egilmez, et Omer Tatari. 2014. « Stochastic decision modeling for sustainable pavement designs ». *The International Journal of Life Cycle Assessment* 19 (6): 1185-99. <https://doi.org/10.1007/s11367-014-0723-4>.
- Lave, Lester B., Elisa Cobas-Flores, Chris T. Hendrickson, et Francis C. McMichael. 1995. « Using Input-Output Analysis to Estimate Economy-Wide Discharges ». *Environmental Science & Technology* 29 (9): 420A-426A. <https://doi.org/10.1021/es00009a003>.
- Le Guern, Y, C Petiot, et E Schloesing. 2011. « Mode de prise en compte de la fin de vie lors de la réalisation d'analyses de cycle de vie (ACV) « produits » - Etat de l'Art ». RECORD 10-1019/1A. Bio Intelligence Service. http://www.record-net.org/storage/etudes/10-1019-1A/rapport/Rapport_record10-1019_1A.pdf.
- Leontief, Wassily. 1970. « Environmental Repercussions and the Economic Structure: An Input-Output Approach ». *The Review of Economics and Statistics* 52 (3): 262. <https://doi.org/10.2307/1926294>.
- Lin, Tse-Hung, Yu-Shu Chien, et Wei-Ming Chiu. 2016. « Rubber tire life cycle assessment and the effect of reducing carbon footprint by replacing carbon black with graphene ». *International Journal of Green Energy* 14 (novembre): 97-104. <https://doi.org/10.1080/15435075.2016.1253575>.
- Lutsey, N, et D Sperling. 2006. « Energy Efficiency, Fuel Economy, and Policy Implications ». *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Institute of Transportation Studies, University of California, Davis, , n° n°1941.
- Maibach, M, D Peter, et B Seiler. 1999. « Ökoinventar transporte : Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Transportsystemen und den Eingebzug von Transportsystemen in Ökobilanzen technischer ». Zurich: INFRAS.
- Martaud, Thomas. 2008. « Evaluation environnementale de la production de granulats naturels en exploitation de carrière : indicateurs, modèles et outils ». Thèse de doctorat en Sciences de l'univers, Université d'Orléans. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00412080>.
- Mazumder, Mithil, Vedaraman Sriraman, Hyun Hwan Kim, et Soon-Jae Lee. 2016. « Quantifying the Environmental Burdens of the Hot Mix Asphalt (HMA) Pavements and the Production of Warm Mix Asphalt (WMA) ». *International Journal of Pavement Research and Technology* 9 (3): 190-201. <https://doi.org/10.1016/j.ijprt.2016.06.001>.
- Ministère de l'Environnement. 2017. « Chiffres clés de l'énergie - Édition 2016 ». MEEM. http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/fileadmin/user_upload/Datalab-13-CC-de_l-energie-edition-2016-fevrier2017.pdf.
- Mladenovič, Ana, Janez Turk, Jaka Kovač, Alenka Mauko, et Zvonko Cotič. 2015. « Environmental Evaluation of Two Scenarios for the Selection of Materials for Asphalt Wearing Courses ». *Journal of Cleaner Production* 87 (janvier): 683-91. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.10.013>.
- Mohd Nor, Zairossani. 2012. « Addressing sustainability of natural rubber industry through life cycle assessment ». présenté à International rubber conference 2012, Kerala, India. <http://clinic.rubberboard.org.in/PDF/ircpdf/CM-01%20Zairossani%20Mohd.pdf>.
- Molleron, Henri, et Vincent Besse. 2016. « Cas des fumées de bitume - Contexte historique ». *Revue Générale des Routes et de l'Aménagement*, n° 939: pp 52-60.

Moretti, Laura, Vittorio Mandrone, Antonio D'Andrea, et Silvia Caro. 2017. « Comparative “from Cradle to Gate” Life Cycle Assessments of Hot Mix Asphalt (HMA) Materials ». *Sustainability* 9 (3): 400. <https://doi.org/10.3390/su9030400>.

Muller, Isabelle, Jean-Yves Touboulic, et Jean-Michel Michou. 2016. « Combustibles, carburants et bitume - Sécurité d'approvisionnement et transition énergétique ». *Revue Générale des Routes et de l'Aménagement*, n° 940: pp 16-21.

Ozer, Hasan, Rebekah Yang, et Imad L. Al-Qadi. 2017. « Quantifying Sustainable Strategies for the Construction of Highway Pavements in Illinois ». *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 51 (mars): 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2016.12.005>.

Pacheco-Torgal, Fernando, Luisa F. Cabeza, Joao Labrincha, et Aldo Giuntini de Magalhaes. 2014. *Eco-efficient construction and building materials: life cycle assessment (lca), eco-labelling and case studies*. Woodhead publishing series in civil and structural engineering, no. 49. Philadelphia, PA: Woodhead Pub. https://books.google.fr/books?id=_ZjiAgAAQBAJ&pg=PA535&lpg=PA535&dq=Pacheco-Torgal+et+al+2014+tire+truck&source=bl&ots=e8d2E4uhOb&sig=YcY096eHHW87_XXUqfQgCLN74-I&hl=en&sa=X&ved=0ahUKEwiE-Pnau_rWAhUBShQKHxIxCvsQ6AEINzAC#v=onepage&q&f=false.

Petit, Pascal. 2016. « De l'exposition professionnelle aux hydrocarbures aromatiques polycycliques à l'estimation du risque de survenue de cancers professionnels ». Université Grenoble Alpes.

Peuportier, Bruno, Charlotte Roux, Marie-Lise Pannier, et Natalia Kotelnikova-Weiler. 2017. « Using LCA to assess urban projects, a case study ». In . IFP, Paris.

Rasutis, Daina. 2014. « Comparative Life Cycle Assessment of Conventional and Guayule Automobile Tires ». Master of Science Thesis Dissertation, Arizona State University. https://repository.asu.edu/attachments/135187/content/Rasutis_asu_0010N_14059.pdf.

Renault. 2011. « Fluence and Fluence Z.E. Life Cycle Assessment ». Renault. <https://group.renault.com/wp-content/uploads/2014/09/fluence-acv-2011.pdf>.

———. 2015. « Renault Twingo - 2015 - Life Cycle Assessment results - Renault LCA methodology ». Renault. https://group.renault.com/wp-content/uploads/2016/07/final_en_rapport-twingo.pdf.

Ridge, Lynne. 1998. « EUCAR - Automotive LCA Guidelines - Phase 2 ». In . <https://doi.org/10.4271/982185>.

RMA. 2006. « Scrap Tire Markets in the United States ». 2005 Edition. Rubber Manufacturers Association. <http://www.energyjustice.net/files/tires/files/rma2005.pdf>.

Röder, A. 2001. « Integration of life-cycle assessment and energy planning models for the evaluation of car powertrains and fuels ». Ph.D. dissertation, Zurich, Switzerland: ETH-14291, Swiss Federal Institute of Technology.

Santero, Nicholas J., Eric Masanet, et Arpad Horvath. 2011a. « Life-Cycle Assessment of Pavements. Part I: Critical Review ». *Resources, Conservation and Recycling* 55 (9-10): 801-9. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.03.010>.

———. 2011b. « Life-Cycle Assessment of Pavements Part II: Filling the Research Gaps ». *Resources, Conservation and Recycling* 55 (9-10): 810-18. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.03.009>.

Santos, Joao. 2015. « A comprehensive life cycle approach for managing pavement systems ». Portugal: Universidade de Coimbra.

<https://estudogeral.sib.uc.pt/bitstream/10316/30093/1/A%20Comprehensive%20Life%20Cycle%20A%20approach%20for%20Managing%20Pavement%20Systems.pdf>.

Saur, K., M. Schuckert, J. Gediga, H. Florin, et J. Hesselbach. 1997. « LCA Study on Tires With Reduced Roll Resistance ». In . <https://doi.org/10.4271/971159>.

Sayagh, Shahinaz, Anne Ventura, Tung Hoang, Denis François, et Agnès Jullien. 2010. « Sensitivity of the LCA Allocation Procedure for BFS Recycled into Pavement Structures ». *Resources, Conservation and Recycling* 54 (6): 348-58. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2009.08.011>.

Schweimer, Georg, et Marcel Levin. 2000. « Life Cycle Inventory for the Golf A4 ». Versmold: Volkswagen AG. <http://www.wz.uw.edu.pl/pracownicyFiles/id10927-volkswagen-life-cycle-inventory.pdf>.

Sibieude, Christophe, et Thierry Sibieude. 1993. « Industrie du ciment ». In *Les rouages économiques de l'environnement*, pp204-205. https://books.google.fr/books?id=RLDp9Tbx548C&pg=PA204&lpg=PA204&dq=consommation+%C3%A9nergie+%C3%A9tinue+cimenterie+france&source=bl&ots=qYLa5P-Tq9&sig=U4FLNOYxD1vsRmrXOCp_NvcCuel&hl=en&sa=X&ved=0ahUKEwjz2dq54tLYAhVC1xQKHyaTAzg4ChDoAQh2MAk#v=onepage&q=consommation%20%C3%A9nergie%20cimenterie%20france&f=false.

Soratana, Kullapa, Daina Rasutis, Habib Azarabadi, Pragnya L. Eranki, et Amy E. Landis. 2017. « Guayule as an Alternative Source of Natural Rubber: A Comparative Life Cycle Assessment with Hevea and Synthetic Rubber ». *Journal of Cleaner Production* 159 (août): 271-80. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.05.070>.

Spielmann, Michael, Christian Bauer, et Roberto Dones. 2007. « Transport services: Ecoinvent report no. 14 ». 14. EcoInvent report. Dübendorf: Swiss Centre for Life Cycle Inventories.

Stripple, H. 2001. « Life cycle assessment of road. A Pilot Study for Inventory Analysis ». 2nd revised Edition. Report from the IVL Swedish Environmental Research Institute. <http://www.ivl.se/download/18.343dc99d14e8bb0f58b734e/1445515385608/B1210E.pdf>.

Suh, Sangwon. 2009. « Developing the Sectoral Environmental Database for Input-Output Analysis: Comprehensive Environmental Data Archive of the U.S. » In *Handbook of Input-Output Economics in Industrial Ecology*, édité par Sangwon Suh, 23:689-712. Dordrecht: Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5737-3_32.

Sun, Xin, Jingru Liu, Jinglan Hong, et Bin Lu. 2016. « Life Cycle Assessment of Chinese Radial Passenger Vehicle Tire ». *The International Journal of Life Cycle Assessment* 21 (12): 1749-58. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1139-0>.

Sutter, Jürgen. 2007. « Life Cycle inventories of Petrochemical solvents - Data v2.0 (2007) ». EcoInvent Report n°22.

Tatari, Omer, Munir Nazzal, et Murat Kucukvar. 2012. « Comparative Sustainability Assessment of Warm-Mix Asphalts: A Thermodynamic Based Hybrid Life Cycle Analysis ». *Resources, Conservation and Recycling* 58 (janvier): 18-24. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.07.005>.

The International Institute of Synthetic Rubber Producers. 1998. « Eco-Profile of SBS ». The International Institute of Synthetic Rubber Producers.

Thenoux, Guillermo, Álvaro González, et Rafael Dowling. 2007. « Energy Consumption Comparison for Different Asphalt Pavements Rehabilitation Techniques Used in Chile ». *Resources, Conservation and Recycling* 49 (4): 325-39. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2006.02.005>.

UNPG. 2011a. « Module d'informations environnementales de la production de granulats issus de roches massives - données sous format FDES conforme à la norme NF 10-01010 ». Union Nationale des Producteurs de Granulats.

———. 2011b. « Module d'informations environnementales de la production de granulats issus de roches meubles - données sous format FDES conforme à la norme NF 10-01010 ». Union Nationale des Producteurs de Granulats.

———. 2011c. « Module d'informations environnementales de la production de granulats recyclés - données sous format FDES conforme à la norme NF 10-01010 ». Union Nationale des Producteurs de Granulats.

US EPA. 2004. « AP-42: compilation of air pollutant emission factors ». Volume 1: Stationary point and area sources, Chapter 11: Mineral products industry, 11.1. United States Environmental Protection Agency. <http://www.epa.gov/ttn/chief/ap42/ch11/index.html>.

———. 2015. « TIRES ». WARM Version 13. <https://www3.epa.gov/warm/pdfs/Tires.pdf>.

USAMP/LCA. 1998. « Life Cycle Inventory of a generic U.S. family Sedan - overview of results USCAR AMP Project ». 339. Society of Automotive Engineers, Inc.

USIRF. 2014. « Bilan environnemental 2013 ». USIRF. http://www.usirf.com/wp-content/uploads/BILAN_ENVIRONNEMENTAL_2013_v06052014.pdf.

———. 2016a. « Déclaration environnementale produit - Production d'enrobé bitumineux à chaud représentatif du marché français ». USIRF. http://www.usirf.com/wp-content/uploads/FDES-USIRF_Chauss%C3%A9e-en-enrob%C3%A9-bitumineux.pdf.

———. 2016b. « Fiche de déclaration environnementale et sanitaire - Chaussée en enrobé bitumineux à chaud représentative du marché français ». USIRF. http://www.usirf.com/wp-content/uploads/FDES-USIRF_Chauss%C3%A9e-en-enrob%C3%A9-bitumineux.pdf.

———. 2016c. « Rapport de projet FDES - Analyse de cycle de vie de l'enrobé bitumineux à chaud représentatif français et d'une chaussée en enrobé bitumineux (Document confidentiel) ». Bio by Deloitte - USIRF.

Ventura, Anne, Pierre Monéron, et Agnès Jullien. 2008. « Environmental Impact of a Binding Course Pavement Section, with Asphalt Recycled at Varying Rates: Use of Life Cycle Methodology ». *Road Materials and Pavement Design* 9 (sup1): 319-38. <https://doi.org/10.1080/14680629.2008.9690172>.

Vidal, Rosario, Enrique Moliner, Germán Martínez, et M. Carmen Rubio. 2013. « Life Cycle Assessment of Hot Mix Asphalt and Zeolite-Based Warm Mix Asphalt with Reclaimed Asphalt Pavement ». *Resources, Conservation and Recycling* 74 (mai): 101-14. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.02.018>.

Volkswagen AG. 2008a. « The Golf – Environmental commendation – Background report ». Wolfsburg, Germany: Volkswagen AG.

———. 2008b. « The Passat – Environmental commendation – Background report ». Wolfsburg, Germany: Volkswagen AG. file:///C:/Users/anne.de-bortoli/Downloads/Volkswagen_Passat_livsl_psanalyse.pdf.

Wang, Yuhong. 2016. « The Effects of Using Reclaimed Asphalt Pavements (RAP) on the Long-Term Performance of Asphalt Concrete Overlays ». *Construction and Building Materials* 120 (septembre): 335-48. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.115>.

Weiland, Craig, et Stephen Muench. 2010. « Life-Cycle Assessment of Reconstruction Options for Interstate Highway Pavement in Seattle, Washington ». *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2170 (décembre): 18-27. <https://doi.org/10.3141/2170-03>.

Yang, Rebekah. 2014. « Development of a pavement life cycle assessment tool utilizing regional data and introducing an asphalt binder model ». Urbana, Illinois: University of Illinois at Urbana-Champaign. https://www.ideals.illinois.edu/bitstream/handle/2142/50651/Rebekah_Yang.pdf?sequence=1.

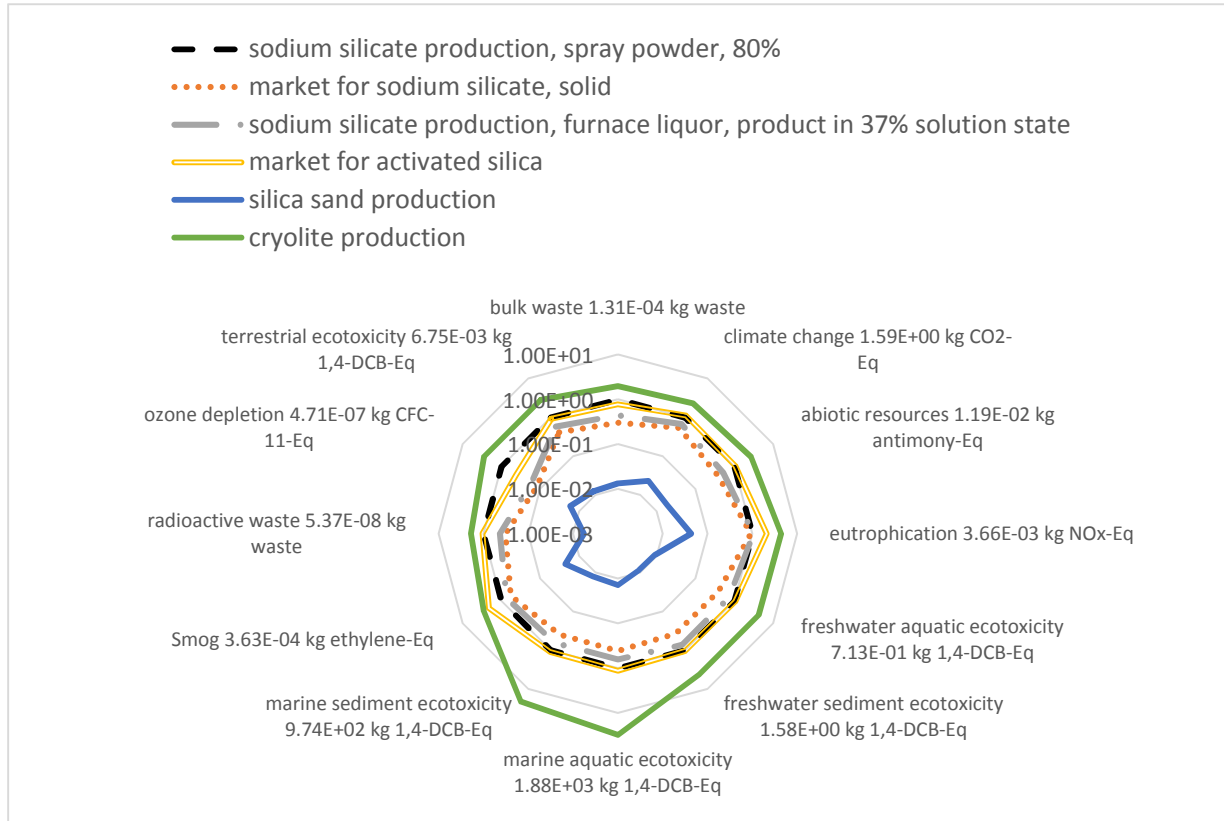
Yang, Rebekah, Seunggu Kang, Hasan Ozer, et Imad L. Al-Qadi. 2015. « Environmental and Economic Analyses of Recycled Asphalt Concrete Mixtures Based on Material Production and Potential Performance ». *Resources, Conservation and Recycling* 104 (novembre): 141-51. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.08.014>.

Yu, Bin, et Qing Lu. 2012. « Life Cycle Assessment of Pavement: Methodology and Case Study ». *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 17 (5): 380-88. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2012.03.004>.

Zhang, Han, Gregory A. Keoleian, Michael D. Lepech, et Alissa Kendall. 2010. « Life-Cycle Optimization of Pavement Overlay Systems ». *Journal of Infrastructure Systems* 16 (4): 310-22. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IS.1943-555X.0000042](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000042).

6 Annexe

Annexe 66. Comparaison d'impacts environnementaux (échelle logarithmique, normalisé selon les impacts de la production de silicate de sodium en poudre à 80%) de procédés EcoInvent pour la modélisation du silicate de sodium dans la préparation de gomme pneumatique



CHAPITRE 6 – Étude de cas autoroutière

Table des matières

1	Présentation de l'étude de cas.....	417
1.1	Une autoroute représentative de la France.....	417
1.2	Stratégie d'entretien actuelle.....	417
1.2.1	Durée de vie des revêtements	417
1.2.2	État de surface de l'autoroute.....	418
1.3	Sélection et présentation du tronçon d'étude	419
1.3.1	Structure et état du tronçon	419
1.3.2	Données de trafic	419
2	Opérationnalisation autoroutière de la méthode.....	420
2.1	Définition du système de référence	420
2.2	Scénarisation : programmes de resurfaçage testés	421
2.2.1	Théorie de la scénarisation	421
2.2.2	Scénarios de resurfaçage.....	421
2.3	Paramétrage du calcul.....	422
2.3.1	Gestion des travaux.....	422
2.3.2	Loi d'évolution de l'IRI et effet du resurfaçage	423
2.3.3	Valeurs de paramètres divers.....	424
2.4	Calcul numérique et données complémentaires	425
2.4.1	Logiciel et jeux de données	425
2.4.2	Choix et discussion des données macroéconomiques	425
3	Résultats et discussion	426
3.1	Performance des scénarios de resurfaçage : impacts absolus.....	426
3.2	Approche marginale : avantages des programmes d'entretien alternatifs	427
3.2.1	Présentation des résultats holistiques	427
3.2.2	Focus financier.....	430
3.2.3	Tendances des avantages et inconvénients selon la durée des cycles d'entretien	434
3.2.4	Analyse des déterminants des impacts absolus et des gains relatifs aux programmes d'entretien.....	436
3.3	Analyses de sensibilité.....	439
3.3.1	Niveau de trafic	439

3.3.2	Modification de la technique routière de resurfaçage	441
3.3.3	Vitesse de dégradation de la surface de chaussée.....	443
4	Enseignements	449
4.1	Résumé technique des résultats de l'étude de base.....	449
4.2	Résumé technique des résultats d'analyses de sensibilité	451
5	Conclusion	452
6	Bibliographie.....	455

Ce dernier chapitre fait la démonstration de l'applicabilité de la méthode d'évaluation intégrée sur un tronçon autoroutier de 10 km en 2x2 voies, supportant un trafic de 10 000 véhicules par jour et par sens. Nous établissons 5 scénarios de resurfaçage sur une durée de vie de chaussée de 39 ans et comparons leurs impacts en termes de développement durable. Nous esquissons ensuite quelques éléments concernant les « bons » niveaux d'investissement en resurfaçage à adopter sur autoroute, en tenant compte de la variabilité des autoroutes par analyse de sensibilité.

1 Présentation de l'étude de cas

1.1 Une autoroute représentative de la France

Pour notre étude de cas, nous avons choisi une autoroute du réseau Cofiroute « typique » du réseau autoroutier en rase campagne française, en termes à la fois de climat, de structure, de trafic, de géométrie et de topographie. Il s'agit d'une 2 x 2 voies.

Nous avons récupéré les données patrimoniales d'une centaine de kilomètres d'autoroute. L'analyse du jeu de données met en évidence environ 150 tronçons homogènes par sens, tronçons mesurant de 1 à 10281 m. Ces données comportent des informations chronologiques sur la structure de ces 150 tronçons (plateforme + chaussée) : sur la construction, l'entretien, et la réhabilitation éventuelle des différents tronçons de chaussée, en différenciant voie lente et voie rapide : épaisseur, technique, granularité, année, part de matériaux recyclés, type de bitume. Des données de situation (PR), d'auscultation (nombre d'onde, CFT, HS-PTE), et de trafic ont également été fournies par l'exploitant autoroutier.

1.2 Stratégie d'entretien actuelle

1.2.1 Durée de vie des revêtements

Nous avons réalisé des traitements statistiques relatifs à l'âge des revêtements routier des 100 km de chaussée autoroutière : deux traitements sont représentés sur les Figure 78 et Figure 79. La première figure montre le pourcentage cumulé des surfaces en fonction de l'année de dernier resurfaçage. La seconde figure montre la distribution statistique de l'âge des surfaces. L'âge moyen des revêtements surfaciques calculé vaut 13.7 ans. Nous remarquons par ailleurs que 10% des surfaces de chaussée de l'autoroute étudiée ont plus de 20 ans, et 30% des surfaces dépassent l'âge moyen de surface. La moyenne d'âge pondérée par la longueur du linéaire des revêtements concerné est de 6.9 ans.

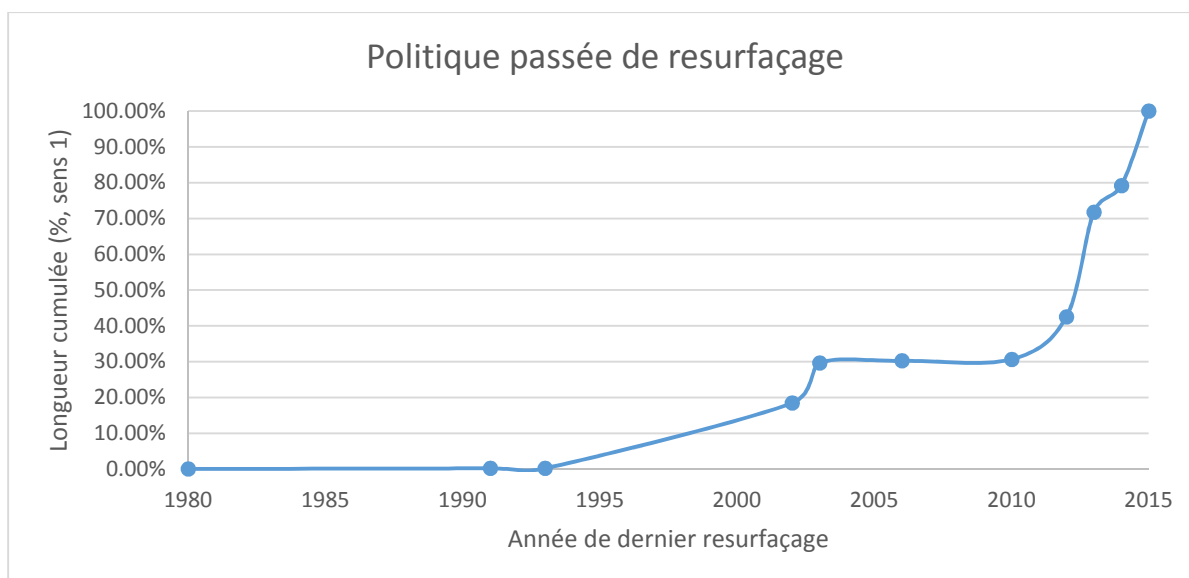


Figure 78 Pourcentage cumulé des surfaces des 100 km d'autoroute étudiée par année de construction

La Figure 79 montre la distribution non homogène des surfaces par âge. On remarque deux groupes d'âge de surfaces : les revêtements de moins de 7 ans, et ceux ayant entre 12 et 23 ans.

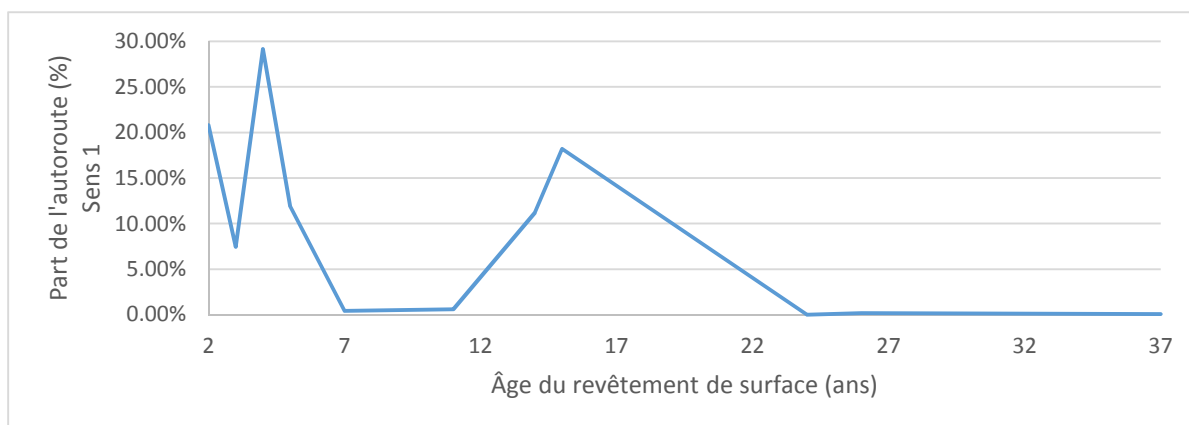


Figure 79 Répartition du linéaire de l'autoroute par âge du revêtement de surface

1.2.2 État de surface de l'autoroute

Les données de la SCA comportaient les valeurs de NBO (petites, moyennes et grandes ondes) des 100 kilomètres d'autoroute, mais pas de données d'indicateur d'IRI. En effet, cet indicateur n'est pas utilisé par les gestionnaires routiers français. Nous avons pu récupérer ces valeurs d'IRI directement auprès du prestataire d'auscultation du réseau de Cofiroute. En effet, rappelons que, si l'IRI n'est pas l'indicateur d'état de surface utilisé par les gestionnaires routiers puisque ceux-ci lui préfèrent les NBO, il est tout à fait possible de calculer l'IRI à partir des profils routiers relevés à l'auscultation par les prestataires. Le calcul d'IRI s'effectue donc directement à partir du profil relevé.

La Figure 80 représente la densité de tronçons de 10m en fonction de la valeur d'IRI de nos 100 km d'autoroute.

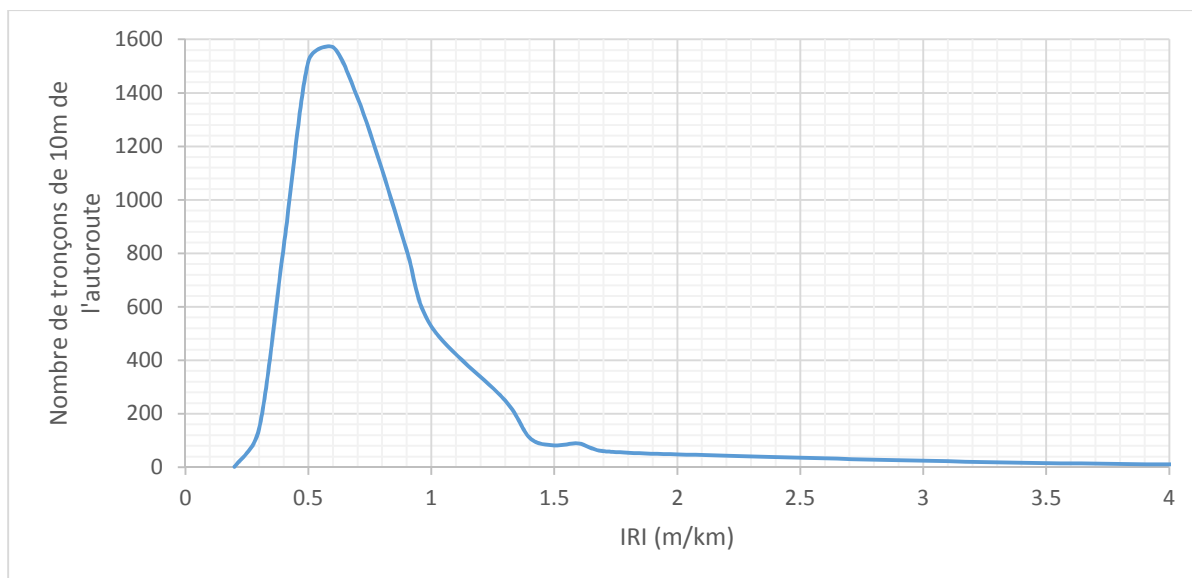


Figure 80 Densité de tronçons de 10m en fonction de la valeur d'IRI

1.3 Sélection et présentation du tronçon d'étude (=unité fonctionnelle)

Au sein de ces 100 kilomètres d'autoroute, nous souhaitons sélectionner un tronçon d'une dizaine de kilomètres selon des critères de représentativité nationale et de taille classique d'opération d'entretien autoroutier. En particulier, nous avons étudié les données de dégradation de surface afin de nous assurer que le tronçon étudié ne présente pas un comportement mécanique dégradé qui suggérerait des malfaçons structurelles (exemple : catégorie de portance de la plateforme inférieure au niveau nécessaire). La longueur du tronçon a été sélectionnée en fonction des pratiques de resurfacement actuelles sur autoroute.

1.3.1 Structure et état du tronçon

Les 10 km du tronçon sélectionnés présentent une homogénéité structurelle, représentée sur la Figure 81. En 2017, le revêtement a 15 ans, soit un an de plus que la moyenne du parc autoroutier de Cofiroute. D'autre part, la chaussée a 37 ans. C'est donc un tronçon à reconstruire, et l'on souhaite savoir comment réaliser l'entretien après reconstruction sur la durée de vie de chaussée.

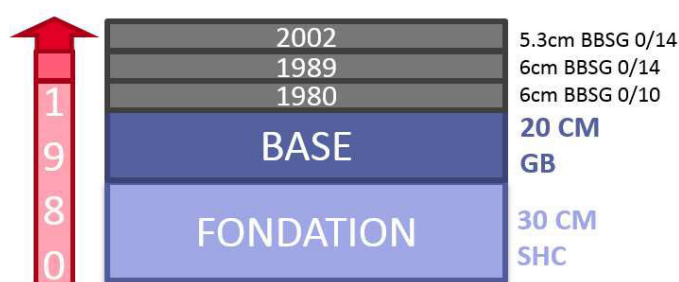


Figure 81 Structure du tronçon étudié

1.3.2 Données de trafic

Nous avons obtenu les données de trafic de l'autoroute pour l'année 2014. Ces données sont indiquées dans le Tableau 96. Le tronçon est parcouru par environ 85% de VP, 4% de VUL et 10% de PL.

Tableau 96 Données de trafic de l'autoroute pour l'année 2014

Catégorie de péage	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4	
Classe de véhicule de notre méthode	VP	VUL	Petit PL (2 essieux)	Gros PL (3 essieux et plus)	TOTAL
TMJA (veh/j)	9158	434	123	1013	10728
Parts (%)	85%	4%	1%	9%	100%

Les données de trafic sont obtenues à partir de la comptabilisation des paiements de péage. L'appariement entre les classes tarifaires de péage en France et les différentes catégories de véhicules définies dans notre modèle est aisé dans la mesure où le péage de classe 1 correspond aux véhicules de tourisme, celui de la classe 2 aux VL de hauteur totale supérieure à 2m et inférieure à 3m (soit uniquement les grands utilitaires + les caravanes), celui de la classe 3 aux PL à 2 essieux, et celui de la classe 4 aux PL à 3 essieux ou plus³⁸¹. Cela correspond bien aux 4 catégories de véhicules de notre méthode : VP, VUL, petits PL et gros PL. Nous considérerons donc dans nos calculs une composition du trafic fixe sur la durée de vie de chaussée, soit 85% de VP, 5% de VUL, 1% de petits PL et 9% de gros PL.

2 Opérationnalisation autoroutière de la méthode

Nous appliquons la méthode présentée dans le chapitre précédent dans sa version « autoroutière » au tronçon choisi, afin d'en sortir des éléments sur le bon niveau d'investissement en resurfacement à y injecter sur durée de vie de chaussée. Pour cela, nous devons paramétrer notre modèle en fonction des spécificités du tronçon routier étudié. Nous présentons ce processus de paramétrage par bloc architectural de l'algorithme développé (cf. chapitre 4).

2.1 Définition du système de référence

Selon l'architecture de la méthode que nous avons développée, la première étape pour comparer des programmes d'entretien est la définition du système de référence, soit du tronçon routier et de ses caractéristiques à l'instant t0 de l'évaluation. Le type de réseau à choisir est évidemment un réseau autoroutier (RA) : cela génère des spécificités pour les véhicules en termes de vitesses pratiquées, de consommations, d'émissions, et de lois de sensibilité à l'IRI. La géométrie de chaussée étudiée est constituée de 2 voies (1 seul sens) de 10.54 km de long. Les données d'IRI utilisées le sont au pas de 10m, avec deux données par point d'abscisse, soit des données « bi-traces » relevées dans chaque bande de roulement de la voie lente, puis moyennées.

Les données de Cofiroute donnent un TMJA d'environ 10 000 véhicules/jour.sens, de composition 89.4% VL et 10.6% PL, avec 85.4% de VP, 9.44% de GPL (i.e. PL à partir de 3 essieux), 4.05% de VUL et 1.15% de PPL. L'évolution du trafic au cours du temps est choisie selon la moyenne temporelle des taux les plus récents relevés sur les réseaux de Cofiroute qui s'élève à environ +0.44%/an³⁸². Nous considérons une augmentation identique pour les quatre classes de véhicules et stable sur la durée de vie de la chaussée considérée, ce qui nous permet de calculer notre trafic en année 1 correspondant à 2017.

³⁸¹ <http://www.autoroutes.fr/FCKeditor/UserFiles/File/ASFA%20CLASSE%20VEHICULE%20BD.pdf>

³⁸² <http://www.vie-publique.fr/actualite/alaune/transport-routier-hausse-circulation-mais-baisse-emissions-co2-20140814.html> : augmentation du trafic routier des VP entre 2008 et 2014. L'évolution PL est moins rapide, l'évolution VUL l'est plus.

2.2 Scénarisation : programmes de resurfaçage testés

2.2.1 Théorie de la scénarisation

La scénarisation en évaluation des politiques publiques est une pratique largement diffusée (Meadows et Club of Rome 1972; T. Wang, Lee, Kendall, et al. 2012; Quirion 2013), pratique soutenue par une théorisation académique. Par exemple, Börjeson et al. (2006) différencient trois grands types de scénarii : prédictifs, exploratoires, et normatifs. Nous établirons des scénarios qui se veulent soit prédictifs soit exploratoires. L'essentiel des scénarios sera prédictif du sous genre « pronostic » dans la mesure où l'on s'appuie sur des évolutions tendancielle qui se veulent les plus probables possibles (exemple : projections du parc roulant français). On pourra considérer que certains scénarios sont plutôt exploratoires dans la mesure où leur probabilité est physiquement assez faible : réduire très fortement l'investissement routier pourrait mener à des atteintes structurelles si fortes qu'elles rendraient l'utilisation de la chaussée impossible sur sa durée de vie. À l'inverse, une augmentation très fortement de l'investissement en entretien est peu probable, pour des raisons à la fois financières et de gênes à l'usager parfois plus impopulaires qu'utilitairement néfastes.

2.2.2 Scénarios de resurfaçage

On considère une chaussée neuve mise en service au 1er janvier 2017³⁸³. On compare ensuite cinq programmes d'entretien très différents.

Nous choisissons d'évaluer les conséquences de 5 programmes de resurfaçage différents sur une durée de vie empirique de chaussée de 39 ans. Notre périmètre d'évaluation ne comprend ni la construction de la couche de surface initiale en 2017, ni la reconstruction de la chaussée nécessaire après 39 ans puisque l'on considère que toute chaussée devra être refaite, dont la couche de surface.

Les cinq scénarios évalués, dont les caractéristiques principales sont décrites dans le Tableau 97, sont les suivants:

- « Invest_Min » – Scénario « Investissement minimal » : on refait la couche de surface 1 fois en 39 ans, soit tous les 19 ans et 6 mois
- « REF » – Scénario de référence, ou parfois appelé « Business-as-usual » : on refait la couche de surface 2 fois durant les 39 ans, soit tous les 13 ans
- « Invest+ » – Scénario « Investissement accru » : on refait la couche de surface 3 fois en 39 ans, soit tous les 9 ans et 9 mois
- « Max_Terrain » – Scénario « Pratiques ambitieuses », ou périodes de resurfaçage les plus courtes observées sur réseau autoroutier français : on refait la couche de surface 4 fois en 39 ans, soit tous les 7 ans et 10 mois
- « Invest_Max » – Scénario « Investissement maximal » : on refait la couche de surface 6 fois en 39 ans, soit tous les 5 ans et 7 mois

Tableau 97 Caractéristiques des 5 programmes d'entretien testés sur la durée de vie de chaussée du tronçon étudié

Code du scénario	Détail	Nombre de resurfaçages	Durée de vie de surface
Invest_Min	Investissement minimal	1	19 ans et 6 mois
REF	Scénario de référence	2	13 ans
Invest+	Investissement accru	3	9 ans et 9 mois
Max_Terrain	Pratique ambitieuse	4	7 ans et 10 mois
Invest_Max	Investissement maximal	6	5 ans et 7 mois

³⁸³ Une telle date de mise en service est improbable puisque les travaux routiers ont lieu à la belle saison. C'est toutefois une date pratique pour les calculs, de nombreuses données du modèle étant annuelles, telles les données économiques de l'INSEE par exemple, les données de trafic, etc.

La durée de vie de 39 ans choisie pour la structure de chaussée s'appuie sur trois constats :

- les chaussées autoroutières concédées sont généralement dimensionnées pour la durée de la concession.
- Ces concessions duraient souvent 30 ans en France, avant prolongations contractuelles.
- On constate sur le terrain des durées de vie de chaussées plus longues que celles prévues par les outils de dimensionnement.

Sur ce dernier point, les logiciels de dimensionnement comme Alizé prennent des coefficients de sécurité, dont on peut observer l'effet sur les réseaux routiers français. Selon les experts techniques en patrimoine routier, sur le réseau du concessionnaire partenaire de l'étude de cas, les chaussées des années 1980 ont 28-38 ans et sont en état de structure excellent. Les chaussées des années 1970 ont 38-48 ans et sont structurellement encore correctes.

2.3 Objectif de l'étude, périmètre et unité fonctionnelle

L'objectif de l'étude est de calculer la performance durable de ces scénarios d'entretien, en incluant les conséquences de l'interaction chaussée-véhicule. Les frontières du système comprennent donc les travaux d'entretien, mais aussi leurs conséquences sur les consommations et l'usure des véhicules.

À partir de ces scénarios, l'étude de cas répondra à trois questions portant sur le resurfacement autoroutier:

- Quels sont les impacts de ces différentes politiques d'entretien ?
- quelles parties prenantes bénéficient d'un investissement accru de l'entretien des couches de surfaces routières, et dans quelle mesure?
- Quid au contraire du bilan avantage/inconvénient par acteur lors d'une contraction des budgets d'entretien?

La fonction étudiée est le resurfacement, et l'unité fonctionnelle de notre évaluation est un tronçon de 10.54 km d'autoroute française supportant un trafic de 10728 véhicules.jour à l'année T0, en hausse de +0.44%/an, sur une durée de vie de 39 ans. Tous les résultats donnés dans ce chapitre le sont pour cette unité fonctionnelle.

2.4 Paramétrage du calcul

2.4.1 Gestion des travaux

Comme toujours sur réseau autoroutier en France, les travaux sont réalisés sous réduction de voie :

- soit par basculement : on resurface en pleine largeur pour éviter les joints longitudinaux et on partage la chaussée du sens opposé,
- soit par fermeture d'une partie des voies d'un sens : on réduit le nombre de voies sur le sens resurfacé.

On considère que les travaux sont réalisés de jour – les voies en travaux étant également fermées la nuit – et que la vitesse des automobilistes est réduite à 90 km/h. Ces travaux ne provoquent pas d'embouteillage du fait du faible trafic sur l'autoroute. Les PL ne sont donc pas concernés par la perte de vitesse et le calcul est simplifié, puisqu'il ne concerne que les VL.

Les rendements de resurfaçage, en BBTM ou BBM, sont très variables selon le type et le nombre d'engins utilisés, ainsi que l'organisation des travaux (travail jour, nuit, 3x8). Dans TRACC-Expert, on considère généralement un rendement des engins de chantier de 7000m² par jour. Sur autoroute, on peut considérer une cadence moyenne de 800m/jour en pleine largeur.

2.4.2 Loi d'évolution de l'IRI et effet du resurfaçage

L'ensemble des calculs d'impact de la méthode se base sur des données d'état de surface du tronçon routier à étudier. Aussi, à partir de données d'IRI de terrain fournies par l'entreprise d'auscultation VECTRA, nous souhaitons calculer le profil de surface de la chaussée au cours du temps. Ces données sont « bi-trace », i.e. il nous a été fourni deux relevés par sens : les données d'IRI en trace gauche et en trace droite uniquement pour la voie lente, i.e. bandes de roulement correspondant aux plus fortes densités de roulage sur la voie lente (balayage transversal).

Après chaque construction ou resurfaçage, nous commençons par calculer l'IRI en moyennant la note en trace gauche et en trace de droite pour obtenir un IRI moyen de la voie en année 1. Ensuite, on calcule l'évolution de l'IRI sur toute la durée de vie de la chaussée : évolution hors travaux et évolution avant/après travaux.

Entre deux resurfaçages, hors travaux donc, on considère une évolution de l'IRI à un rythme de +0.05 m/km.an, en s'appuyant à la fois sur notre étude bibliographique et sur les données d'IRI de l'autoroute entière dont nous étudions un tronçon.

Nous nous intéressons par ailleurs à l'effet des travaux de resurfaçage sur l'IRI. Pour cela, nous avons procédé au calage de la loi américaine définie par Wang et al. (2013) à l'aide des données d'IRI de l'autoroute entière à laquelle appartient notre tronçon d'étude. La Figure 82 relie l'IRI après resurfaçage à l'IRI avant resurfaçage. Notre échantillon montre des niveaux d'IRI assez bas, qui restent cohérents avec la cadence élevée de resurfaçage de l'autoroute (en moyenne tous les 13-14 ans). Sur la Figure 82, nous avons placé deux points : celui de l'IRI moyen de l'autoroute en début et en fin de vie des tronçons autoroutiers. L'IRI atteint en moyenne 0.7-0.8 m/km en fin de vie de surface (étoile bleue uniforme), et redescend après resurfaçage à 0.4 m/km (étoile bleue au contour foncé).

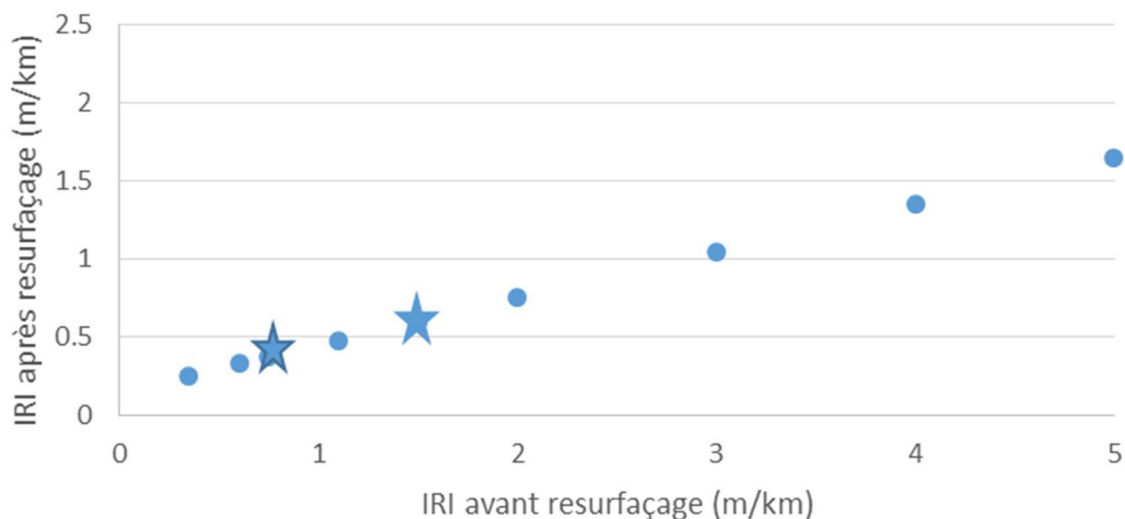


Figure 82 Effet des travaux de resurfaçage sur l'état de surface autoroutière avec les paramètres de calage sélectionnés

Notre modèle de dégradation d'état de surface se comporte de la manière montrée sur la Figure 83. On voit que le modèle tend à gommer les variations ponctuelles naturelles de l'IRI sur le tronçon autoroutier : minima et maxima annuels se rapprochent après chaque resurfaçage. Ce phénomène n'est pas réaliste : l'écart-type moyen des données d'IRI sur le jeu de données de l'opérateur est de 0.47 (trace gauche) et 0.49 (trace droite) sur l'autoroute dont on évalue un tronçon, et après simulation

cet écart-type moyen chute à 0.07 après reconstruction originelle (2017), à 0.02 après le premier resurfaçage (2030), et à 0.006 après le second et dernier resurfaçage (2043). Cependant, les lois de surconsommation et sur-usures étant linéaires (ou se comportant quasiment linéairement) sur les niveaux d'IRI considérés, et l'écart-type « naturel » étant faible (< 0.5 m/km), le fait de ne considérer qu'une moyenne (puisque l'écart-type devient extrêmement faible) ne devrait engendrer qu'une très faible erreur sur les résultats obtenus. D'autre part, le niveau d'IRI augmente bien au cours de l'itération des cycles, ce qui est tout à fait pertinent, mais nous restons à une moyenne d'IRI en fin de vie d'environ 1.2 m/km, ce qui reste cohérent, bien que plus élevé que ce qui est montré par les données de terrain obtenues.

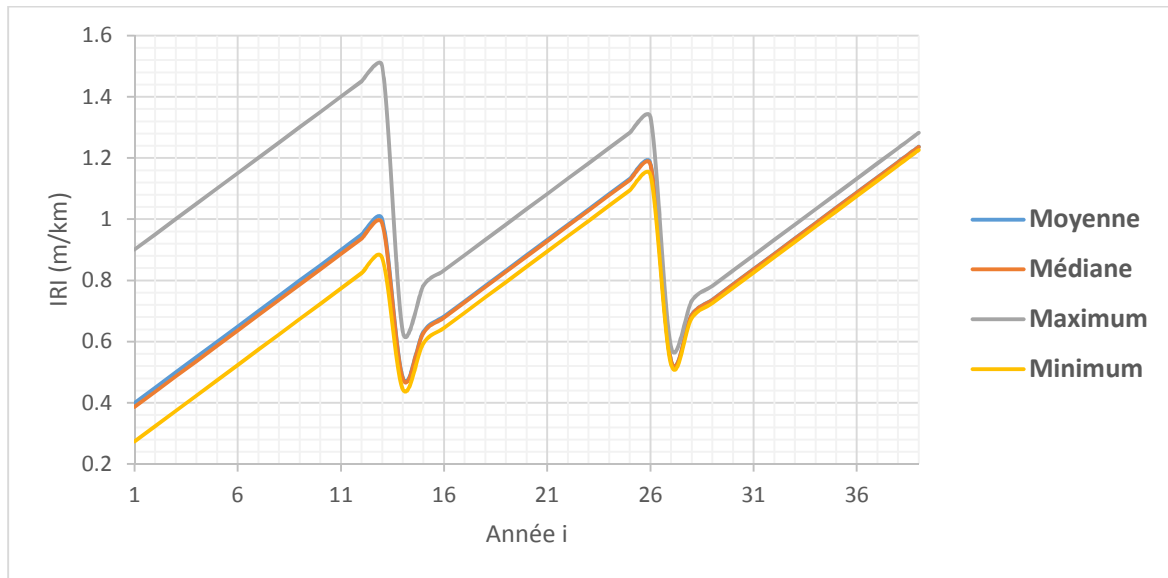


Figure 83 Valeurs moyenne, médiane, maximum et minimum de l'IRI des sous-trançons autoroutiers, simulées au cours de la durée de vie (ans) pour un entretien standard sur autoroute en France

2.4.3 Valeurs de paramètres divers

On considère les nombres moyens de roues par véhicule suivants: 4 roues pour les VL et PPL, 10 roues pour les GPL. L'IRI moyen considéré pour les calculs de surconsommation de carburant est de 0.77 m/km sur autoroute. Les densités de carburant sont considérées égales à 0.85 pour le diesel et 0.75 pour l'essence. La technique de base considérée sur RA est le BBTM, qui est le principal revêtement que l'on retrouve sur ce type de chaussées.

Les taux d'actualisation par défaut des différents acteurs considérés sont les suivants : 2.5% pour la société, 1% pour l'État et les ménages, et 8% pour Cofiroute. Le taux de rentabilité dans les contrats de plan de Cofiroute est actuellement de 8.28%³⁸⁴. Le taux d'inflation considéré pour les travaux routiers est calé sur les tendances de l'Indice des Prix à la Consommation depuis 1966 de l'INSEE – soit 1.4%, à défaut de tendances nettes sur les travaux routiers ou même le BTP. Celui pour le coût de l'entretien des véhicules en garage est pris égal à 6%, selon la régression linéaire réalisée sur les séries temporelles de taux d'inflation mensuel de l'INSEE entre 1998 et 2015. Pour obtenir le prix de base des travaux routiers, on défalque 20% de TVA sur les prix TTC, ainsi que 8% de marge, selon les données concernant la branche génie civil obtenues de l'INSEE.

Les indicateurs de bruit physique et sanitaire sont calculés selon la méthode « générique » basée sur les facteurs de caractérisation développés par Meyer (2017).

³⁸⁴ ROCE 2013 groupe VINCI : 9.3% (<http://www.analyse-sectorielle.fr/2012/03/rentabilite-economique-roce-return-on-capital-employed/>)

2.5 Calcul numérique et données complémentaires

2.5.1 Environnement de calcul

Les calculs de cette étude de cas ont été réalisés à l'aide de Scilab. Scilab est une alternative libre au logiciel payant Matlab³⁸⁵. Logiciel multiplateforme, il fournit un environnement adapté pour des applications scientifiques et possède un langage de programmation orienté calcul numérique de haut niveau. Il est particulièrement bien adapté aux calculs matriciels et à l'algèbre linéaire.

2.5.2 Choix et discussion des données macroéconomiques

2.5.2.1 Données de production

Les TES mis à disposition du public par l'INSEE proposent actuellement une discrétisation en 17 ou 38 branches d'activité entre 1949 et 2014. Évidemment, une forte agrégation des activités ne permet pas une modélisation macroéconomique très fine. Nous avons obtenu de la part du Département des Comptes Nationaux de l'INSEE trois types de tableaux pour les années 2010 à 2013, avec une désagrégation en 138 branches et produits. Le tableau d'équilibre ressources-emplois (ERE) quantifie pour chaque produit les effets de l'importation (total d'importations, droits de douane, ajustement territorial, subventions, marges de transport et de commerce) ainsi que les taxes et impôts. Il informe également sur l'aspect de marché (stocks et placements). Le tableau des Entrées Intermédiaires (TEI) indique les consommations intermédiaires de chaque branche en produit. Il est souvent rectangulaire, car une branche peut produire plusieurs produits, et présente des prix de base, i.e. le prix facturé par le producteur augmenté d'une éventuelle subvention et diminué des impôts sur chaque produit. Les productions du TES sont indiquées aux prix de base (i.e. montant que le producteur reçoit de l'acheteur par unité de bien ou de service produite, diminué des impôts sur les produits et augmenté des subventions sur les produits. Le prix de base exclut les frais de transport facturés séparément), en euros courants (€2010 à €2013). Dans cette modélisation, on considérera la matrice des coefficients techniques obtenue avec les données économiques les plus récentes, soit celles de l'année 2013. Nous considérons que cette matrice est stable, ce qui est évidemment approximatif, notamment à long terme. Enfin, nous ferons nos calculs en euros courants.

2.5.2.2 Données d'emploi

Les données relatives à l'emploi obtenues de l'INSEE sont la table du contenu en emploi intérieur par branche en milliers de personnes Équivalent Temps Plein sur un an (ETP.an) de l'économie en 88 branches pour l'année 2013. Selon les conseils des experts de l'INSEE, on postule que le contenu en emploi dépend linéairement de la VA de la même sous-branche dans la comptabilité en 138 branches – données auxquelles nous avons aussi eu accès par le biais de l'INSEE – afin de ventiler le contenu en emplois en 88 branches dans les 138 branches. L'obtention de vecteurs de mêmes dimensions est évidemment nécessaire pour effectuer le calcul. Notons au passage que nous avons obtenu un contenu en emploi respectivement de 16.4, 14.4 et 7.2 ETP.an par million d'euros de demande hors taxe pour l'entretien en garage, l'entretien des routes, et la demande en carburant. Ces chiffres sont plutôt cohérents avec la littérature, Quirion (2013) avance notamment 16 ETP.an/M€HT de demande d'entretien en garage. En revanche, il n'avance que 2.5 ETP.an/M€HT pour le raffinage du pétrole. Les opérations en aval du raffinage dans la chaîne de production (transport, manutention, distribution) expliquent sans doute les 5 ETP.an/M€HT supplémentaires trouvés dans notre approche, puisque ces emplois sont principalement domestiques à la différence des opérations en amont. Enfin, le rapport Quinet trouvait 9.2 ETP.an/M€HT, dont 5 ETP.an/M€HT en emplois directs et 4.2 ETP.an/M€HT en emplois indirects pour la demande en infrastructures de transport. Nous obtenons 4.3 ETP.an/M€HT en emplois directs et 10.1 ETP.an/M€HT en emplois indirects. La différence entre les deux chiffres

³⁸⁵ Il existe d'ailleurs un traducteur Matlab => Scilab, et Scilab a été développé sur la base de Matlab dans les années 1980

réside donc principalement dans l'effet indirect (X2.5 dans notre cas). Nous n'avons pas trouvé les données utilisées par la commission Quinet, mais nous pouvons supposer que la différence provient soit de l'actualisation des données (plus récentes dans notre modèle) soit par une discrétisation plus fine des résultats, puisque nous avons utilisé la plus fine discrétisation faite par l'INSEE en France (données non publiques).

3 Résultats et discussion

Nous expliquons ici comment sont réalisés les calculs de l'étude de cas, avant de présenter et d'interpréter les résultats, puis de les discuter. Rappelons que ces résultats sont relatifs à l'unité fonctionnelle définie précédemment (voir 2.3) : les effets consécutifs du resurfaçage d'un tronçon autoroutier de 10.54km sur 39 ans. La visualisation des résultats obtenus avec une méthode multicritère peut faire l'objet de discussion. Plusieurs types de visualisation sont classiquement utilisés en ACV : principalement les diagrammes radar, les histogrammes, les diagrammes circulaires ou diagramme en secteurs et les tableaux (Sala et Andreasson 2018). Les méthodes d'évaluation quantitatives pour le développement durable sont plus rares et choisissent principalement de comparer des solutions sous forme de diagrammes radars utilisant des résultats normalisés qui gommant l'intensité de l'impact mais mettent en évidence les gains relatifs pour chaque indicateur de durabilité (Knoepfel et Münster 2004; Cherqui 2005; Gobin et Chevallier 2012). La question de la visualisation de tels résultats et des biais cognitifs engendrés est un sujet à part entière qui pourrait faire l'objet d'un travail de thèse en sciences humaines et sociales. Nous nous contenterons de jongler entre les différents types d'illustration, en prenant soin de choisir le type nous semblant le plus adapté et le plus clair, aucune représentation n'étant idéale pour représenter quantitativement des résultats d'impacts variés sur une même figure. Notons également que les lissages continus des résultats discrets parfois présentés sont des propositions présentant des erreurs évidentes générées par le lissage, mais ces présentations permettent d'intuiter des tendances qu'il conviendrait de vérifier par des simulations supplémentaires.

3.1 Performance des scénarios de resurfaçage : niveaux d'impact absolus

La Figure 84 présente sous forme de diagramme radar la comparaison holistique des impacts des cinq différents programmes d'entretien sur la durée de vie de la chaussée autoroutière étudiée. Ces niveaux d'impact (ou impacts) sont qualifiés d'« absolus » par différence avec l'approche marginale qui suivra, sans lien avec le concept de limites planétaires. Le code couleur/graphique a été choisi de manière à indiquer la référence en trait continu le plus foncé, puis les 4 programmes d'entretien alternatifs sont présentés du plus clair au plus foncé de l'investissement le plus faible à l'investissement le plus élevé avec des traits pointillés dont la taille augmente à mesure que l'investissement augmente également. Les impacts sont normalisés par rapport au niveau des impacts de la programmation d'entretien de référence (i.e. resurfaçage tous les 13 ans) : ses impacts valent donc 1 sur tous les indicateurs.

On remarque que les programmes d'entretien étudiés se différencient particulièrement en termes de dépenses du gestionnaire routier et d'impact sanitaire du bruit de la route. Sur les autres impacts, on voit que l'influence de l'entretien reste assez marginale relativement au niveau des impacts rattachés à l'entretien moyen effectué aujourd'hui sur les autoroutes françaises. Deux phénomènes expliquent cela. D'abord, l'évaluation absolue tient compte des consommations côté véhicules et de leurs impacts sur les indicateurs : on sait par exemple que sur le cycle de vie environnemental, l'impact de la consommation du carburant est bien plus important que celui de la construction ou de l'entretien de la chaussée (De Bortoli 2014). Ensuite, la normalisation mathématique des résultats a pour effet de masquer l'importance des effets obtenus. Aussi, on devra plutôt adopter une approche marginale ou consécutif, i.e. se poser la question des gains et pertes obtenus en faisant varier les programmes d'entretien, ce à quoi nous allons nous intéresser maintenant.

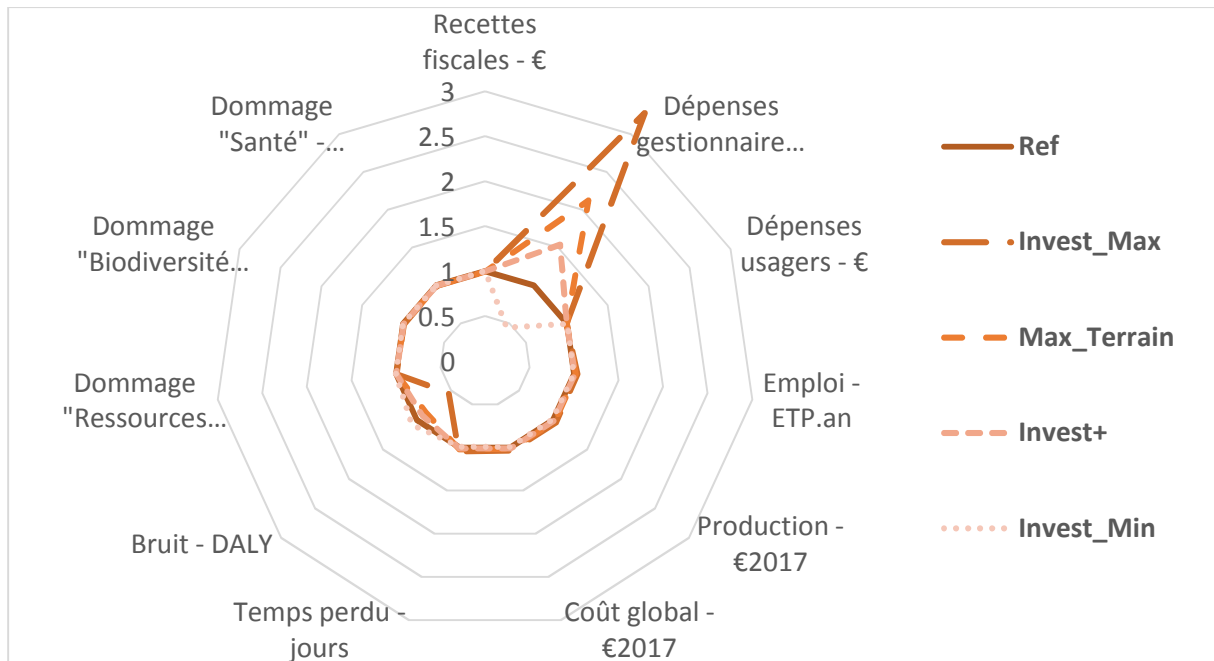


Figure 84 Comparaison holistique des impacts des différents programmes d'entretien sur durée de vie de chaussée après normalisation à la référence

3.2 Approche marginale : avantages des programmes d'entretien alternatifs

3.2.1 Présentation des résultats holistiques

La Figure 85 s'attache à représenter les gains apportés par une modification du programme, par rapport aux pratiques de resurfacement actuelles des autoroutes en France. Elle présente les gains de chacun des quatre programmes d'entretien alternatifs sur les onze indicateurs d'impact.

Encore une fois, plus la couleur des barres d'historgramme est foncée, plus le programme d'entretien qu'elle représente nécessite un niveau d'investissement élevé.

Ce diagramme met en évidence deux catégories d'indicateurs d'impact qui ne se comportent pas de la même manière en fonction du niveau d'investissement en entretien : deux tiers des indicateurs présentent des bénéfices d'autant plus importants que l'on augmente l'investissement en entretien, tandis qu'un tiers des indicateurs présente des pertes d'autant plus élevées que l'investissement est fort.

Le premier lot se compose d'indicateurs macroéconomiques, environnementaux, et en partie sociaux : économies pour les usagers, emploi en France, production nationale, réduction de l'impact sanitaire lié au bruit, économies de ressources non renouvelables, sauvegarde de la biodiversité, et protection de la santé publique.

Le second lot d'indicateurs inclut trois indicateurs financiers et un indicateur social : recettes fiscales, économies pour le gestionnaire, économie globale pour la société, et temps gagné par l'utilisateur.

Pour un entretien routier durable

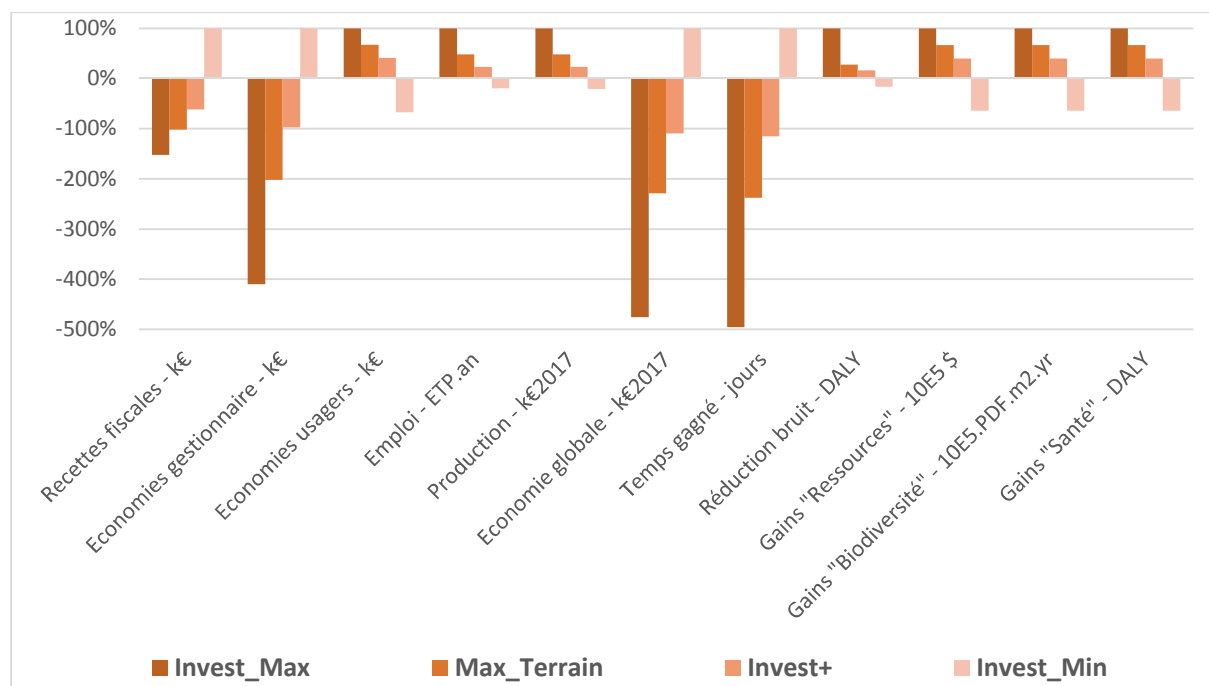


Figure 85 Avantage à choisir la variante par rapport au programme de référence (normation mathématique par les gains maximums)

Pour le premier lot composé de sept indicateurs, les gains générés par un programme d'entretien alternatif sont d'autant plus importants que l'investissement en entretien est élevé. Dans le cas d'une division par deux de l'investissement en entretien par rapport aux pratiques actuelles, on voit apparaître des pertes dont la valeur absolue est :

- au moins égale aux gains engendrés en augmentant de 50% les budgets d'entretien actuels (économies de ressources non renouvelables)
- au plus équivalente au niveau des gains engendrés en doublant les budgets d'entretien (économies pour les usagers, économies en ressources non renouvelables, préservation de la santé publique)

Pour le second lot composé de 4 indicateurs, au contraire, plus l'investissement en entretien des routes est élevé, plus la perte est forte. L'importance de la perte (en valeur absolue) liée au triplement de l'investissement en entretien routier dépasse même les gains provoqués par une division par deux des budgets d'entretien pour l'ensemble des 4 indicateurs concernés.

Tableau 98 Valeurs des gains financiers et économiques apportés par un changement de programmation d'entretien

scenario	Recettes fiscales (k€)	Economies gestionnaire (k€)	Economies usagers (k€)	Emploi (ETP.an)	Production (k€2017)	Economie globale (k€2017)
Invest_Max	-1.06E+03	-1.64E+03	3.21E+03	4.24E+01	8.83E+03	-2.13E+03
Max_Terrain	-7.10E+02	-8.07E+02	2.16E+03	2.03E+01	4.25E+03	-1.02E+03
Invest+	-4.31E+02	-3.88E+02	1.32E+03	9.75E+00	2.06E+03	-4.90E+02
Invest_Min	6.96E+02	3.99E+02	-2.16E+03	-8.35E+00	-1.82E+03	4.47E+02

Tableau 99 Valeurs des gains sociaux et environnementaux apportés par un changement de programmation d'entretien

scenario	Temps gagné (jours)	Réduction du bruit (DALY)	Gains "Ressources" (\$)	Gains "Biodiversité" (PDF.m ² .yr)	Gains "Santé" (DALY)
Invest_Max	-1.15E+03	1.79E+00	1.20E+08	4.80E+08	7.69E+03
Max_Terrain	-5.52E+02	5.00E-01	7.96E+07	3.19E+08	5.12E+03
Invest+	-2.67E+02	2.92E-01	4.78E+07	1.92E+08	3.08E+03
Invest_Min	2.32E+02	-2.91E-01	-7.67E+07	-3.08E+08	-4.95E+03

Les niveaux de gains quantitatifs sont présentés dans le Tableau 98 pour les indicateurs financiers et économiques et dans le Tableau 99 pour les indicateurs sociaux et environnementaux. Ces tableaux montrent que tripler le niveau actuel d'investissement en entretien des couches de surface autoroutières, sur l'exemple étudié et avec nos paramètres de base, permettrait des gains s'élevant à 3.21 M€ pour les usagers, 42 ETP.an sur le territoire national, près de 9 M€2017 en production française, près de deux années de vie équivalentes grâce à l'amélioration de l'environnement sonore des riverains au tronçon autoroutier, et enfin des économies de 120 millions de dollars en raréfaction des ressources non renouvelables, de 480 millions PDF.m².an en biodiversité, et de près de 7 700 années de vie équivalentes grâce aux moindres pollutions. Les gains environnementaux obtenus en augmentant l'entretien sont liés aux économies de consommations véhiculaires sur route mieux entretenue. En revanche, ce triplement de budget d'entretien ferait perdre un million d'euros en recettes fiscales, 1.64 M€ au gestionnaire routier, 2.13 M€ à la société, et un temps perdu cumulé de 3.15 ans aux usagers.

Au contraire, diminuer par deux l'investissement en resurfacement autoroutier sur le tronçon de 10 km étudié sur 39 ans ferait perdre 2.16 M€ aux usagers, 8.4 ETP.an en France et 1.82 M€2017 de production nationale, coûterait l'équivalent de 0.3 années de vie humaine en dégradation de l'environnement sonore, 77 millions de dollars de ressources non renouvelables, 308 millions de PDF.m².an, et 4 950 années de vie humaines. En contrepartie, cette décision permettrait de collecter 0.70 M€ de taxes supplémentaires pour l'État, d'économiser 0.40 M€ pour les gestionnaires, de gagner presque 8 mois de temps cumulé pour les usagers, et d'économiser pour la société 0.45 M€.

On peut également comparer les gains apportés par une modification des programmes d'entretien sous forme de diagramme radar, comme présenté sur la Figure 86. Cette figure montre, par rapport à des gains et pertes nuls pour le scénario de référence en noir, comment pour chaque indicateur le niveau d'investissement impacte le développement durable. De manière synthétique, cette représentation montre une performance durable d'autant plus grande que l'aire comprise dans la courbe relative au scénario d'investissement est importante. Quand le niveau de gain passe à l'intérieur du cercle noir, le programme est néfaste à la performance (i.e. situation de perte). Plus la courbe s'éloigne vers l'extérieur du cercle noir, plus le niveau de gain est important. Toutefois, cette représentation ne nous semble pas la plus intuitive, car elle ne met pas clairement en évidence les gains et les pertes comme le fait un histogramme normé.

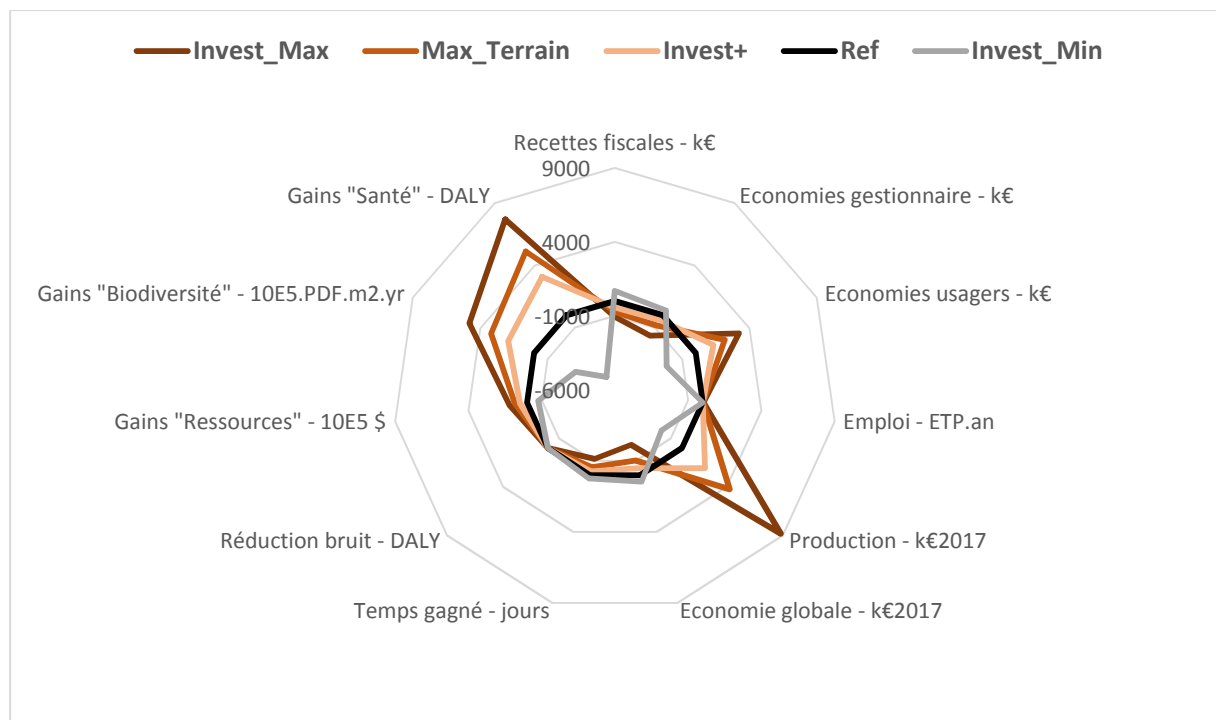


Figure 86 Représentation sous forme de diagramme radar des gains par modification du niveau d'investissement en entretien routier pour les 4 scénarios alternatifs

Après cette évaluation portée sur l'ensemble des indicateurs de performance durable des politiques d'entretien routier, nous proposons des focus financiers qui mettront en perspective l'importance de l'entretien routier et d'un système fiscal repensé vers un optimum financier pour la société.

3.2.2 Focus financier

3.2.2.1 Approche pour deux groupes d'acteurs

La Figure 87 représente l'histogramme des économies réalisées en kiloeuros grâce à une modification du programme d'entretien typique du tronçon d'autoroute pour deux groupes d'acteurs : le groupe {SCA + usagers} en bleu, et le groupe {SCA + usager + État} en orange. Cet histogramme montre que, pour le groupe {SCA + usagers}, chacun gardant son propre taux d'actualisation pour calculer le bilan de ses dépenses sur 39 ans, les économies globales réalisées pour le groupe sont d'autant plus importantes que l'investissement supplémentaire est important. Une réduction par deux de l'investissement provoque au contraire une perte financière aussi importante que le gain engendré par le triplement des budgets actuels. Pour le groupe {SCA + usagers + État}, chacun gardant toujours son propre taux d'actualisation, une augmentation des budgets par rapport à l'investissement actuel est également financièrement profitable au groupe, tandis qu'une baisse lui est néfaste. Notons néanmoins que le meilleur scénario alternatif du point de vue financier parmi ceux testés correspond à la pratique actuelle la plus ambitieuse sur autoroute, soit un resurfaçage tous les 8 ans.

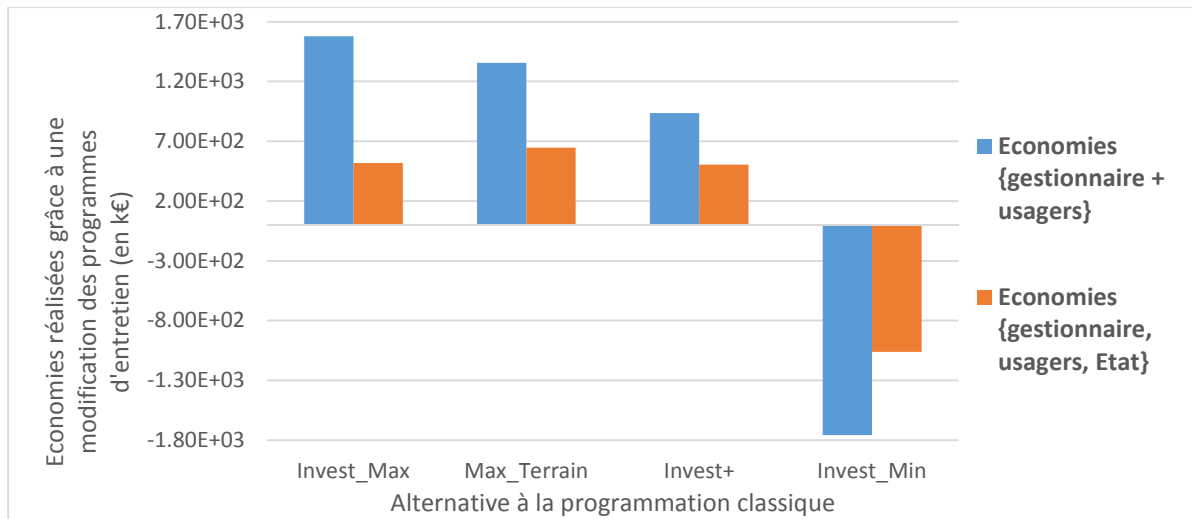


Figure 87 Économies réalisées (en k€) grâce à une modification du programme d'entretien typique pour deux groupes d'acteurs : le gestionnaire et les usagers en bleu, le gestionnaire, les usagers et l'État en orange

Ensuite, on pourra se questionner sur un optimum financier de fréquence de resurfacement sur un intervalle de fréquences continues.

3.2.2.2 Gain financier marginal des groupes d'acteurs selon la durée de vie de surface

La Figure 88 propose une représentation continue par lissage des économies discrètes apportées par une modification de la durée de vie de surface, pour les groupes {SCA + usagers} (en bleu) et {SCA + usagers + État} (en orange), afin de mettre en évidence des « fenêtres » d'optima et l'évolution des gains ou pertes marginales en fonction de l'investissement. Le lissage est forcément incertain, et on remarque l'erreur apportée notamment par les gains nuls qui devraient se situer à abscisse égale à 13 ans.

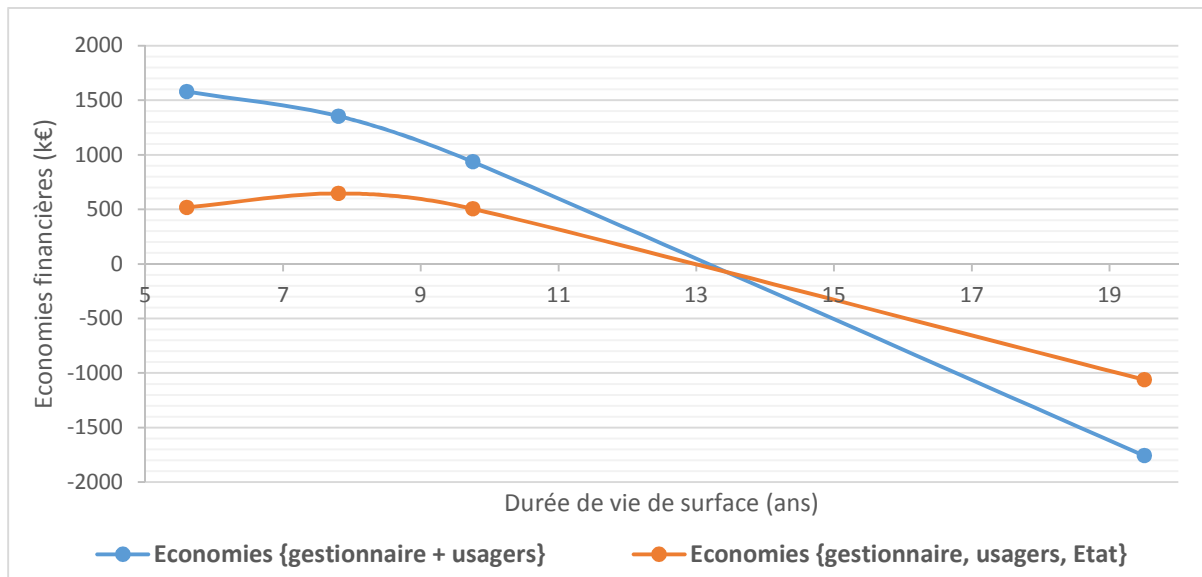


Figure 88 Gains financiers de deux groupes d'acteurs selon la durée de vie des surfaces autoroutières

On voit toutefois pour le premier groupe que les gains doivent être approximativement linéaires entre 10 et 20 ans de durée de vie de la surface, mais que la dérivée première des gains est plus faible en valeur absolue en-deçà d'une durée de vie de surface de 9 ans, i.e. que le gain marginal lié à une augmentation de l'investissement diminue. Néanmoins, pour ce premier groupe, l'optimum financier est situé en-deçà de 5 ans de durée de vie des revêtements. Le groupe comprenant tous les acteurs financiers présente un optimum financier global de durée de vie de surface compris entre 5.6 et 9.75

ans. Notons qu'il tient compte du système fiscal actuel, qui est une variable d'ajustement politique. En effet, la non linéarité du gain par rapport à l'investissement pour ce collectif à trois acteurs pourrait en partie s'expliquer par un système fiscal hétérogène (forte taxation des carburants, 20% de taxes sur l'entretien des véhicules, taxes considérées à 0% pour l'entretien routier).

3.2.2.3 Rentabilité financière de l'entretien

Cette constatation nous amène à étudier plus finement la rentabilité du resurfaçage sur ce tronçon autoroutier. Nous rappelons que le concept de rentabilité correspond aux profits réalisés divisés par les capitaux investis. C'est la capacité d'un investissement à procurer un bénéfice. Ici, les revenus obtenus sont en fait les économies réalisées par les usagers, et les capitaux investis correspondent au surcoût d'entretien pour le gestionnaire par rapport à la situation de référence, dans une approche globale. Cette approche est justifiée, pour une autoroute opérée par un concessionnaire privé qui fait payer le droit d'utilisation à l'utilisateur par un péage, dans la mesure où le péage pourrait être ajusté selon le niveau de service (négociation État-SCA).

Pour étudier la rentabilité du resurfaçage autoroutier, nous avons calculé le ratio des économies réalisées par les usagers sur la somme supplémentaire investie en resurfaçage par une SCA. Nous avons représenté cette rentabilité discrète par lissage continu selon le nombre de resurfaçages supplémentaires par rapport à la référence (i.e. 2 resurfaçages sur 39 ans) sur la Figure 89. Encore une fois, le lissage engendre des erreurs que l'on voit particulièrement par la courbe qui ne croise pas l'origine, mais cette représentation permet de faire apparaître une « zone optimale » de resurfaçage qui nous semble assez restreinte compte tenu des incertitudes probables sur les résultats, intrinsèques à la méthode.

Cette figure montre que chaque euro supplémentaire investi en entretien permet d'économiser environ entre 2 et 3.5 euros pour les usagers (respectivement pour 4 à 1 resurfaçage supplémentaire sur la durée de vie de chaussée). Du point de vue pratique, la rentabilité maximale sur cet exemple s'obtient en passant de 2 à 3 resurfaçages sur 39 ans, soit d'une durée de vie des surfaces de 13 ans à un peu moins de 10 ans. Cependant, mathématiquement, l'optimum pourrait être situé à un nombre de resurfaçage compris entre 2 et 4. Dans le cadran négatif en abscisses et en ordonnées, nous voyons qu'un 1€ économisé dans le scénario d'investissement minimum coûte 5.4 € aux usagers.

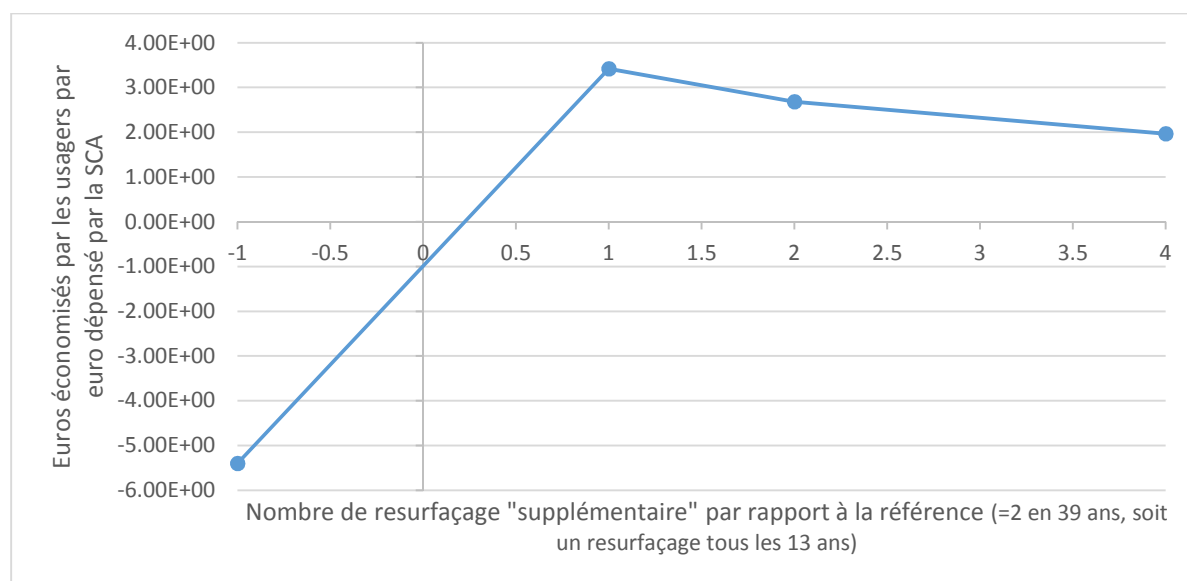


Figure 89 Euros économisés par les usagers par euro supplémentaire investi en entretien par une SCA selon le nombre de resurfaçages supplémentaires par rapport à la référence

3.2.2.4 Rentabilité sanitaire de l'entretien

La notion de rentabilité de l'entretien étudiée pour l'aspect financier peut être étendue au secteur de la santé publique. En effet, des valeurs de la vie statistique (VVS) sont utilisées dans les calculs d'évaluation socioéconomique classiques de certains gouvernements. En France, la commission Quinet proposait les valeurs tutélaires de 3 M€2010 pour la valeur de la vie statistique, et 115 000 €2010 pour la valeur de l'année de vie (voir Annexe 38). Le DALY est un équivalent d'une année de vie perdue. On peut donc, en équivalant un DALY à 115 000 €2010, calculer la rentabilité de l'investissement en resurfacement comme on l'a fait par rapport aux économies pour les usagers. Précisons que les calculs précédents ont été réalisés sur des sommes en monnaie courante. La VVS est donnée en monnaie constante. L'impact à la santé humaine est calculé dans notre méthode en DALY et sans aspect temporel, soit selon l'équivalent financier d'une monnaie constante également. À partir de la valeur moyenne de l'année de vie sur la période d'étude 2017-2056, moyennée entre les valeurs en monnaie 2017 et en monnaie 2056 actualisées avec un taux d'actualisation de 1%, soit 89 000 € environ³⁸⁶, on estime une « rentabilité sanitaire », soit la rentabilité en termes de santé publique mondiale de l'investissement en entretien des couches de surface routières de notre tronçon.

Il y a deux sources d'incertitudes particulières dans ce calcul : d'abord, certaines pollutions ont lieu en dehors de la France, comme celles liées à l'extraction du pétrole par exemple ou à la production des pneumatiques importés. Néanmoins, l'essentiel des gains ou pertes obtenus par modification des stratégies d'entretien routier dépendent comme nous l'avons vu de la consommation en carburant. Les impacts de la consommation de carburant sur la santé sont en partie portés par les riverains de la route, du fait de la pollution à l'échappement, mais également aussi en partie portés mondialement du fait de l'effet climatique. La seconde source d'erreur vient de la prise en compte de la densité autour des zones polluées localement : on a considéré de faibles densités de population pour les émissions à l'échappement, et conservé les densités de population choisies par EcoInvent pour le reste des procédés environnementaux. Il serait intéressant d'affiner les densités de population dans les zones d'émissions importantes afin d'affiner la quantification des dommages à la santé (et à la biodiversité). En particulier, affiner la densité de population prise en compte autour de la route et où les émissions d'échappement sont élevés nous paraît une bonne piste d'amélioration. Cela nécessite de comprendre la mécanique des méthodes de caractérisations, afin d'adapter les facteurs d'exposition³⁸⁷ ou les fractions ingérées³⁸⁸ comme par exemple dans le cas des PM dans le travail d'Humbert (2011).

Ce « retour sanitaire mondial » sur investissement en resurfacement autoroutier est bien plus élevé que la rentabilité financière. Nous avons représenté sur la Figure 90 le ratio des économies réalisées en termes de vies humaines monétarisées sur la somme supplémentaire investie en resurfacement par une SCA selon le nombre de resurfaçages supplémentaires par rapport à la référence (i.e. 2 sur 39 ans)³⁸⁹.

³⁸⁶ Il serait plus exact de faire un calcul annuel entre DALY et valeur de l'année de vie en euro courant cette année-là

³⁸⁷ « Fraction équivalente du milieu nigrée journallement par l'ensemble de la population (inhalation ou ingestion par voie orale » (Jolliet, Saadé, et Crettaz 2005)

³⁸⁸ « Fraction de l'émission d'un polluant dans l'environnement ingérée par la population » (Jolliet, Saadé, et Crettaz 2005)

³⁸⁹ À nouveau, on voit l'erreur de représentation engendrée par le lissage discutée précédemment, notamment avec la courbe ne croisant pas l'origine.

Cette figure montre que chaque euro supplémentaire investi en entretien permet d'économiser entre 420 et 710 euros de contrevalet en vie humaine (respectivement pour 4 à 1 resurfaçages supplémentaires sur la durée de vie de chaussée). La rentabilité maximale sur cet exemple s'obtient en passant de 2 à 3 resurfaçages sur 39 ans, soit d'une durée de vie des surfaces de 13 à un peu moins de 10 ans. Dans le cadran négatif en abscisses et en ordonnées, nous voyons qu'1€ économisé dans le scénario d'investissement minimum par rapport au scénario de référence coûte 1100 € en vies humaines.

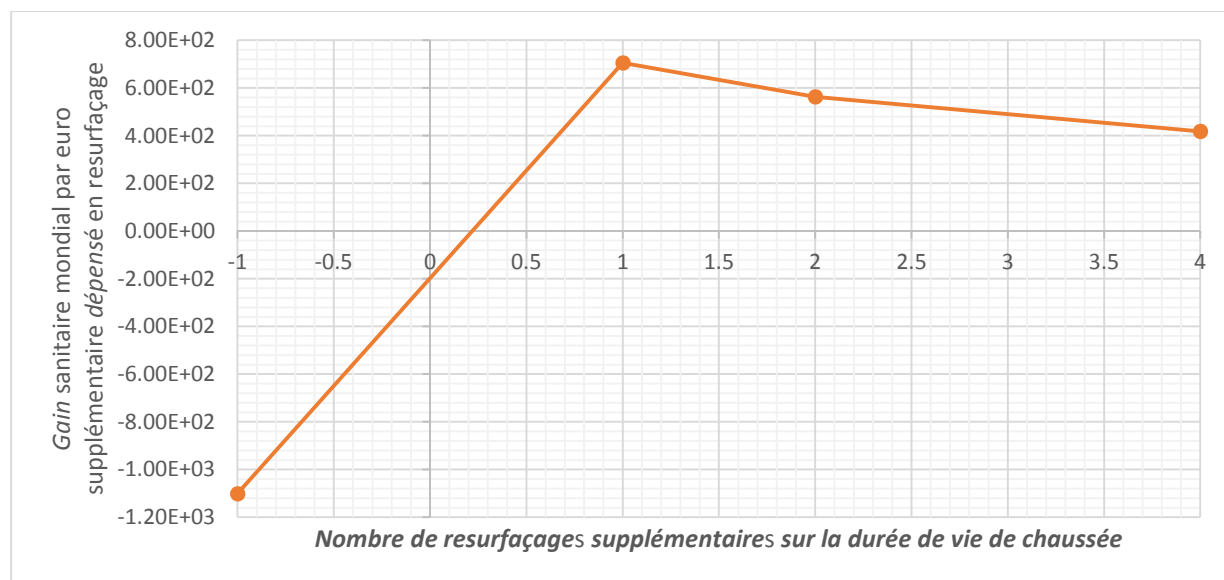


Figure 90 Gain sanitaire mondial par euro supplémentaire dépensé en resurfaçage par le gestionnaire, en fonction du nombre de resurfaçages supplémentaires sur DVT chaussée

3.2.3 Tendances des avantages et inconvénients selon la durée des cycles d'entretien

Enfin, la Figure 91 présente des tendances continues (virtuelles) d'évolution des gains pour l'ensemble des parties prenantes du transport routier selon la durée s'écoulant entre deux resurfaçages, soit selon la durée de vie des couches de surface choisie dans le programme d'entretien. Le point de croisement des courbes représente la référence, soit la situation pour une durée de vie de surface autoroutière égale à 13 ans (ni pertes ni gains par rapport à cette même situation évidemment). Ces gains ont été normés par la valeur des gains maximaux obtenus sur la gamme de scénarios testés.

Deux types de codes permettent de lire plus rapidement ce diagramme riche en informations : la couleur et le type de trait. En termes de couleurs, les gains environnementaux sont représentés dans les déclinaisons de verts, les gains financiers dans les tons bleus, les gains sociaux dans les couleurs chaudes, et enfin les gains macroéconomiques sont regroupés dans les tons violets. En termes de types de traits, nous avons considéré que les traits pleins représentent des gains concernant l'ensemble de la société, tandis que chaque type de trait discontinu représente un acteur isolé : le gestionnaire (pointillés), l'utilisateur (traits), ou le riverain (trait-point).

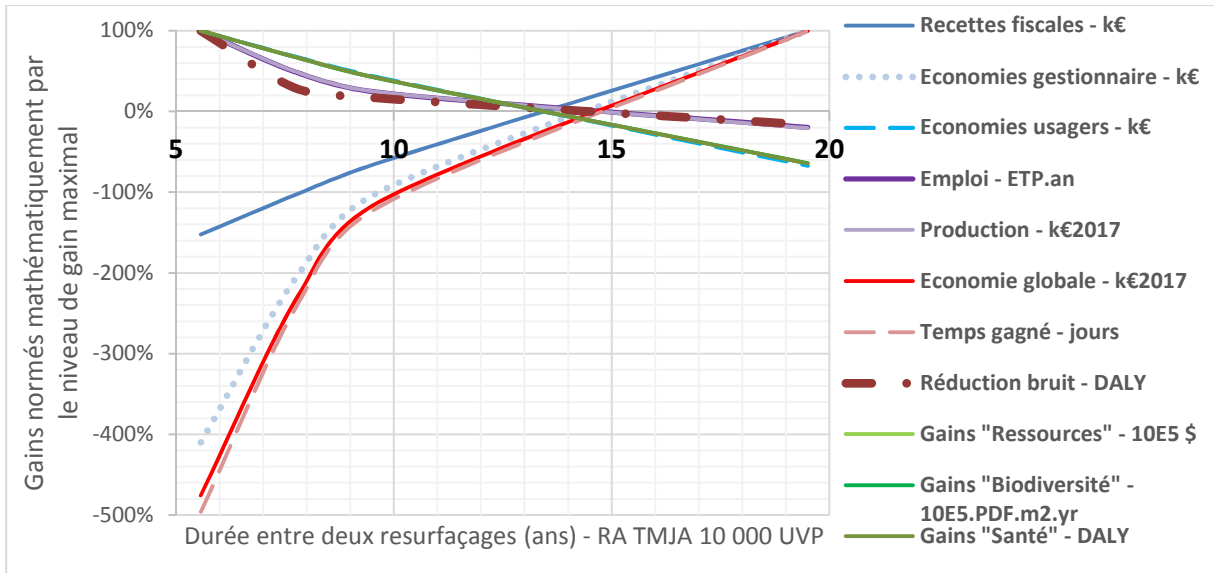


Figure 91 Évolution des gains (normés) relatifs à la modification des programmes d'entretien en fonction de la durée s'écoulant entre deux resurfaçages

On retrouve les tendances décrites à la section précédente, avec les deux lots d'indicateurs se comportant inversement selon le sens d'évolution de l'investissement routier. Un nouvel élément est mis en évidence par le lissage des valeurs discrètes obtenues par notre algorithme : on remarque une forte non linéarité à la durée du cycle de resurfaçage pour quatre types de gains : la production économique, le temps gagné, l'économie pour les gestionnaires, et l'économie globale pour la société : chaque effet semble présenter une tendance asymptotique horizontale non nulle (vers un cycle de resurfaçage infini) et probablement une tendance asymptotique verticale nulle en 0 (vers l'infiniment positif pour la production, et vers l'infiniment négatif pour l'économie globale, l'économie des gestionnaires et le temps. Toutefois, si ces remarques présentent un intérêt qualitatif tendanciel, la vérification mathématique des asymptotes verticales n'est pas nécessaire d'un point de vue pratique puisque l'on ne peut investir de manière illimitée dans l'entretien des routes.

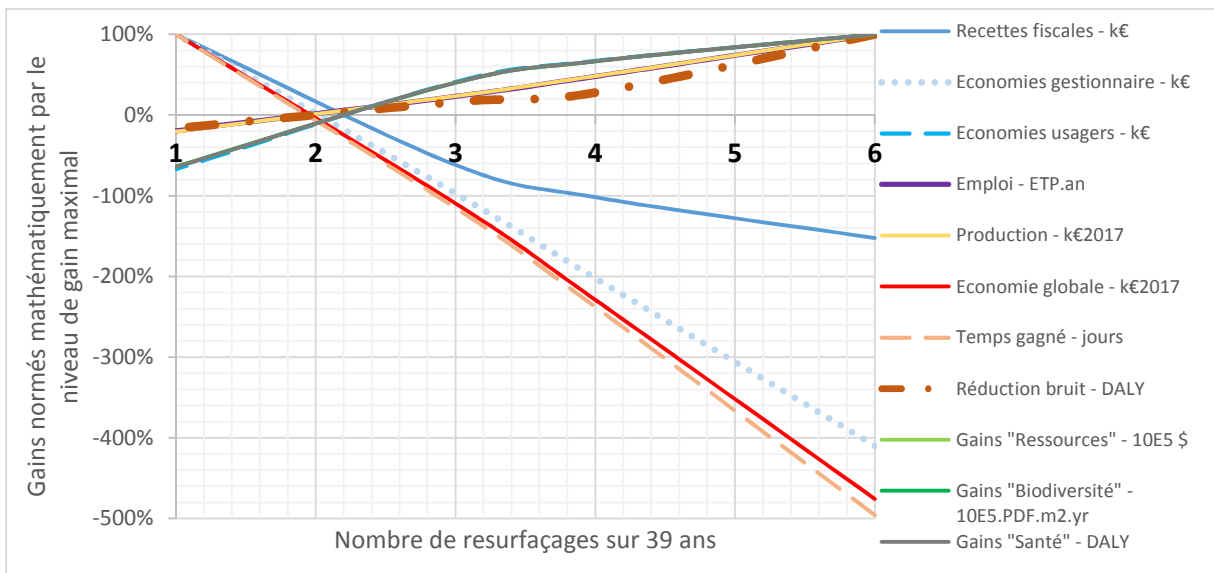


Figure 92 Tendances des gains de durabilité (normés par rapport au scénario d'entretien le plus favorable) relatifs à une modification des stratégies d'entretien en fonction de la cadence de resurfaçage sur la durée de vie de chaussée

Enfin, ce graphique donne à penser que le modèle économique de l'entretien routier devrait être modifié afin d'aligner les intérêts financiers sur les intérêts macroéconomiques et environnementaux en particulier.

On peut également présenter les gains (normés) de durabilité multicritère en fonction du nombre de resurfaçages de la chaussée sur sa durée de vie (Figure 92) : cette représentation fait apparaître une non-linéarité des gains financiers pour l'utilisateur et des gains environnementaux. Cela vient probablement de l'état de la route que l'on ne peut plus sensiblement améliorer au-delà d'une certaine cadence : le gain marginal diminue à mesure de l'augmentation de la cadence de resurfaçage.

3.2.4 Analyse des déterminants des impacts absolus et des gains relatifs aux programmes d'entretien

Afin de comprendre les phénomènes sous-jacents à la constitution des impacts absolus et des gains selon le niveau d'investissement en entretien des autoroutes sur l'exemple du tronçon étudié, nous avons analysé plus finement les parts de chaque sous-système considéré – travaux routiers, carburant, pneumatiques – sur les résultats des onze indicateurs totaux (relatif au système complet). L'objectif est d'en dégager les déterminants pour le cas d'école traité, et, in fine, les leviers d'un entretien adapté aux enjeux du développement durable.

3.2.4.1 Composition des impacts des indicateurs à causalités sous-systémiques multiples

A/ Par consommation : travaux, carburant et pneumatiques

Les résultats de certains indicateurs dépendent de plusieurs systèmes (en dehors du coût global). Ce n'est pas le cas, par exemple, du gain pour le gestionnaire qui ne dépend évidemment que de l'investissement en travaux routiers. Mais c'est le cas des deux indicateurs macroéconomiques, des trois indicateurs environnementaux et du temps perdu. Nous souhaitons examiner le poids respectif de chacun des trois sous-systèmes dans les impacts générés par un programme d'entretien sur ces indicateurs. Notons que les suspensions n'apparaissent pas car l'IRI n'influence cette consommation qu'à partir de 3 m/km, et que sur notre étude de cas l'IRI ne dépasse jamais ce seuil.

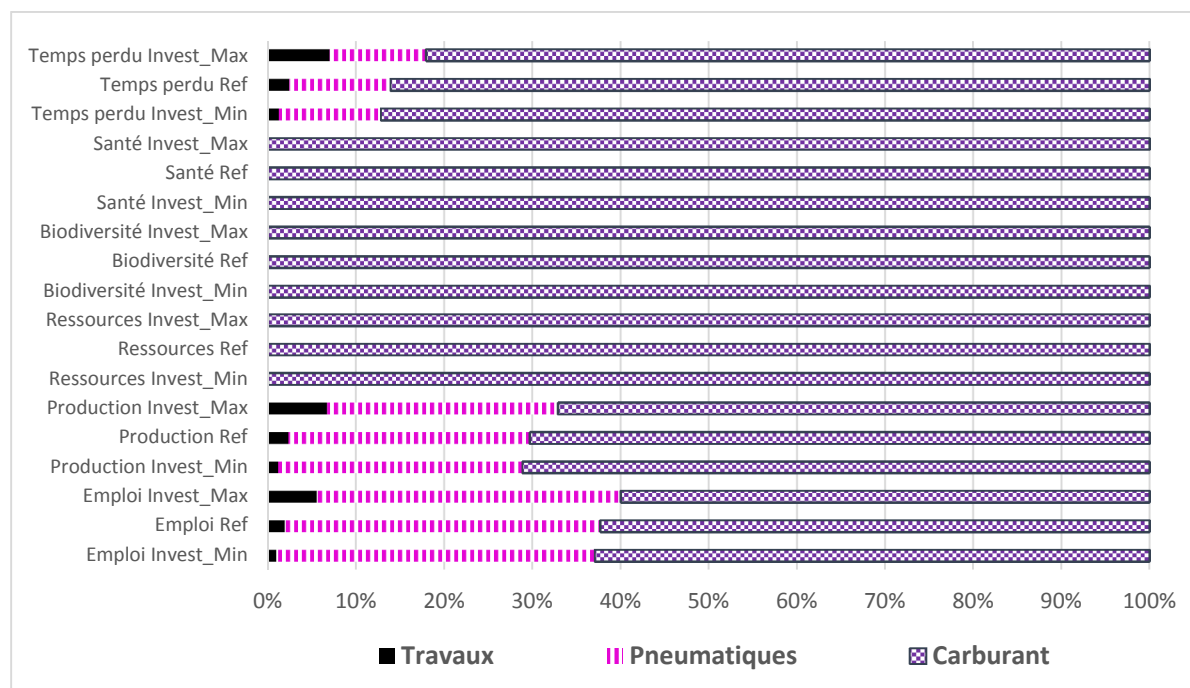


Figure 93 Composition des impacts absolus des indicateurs à causalités sous-systémiques multiples pour trois scénarios d'investissement : maximal (Max), référentiel (Ref) et minimal (Min)

La Figure 93 représente donc la source causale sous-systémique de l'impact de chacun de ces six indicateurs sous forme d'histogramme pour différents programmes d'entretien. En effet, la composition de chaque impact va dépendre du scénario d'entretien. Afin de balayer l'intervalle de composition des impacts, nous présentons ces compositions pour trois scénarios : le scénario de référence (« Ref ») puisqu'il représente la réalité actuelle, puis les scénarios d'investissement maximal (« Max ») et minimal (« Min ») en resurfacement routier qui représentent les bornes de l'intervalle d'investissement considéré. Nous faisons cette sélection par souci de lisibilité des figures. Ainsi, la Figure 93 permet de mettre en évidence les contributions des trois sous-systèmes – « travaux », « pneumatiques » et « carburant » – aux impacts absolus générés par ces scénarios, ainsi que l'évolution de la composition selon le niveau d'investissement routier.

D'abord, on remarque que sur les trois indicateurs environnementaux – santé, biodiversité, ressources – 100 % des impacts sont causés par le sous-système « carburant ». Ensuite, nous notons que la part portée par le sous-système « pneumatique », quand elle est non négligeable, est relativement stable : autour 15% pour le temps perdu et de 30% pour les deux indicateurs macroéconomiques. Au contraire, plus l'investissement diminue, moins l'impact du sous-système « travaux » est important et plus celui du sous-système carburant prend de l'ampleur. Plus le temps perdu passé à faire le plein par les usagers prend de l'importance dans le temps perdu total. Ce résultat est trivial puisque, par exemple, plus les investissements en entretien diminuent, moins la réduction de capacité routière liée aux travaux intervient fréquemment.

Du point de vue quantitatif, le temps passé à faire le plein de carburant représente entre 83 et 87 % du temps perdu par l'usager. Environ 10 pourcents des pertes de temps sont liées au changement des pneumatiques et enfin entre 2 et 8 pourcents des pertes sont liées aux limites de vitesses pendant les travaux d'entretien sur les zones concernées qui viennent ralentir le trafic.

B/ Par type de véhicule pour l'impact au temps passé

L'indicateur de temps perdu, précédemment abordé pour le trafic global, est ensuite décomposé selon les trois types de véhicules – VP, VUL, PL – et selon chaque type de temps passé à une tâche : faire le plein de carburant, changer ses pneumatiques, traverser une zone de travaux à vitesse restreinte. Ces contributions sont présentées pour les trois scénarios sélectionnés précédemment sur la Figure 94. On constate, pour les trois scénarii, la part majoritaire occupée par le temps passé par les véhicules particuliers à faire le plein en carburant : entre 80 % et 85 % du temps passé total. Ensuite, par ordre d'importance, vient le temps passé pour changer les pneumatiques usés des VP (environ 10 % du temps) ; ensuite selon le scénario d'entretien vient soit le temps perdu dans les zones de travaux par les véhicules légers (entre 1% du temps total pour le scénario d'investissement minimum et 7 % du temps total pour le scénario d'investissement maximum) soit le temps passé à réaliser le plein en carburant pour les VUL. Celui-ci reste à peu près stable, représentant 3-4% des contributions du temps passé par les usagers.

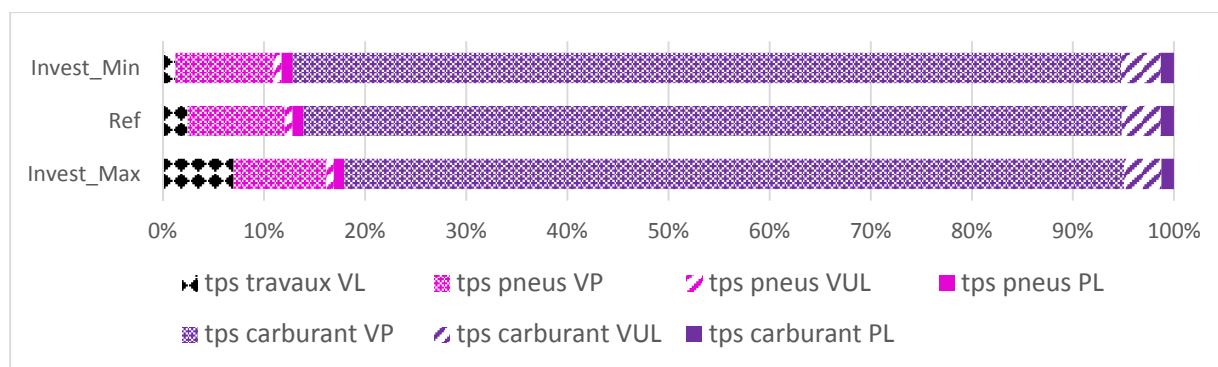


Figure 94 Composition du temps perdu par type de véhicule – PL, VUL, VP – et de sous-système – travaux, pneus, carburant

Enfin, le temps passé pour changer les pneumatiques des VUL et des PL représente pour ces deux catégories de véhicules environ 2 % du total et reste relativement stable selon le scénario d'investissement. Évidemment, le temps perdu par les poids lourds dans les zones de travaux est nul puisque leur limite de vitesse habituelle est égale à celle mise en place de façon provisoire dans les zones de travaux.

Finalement, le trafic VP représentant environ 85% du trafic, il n'est pas étonnant qu'il représente la classe véhiculaire majoritaire en termes de pertes de temps.

Notons que si nous nous intéressions à une monétarisation des temps perdus, les valeurs dépendant des types de véhicules, des motifs et des distances parcourues, les contributions seraient différentes.

3.2.4.2 Composition des gains et évolutions selon l'investissement

La Figure 95 représente la composition des gains et pertes par sous-système de trois scénarios alternatifs d'entretien par rapport au scénario d'entretien de référence. L'histogramme est en pourcentage cumulé de la somme des valeurs absolues des différents gains et pertes. Le graphique se lit ainsi : par type de gain et scénario étudié, on lit en abscisse la part des gains ou pertes apportée par le sous-système sur la somme des valeurs absolues. Une barre majoritairement négative (en %) montre que le gain de la variante est négatif (il s'agit donc d'une perte). Les barres à droite de l'axe des ordonnées représentent les gains, les barres à gauche de l'axe les pertes.

À titre d'exemple, dans les deux scénarios d'augmentation de l'investissement en entretien – +50 % et +300% – par rapport à la situation de référence, l'ensemble des pertes est engendré par la réduction de vitesse des VL en zone de travaux. Les gains de temps économisé à ne pas faire le plein d'essence ou à ne pas changer les pneumatiques ne contrebalancent pas ces pertes puisqu'elles ne représentent que 20% de la somme des valeurs absolues des modifications des temps passés par les usagers sur ce tronçon de 10 km de route. Inversement, on voit qu'un investissement réduit de moitié est une perte de temps passé à la « pompe à essence » ou au garage (changement de pneumatiques) pour les usagers, mais que le gain en termes de temps économisé dans les travaux non réalisés est presque 4 fois supérieur.

L'indicateur de gain à la santé montre qu'augmenter l'investissement permet un gain du fait du sous-système carburant exclusivement. En effet, avec un revêtement en meilleur état, les usagers consomment moins d'essence, ce qui permet d'éviter des émissions de substances néfastes à la santé humaine sur toute la chaîne relative à la production de l'entretien des routes. En revanche si l'on diminue de moitié l'investissement en entretien des routes, on dégrade fortement la santé humaine. On retrouve ces tendances sur les deux autres indicateurs de gain environnementaux, à savoir la biodiversité et les ressources non renouvelables. Notons également que l'intensité des travaux routiers

ne représente pas un levier environnemental en tant que tel puisque la part des dommages environnementaux portés par les travaux quel que soit le scénario d'entretien évalué est négligeable.

Enfin, en ce qui concerne les leviers en termes de production et d'emploi, le diagramme met en évidence que l'intensité des travaux en entretien est le principal levier des indicateurs d'emploi et de production, pour environ 80 % de la somme des valeurs absolues des impacts des sous-systèmes. Le sous-système « carburant » et le sous-système « pneumatique » ont donc un effet mineur. En particulier, les modifications de consommation de carburants portent environ 10 à 20 % des gains ou pertes macroéconomiques respectivement pour une diminution ou une augmentation de l'investissement routier.

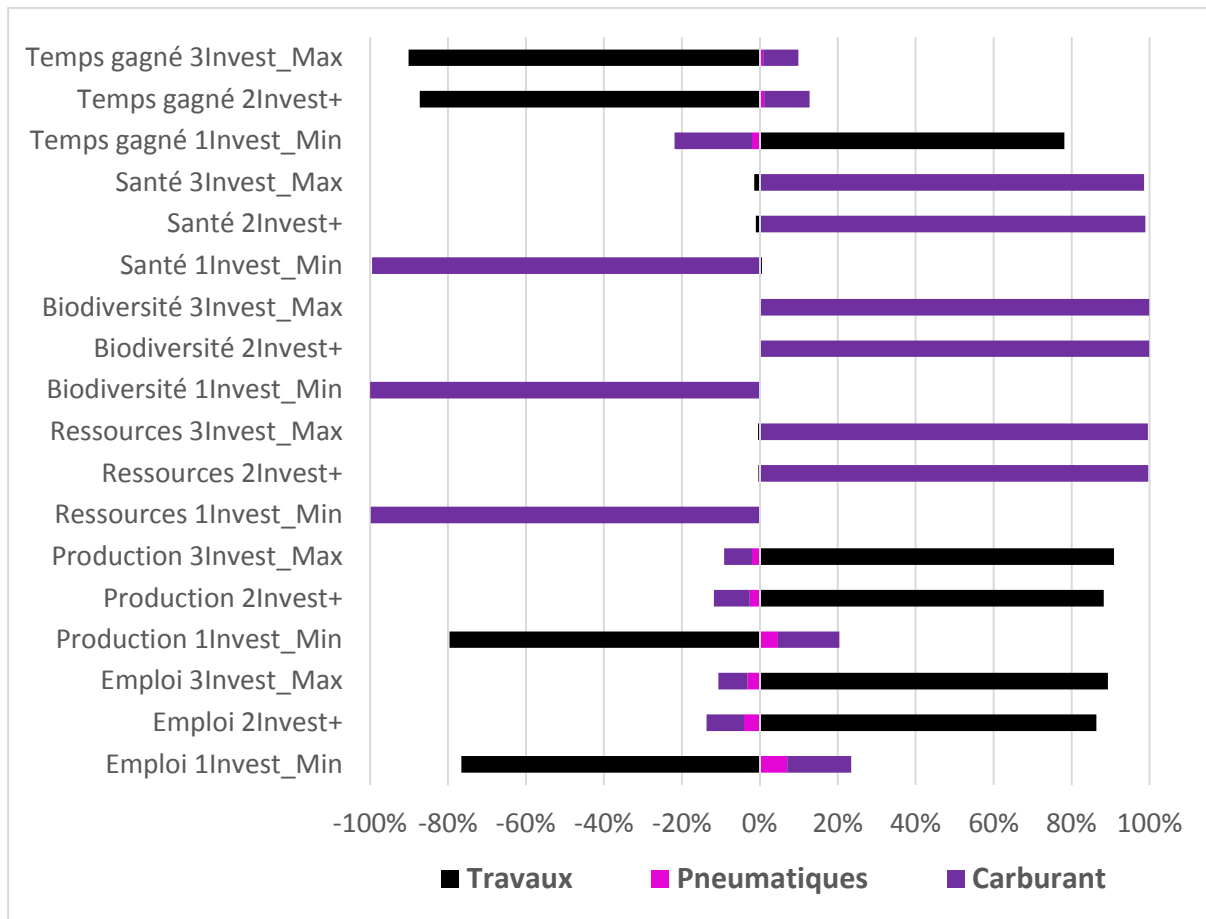


Figure 95 Composition des gains de trois scénarios alternatifs d'entretien par rapport à la référence

3.3 Analyses de sensibilité

Nous avons mené des analyses de sensibilité sur les caractéristiques de la route et de son entretien afin de confirmer ou d'infirmer les tendances mises en évidence sur le cas autoroutier étudié. Elles portent sur le niveau de trafic, les techniques routières choisies, et la vitesse de dégradation de l'état de surface.

3.3.1 Niveau de trafic

Tout d'abord, nous avons testé la sensibilité du modèle, *ceteris paribus*, au trafic moyen journalier annuel, avec un facteur ½, 2, et 3 au trafic réel d'environ 10 000 véhicules par jour et par sens considéré dans le scénario de base.

Quatre groupes d'indicateurs se comportent de manière similaire sous modification du niveau de trafic (Figure 96). D'abord, un groupe d'indicateurs parfaitement proportionnels au trafic, qui inclut les recettes fiscales, les économies pour les usagers, le temps gagné, la réduction de l'impact sanitaire du

bruit. Ensuite, notons un deuxième groupe d'indicateurs au comportement très proche de celui du premier groupe : celui des indicateurs environnementaux. Il est à peu près linéaire au trafic, avec une sensibilité légèrement accrue pour le gain à la santé par rapport au gain sur la biodiversité, et encore plus haut gain en termes de consommation de ressources non renouvelables. Un troisième groupe de gains, faiblement sensible au niveau de trafic, se dégage : il inclut le gain en emploi, le gain en production, et l'économie globale (Figure 97). Enfin, l'indicateur d'investissement du gestionnaire n'est évidemment pas sensible au trafic, dans la mesure où nous ne tenons pas compte de l'impact des travaux sur les recettes de péage dans le cas autoroutier, ni de l'effet de l'état de la route sur le choix d'itinéraire (autoroutes Vs routes nationales Vs routes départementales).

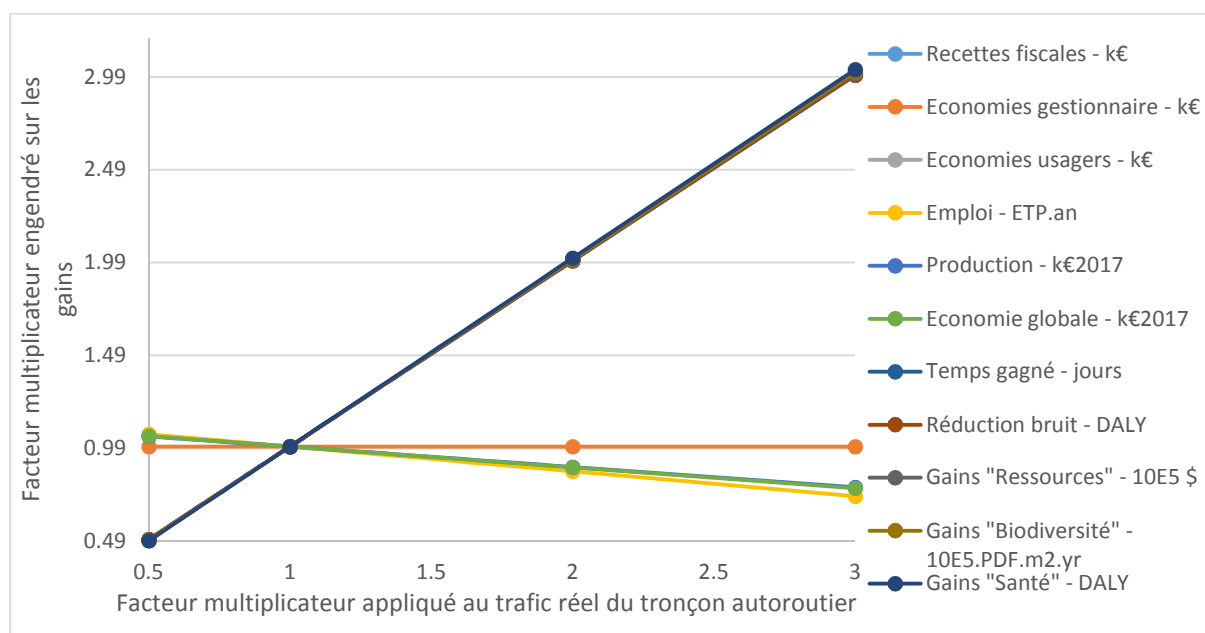


Figure 96 Sensibilité des gains au trafic en investissement maximal

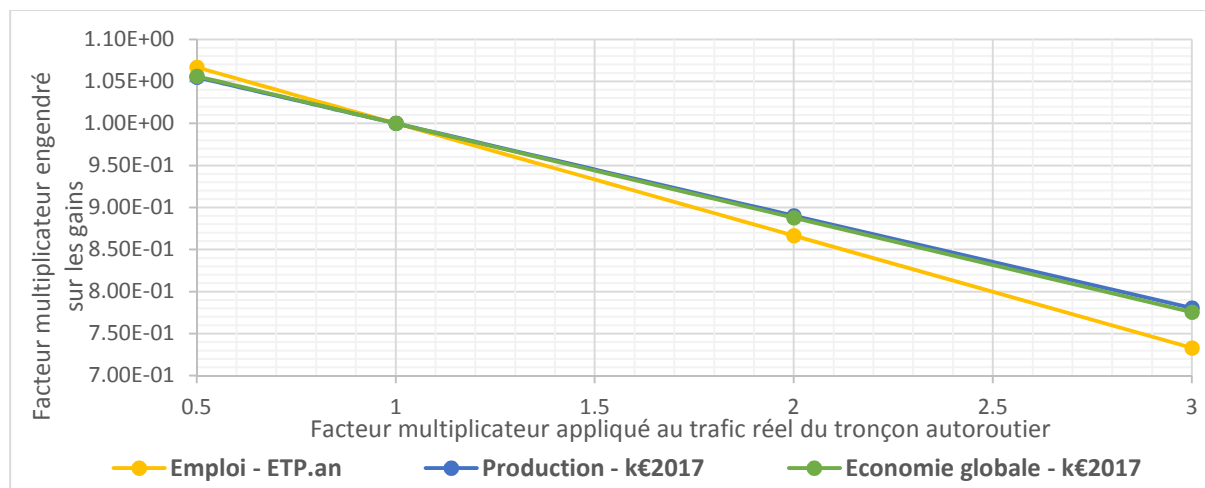


Figure 97 Sensibilité des gains du troisième groupe au trafic en investissement maximal

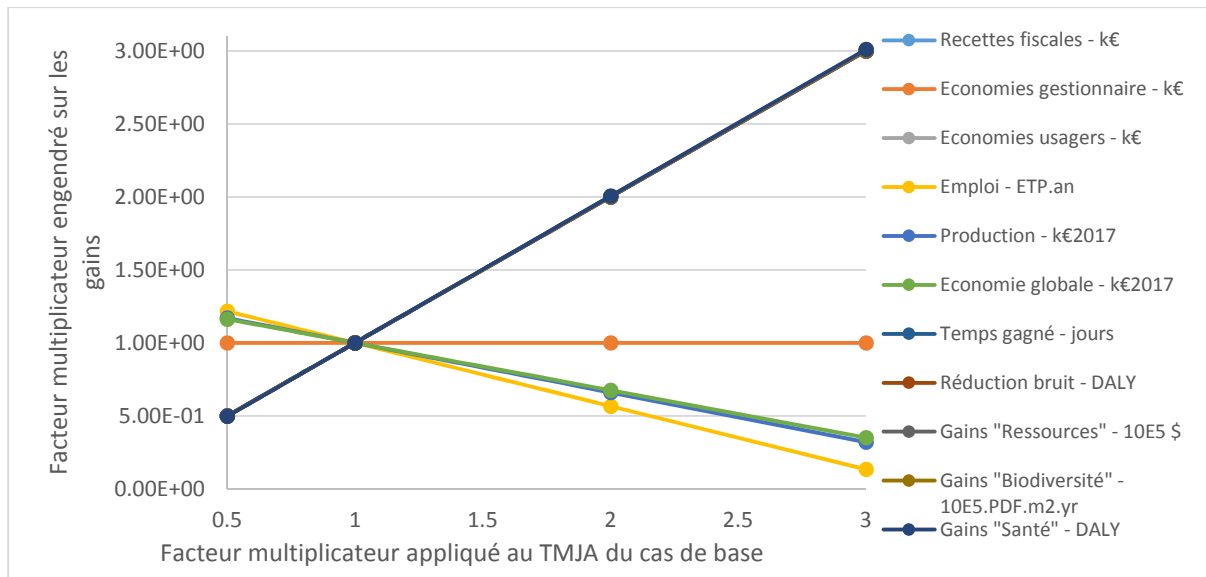


Figure 98 Sensibilité des gains du troisième groupe au trafic en investissement minimal

Avec le scénario d'investissement minimal (Figure 98), nous retrouvons les mêmes quatre groupes qu'avec le scénario d'investissement maximal, avec néanmoins un comportement du groupe des indicateurs environnementaux encore plus proche du comportement du groupe n°1 des gains (si ce n'est identique). Enfin, les gains du troisième groupe sont plus sensibles au trafic en investissement minimal qu'en investissement maximal.

3.3.2 Modification de la technique routière de resurfacement

Nous avons testé la variation des résultats selon la technique routière utilisée pour le resurfacement de l'autoroute : BBSG, BBUM, ESU bicouche pré-gravillonnée. Ce test constitue un exercice qui reste en partie théorique dans la mesure où nous avons évalué l'impact de l'utilisation d'un seul type de revêtements sur la totalité de la durée de vie de chaussée qui ne suffiraient pas nécessairement au niveau d'entretien requis sur une chaussée à tel niveau de service (trafic, vitesse et confort attendu). Par exemple, une autoroute uniquement resurfacée par ESU sur 39 ans ne conserverait probablement pas un niveau d'état de surface suffisant à son exploitation « normale ». Il faudrait d'ailleurs pouvoir tenir compte de l'effet de l'ESU sur l'IRI, ce pour quoi nous n'avons pas de loi, et nous adoptons par défaut la loi pour les revêtements épais. Idem pour les BBUM, présentant des épaisseurs de revêtement plus fines que les BBTM ou les BBM pour lesquelles notre loi d'effet de travaux sur l'IRI est applicable. Toutefois, l'objectif de cette étude complémentaire est d'analyser grossièrement comment les gains et pertes varient en fonction des quantités de matériaux utilisés.

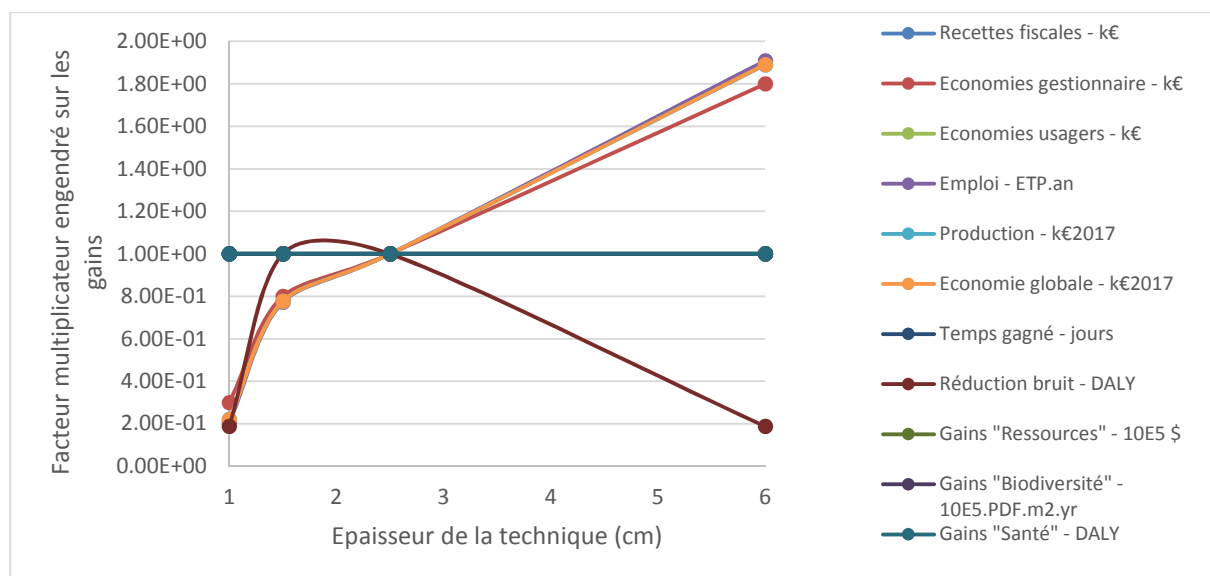


Figure 99 Sensibilité des gains à l'épaisseur de la technique de resurfaçage en investissement maximal

La Figure 99 montre la sensibilité des gains à l'épaisseur de la technique de resurfaçage choisie, sur le cycle de vie de chaussée, pour le programme d'investissement maximal et avec pour référence les gains obtenus en choisissant un resurfaçage au BBTM (2.5 cm d'épaisseur). Elle met en évidence trois groupes d'indicateurs au comportement similaire. Nous rappelons les épaisseurs typiques des techniques : 1.5 cm pour le BBUM, 2.5 cm pour le BBTM, 6 cm pour le BBSG. Nous avons estimé à 1cm l'ESU pré-gravillonné bicouche (possiblement un peu plus épais en réalité, proche du BBUM). Sous la droite d'équation $y=1$, le changement d'intensité de l'entretien avec la variante affecte moins le niveau de l'impact (en valeur absolue) que le même changement d'intensité en utilisant la technique de BBTM. Au-dessus de la droite, c'est le contraire.

Trois indicateurs ne sont d'office pas concernés par une modification du revêtement dans notre modèle : il s'agit des coûts pour les usagers (mêmes lois de dégradation d'IRI), du temps perdu (dans la mesure où l'on considère un rendement de chantier unique), des recettes fiscales (pas de TVA considérée sur les travaux routiers). On pourrait néanmoins affiner le modèle avec des données de terrain pour tenir compte des modifications.

D'autre part, les indicateurs environnementaux ne sont pas affectés non plus par la technique de resurfaçage utilisée, même avec une variante ESU, qui est pourtant bien plus sobre environnementalement. La variation des impacts environnementaux selon le niveau d'entretien routier tient essentiellement à la consommation en carburant que ce niveau d'entretien engendre sur les véhicules.

Quatre types d'indicateurs sont fortement sensibles à la technique utilisée : les deux gains macroéconomiques, l'économie globale et le gain pour le gestionnaire.

Le modèle rend compte de la différence de catégorie acoustique entre les techniques (les impacts restent très faibles), et met bien en évidence que ESU et BBSG d'une part, BBUM et BBTM d'autre part, appartiennent à la même catégorie, respectivement aux catégories R3 et R2.

La Figure 100 présente la sensibilité des gains à l'épaisseur du revêtement de resurfaçage sous scénario d'investissement minimal avec pour référence le BBTM. Par comparaison à la Figure 99, il montre que la valeur absolue des gains est plus sensible à l'épaisseur quand on ralentit la cadence d'entretien par rapport à la référence.

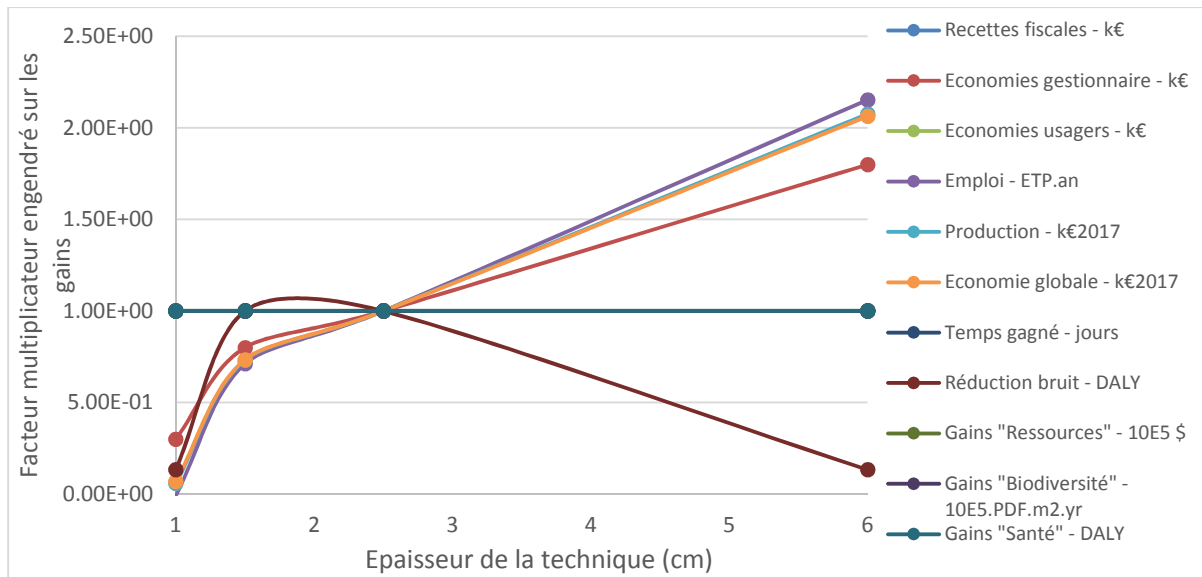


Figure 100 Sensibilité des gains à l'épaisseur de la technique de resurfacement en investissement minimal

3.3.3 Vitesse de dégradation de la surface de chaussée

Nous avons d'abord étudié la sensibilité des indicateurs au paramètre de dégradation de l'IRI en fonction du temps : dans le scénario de base, cette pente est fixée à 0.05 m/km par an, et nous évaluons la sensibilité de notre algorithme de calcul à des pentes d'IRI affectées d'un facteur 1/2, 2 et 3, soit 0.025 m/km par an, 0.10 m/km par an, et 0.15 m/km par an. Des études statistiques des niveaux de l'IRI simulés selon nos lois de dégradation du revêtement et d'effet des travaux de resurfacement ont également été effectuées afin de tester la vraisemblance des variantes choisies. Pour chaque analyse de sensibilité, nous avons en particulier étudié les valeurs d'IRI moyennes, médianes et l'écart-type pour chaque série de valeur annuelle.

3.3.3.1 Résultats de sensibilité globale des gains à la vitesse de dégradation

Cette étude de sensibilité est présentée pour le scénario d'investissement maximal sur la Figure 101. Les résultats de sensibilité sont proches de ceux obtenus dans l'étude de sensibilité au trafic. Trois groupes d'indicateurs aux comportements similaires par rapport à l'évolution de la vitesse de dégradation apparaissent. D'abord, un groupe d'indicateurs presque proportionnels à la vitesse de dégradation, qui inclut les recettes fiscales, les économies pour les usagers, le temps gagné et les gains environnementaux. Un deuxième groupe d'indicateurs, légèrement sensibles à la vitesse de dégradation, se dégage : il inclut les indicateurs en emploi et production ainsi que l'économie globale (Figure 102). Notons que la sensibilité à la vitesse de dégradation de ce groupe augmente quand l'investissement est réduit (Figure 103). Enfin, les gains d'investissement du gestionnaire et d'impact sanitaire du bruit ne sont pas sensibles à la vitesse de dégradation. De fait, le niveau de bruit devrait dépendre de l'état de surface, mais notre modèle d'émission acoustique se contente d'utiliser des lois statistiques temporelles limitées par faute de données sur revêtements âgés (>15 ans), et sans considération de l'IRI.

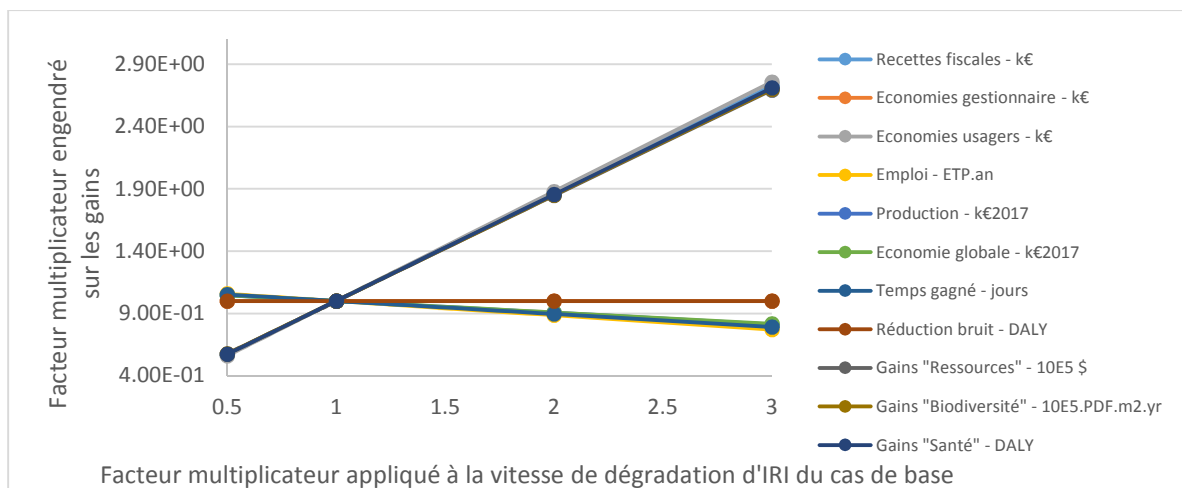


Figure 101 Sensibilité des gains à la vitesse de dégradation d'IRI en investissement maximal

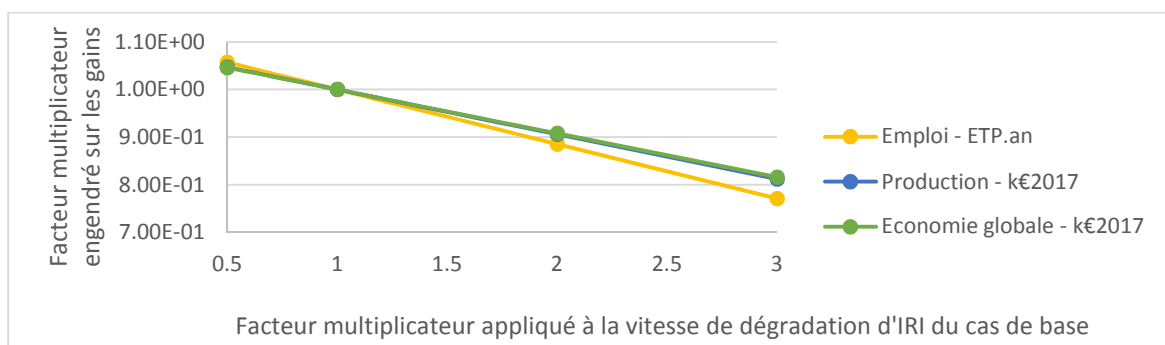


Figure 102 Sensibilité des gains du deuxième groupe au trafic en investissement maximal

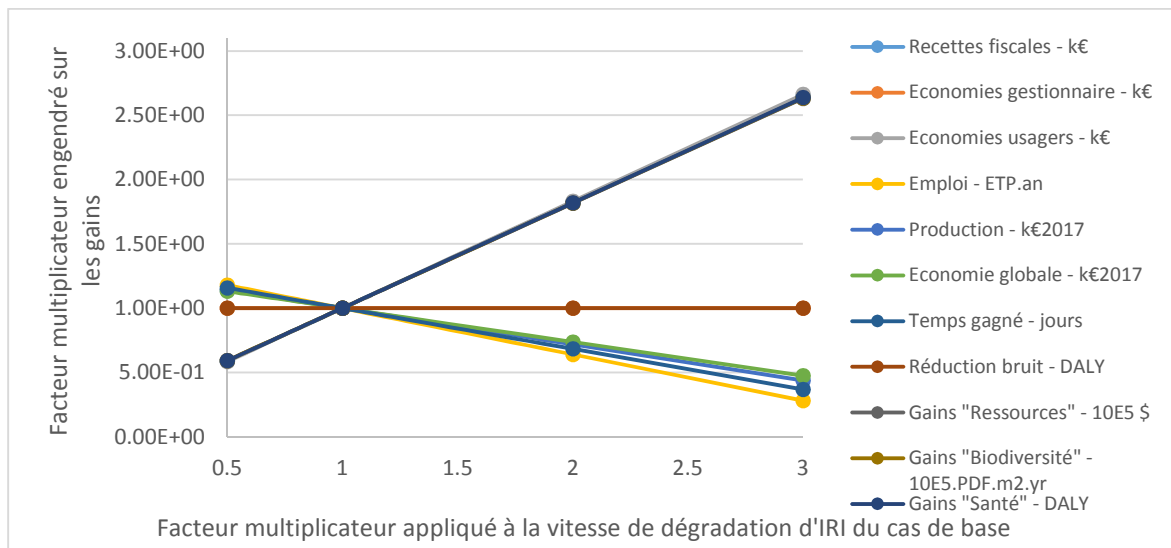


Figure 103 Sensibilité des gains à la vitesse de dégradation d'IRI en investissement minimal

3.3.3.2 Vitesse de dégradation deux fois plus lente

A/ Études statistiques sur les niveaux de l'IRI

La Figure 104 représente l'IRI simulée par notre modèle d'évolution d'état de surface au cours de la durée de vie de la chaussée pour le scénario d'investissement de référence, avec dégradation de surface deux fois plus lente que celle choisie dans notre modèle de base, soit égale à +0.025 m/km.an. On retrouve la diminution importante de l'écart-type avec la succession des travaux de resurfacement que nous avons déjà notée précédemment. Le niveau d'IRI moyen reste plutôt stable jusqu'à la fin de

la durée de vie de chaussée (la variation observée vient de l'arrondi à l'entier le plus proche pour calculer l'IRI annuel sur 39 ans découpés par un nombre entier de resurfaçage), avec une très légère augmentation au cours des cycles de resurfaçage de l'ordre de 0.1 à 0.2 m/km.cycle. Cette simulation est proche des valeurs constatées dans les données réelles de notre autoroute.

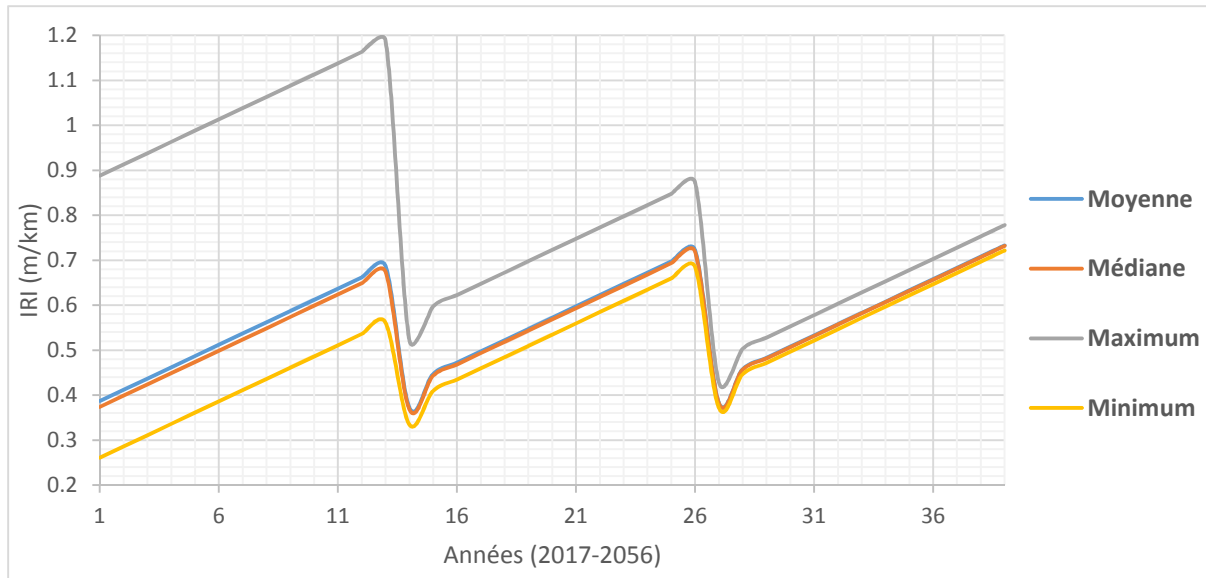


Figure 104 IRI simulé au cours de la durée de vie de la chaussée sous scénario d'investissement de référence avec dégradation de surface 2 fois plus lente que le modèle de base

B/ Résultats de l'évaluation holistique

Les gains et pertes à la fois environnementaux et financiers pour les usagers sont à peu près proportionnels au facteur appliqué à la vitesse de dégradation de l'IRI, tandis que les autres indicateurs de changent pas (Figure 101, Figure 102, Figure 103). Par rapport au modèle de base, une diminution d'un facteur deux de la vitesse de dégradation diminue environ par deux les pertes (resp. gains) de recettes fiscales, les gains (resp. pertes) financiers pour les usagers et les gains (resp. pertes) pour l'environnement lors d'une augmentation (resp. diminution) de la cadence du resurfaçage. En revanche, les gains macroéconomiques restent plutôt stables puisque les travaux sont le contributeur majoritaire de ces gains, et que le test ne modifie pas l'intensité des travaux considérée.

Les valeurs de ces gains sont présentées à titre indicatif (unités variées) sur les Figure 105 et Figure 106.

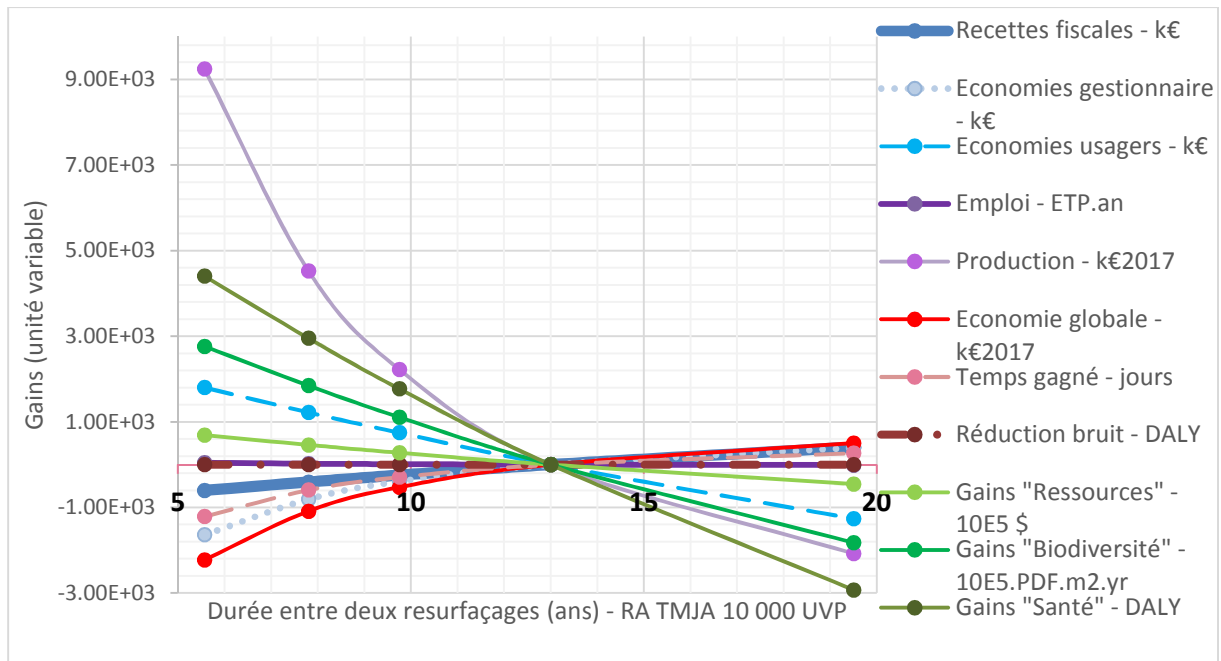


Figure 105 Évolution des gains relatifs à la modification des programmes d'entretien en fonction de la durée s'écoulant entre deux resurfaçages

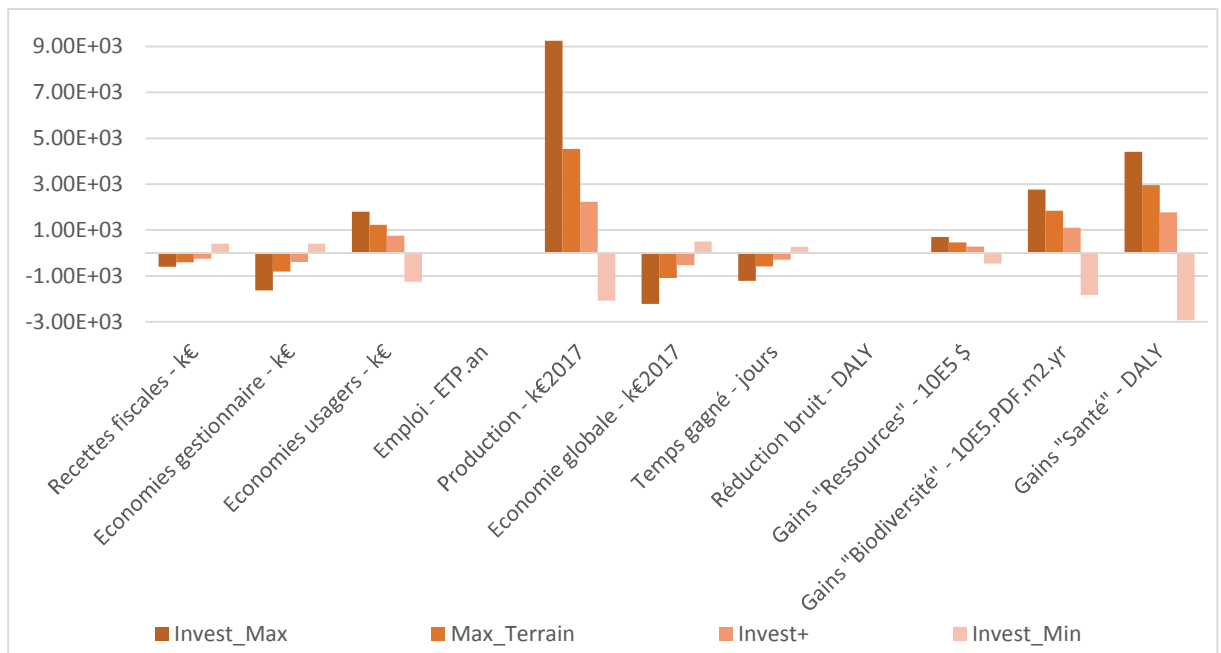


Figure 106 Avantages à choisir la variante par rapport au programme de référence

Les niveaux de rentabilité des scénarios d'augmentation ou diminution d'investissement routier sont également deux fois moins importants (en valeur absolue) (Figure 89, Figure 90 Vs Figure 107, Figure 108) : on observe une rentabilité financière maximale pour les usagers de 2€ par euro supplémentaire investi (scénario +50% d'investissement, DVS = 9.75 ans), et une « rentabilité sanitaire humaine » maximale de 400 €/€ investi (même scénario). Une diminution par deux de l'investissement implique au contraire 3€ de perte aux usagers et 600€ de perte humaine par euro économisé.

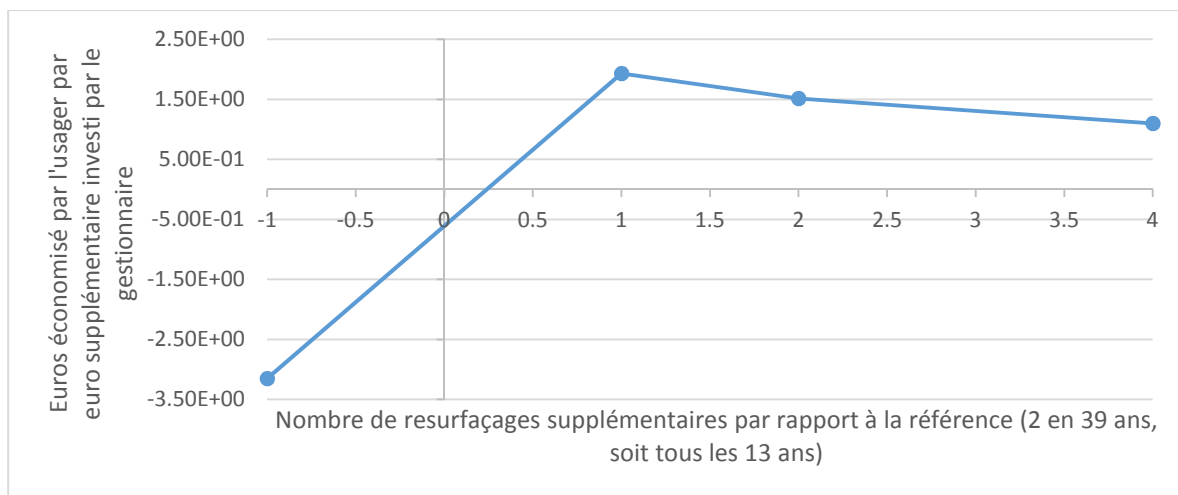


Figure 107 Euros économisés par les usagers par euro supplémentaire investi en entretien par une SCA selon le nombre de resurfaçages supplémentaires par rapport à la référence

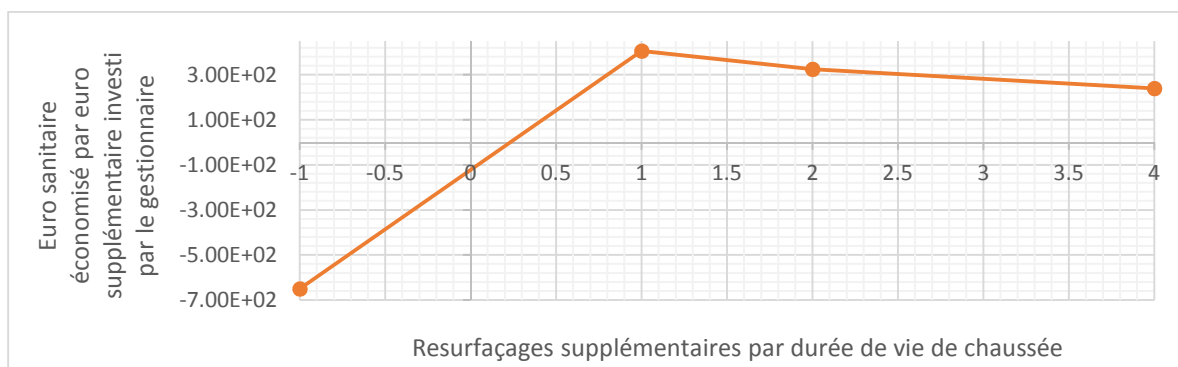


Figure 108 Ratio du gain sanitaire mondial par euro supplémentaire dépensé en resurfaçage par le gestionnaire, en fonction du nombre de resurfaçages supplémentaires sur DVT chaussée

Alors que le modèle de base mettait en évidence un optimum financier de durée de vie de surface inférieur ou égal à 5.6 ans pour le groupe d'acteurs {SCA + usagers} et entre 5.6 et 9.75 ans pour le système financier complet (Figure 87) , cette analyse de sensibilité suggère un optimum financier de durée de vie de surface autour de 8 ans pour le premier système et un optimum entre 8 et 13 ans pour le système complet (Figure 109). Notons que la présentation « lissée » engendre une imprécision graphique puisque l'on croise bien l'axe des abscisses à DVS = 13 ans.

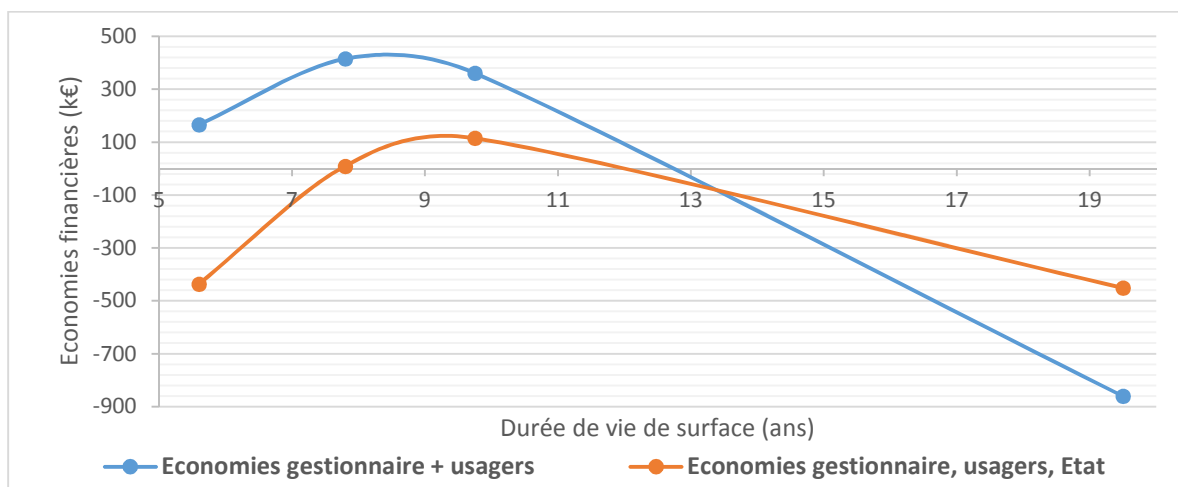


Figure 109 Économies de deux systèmes d'acteurs financiers apportées par une modification de la durée de vie de surface

3.3.3.3 Dégradation de l'IRI accélérée

A/ Simulation de l'IRI

La Figure 110 représente l'IRI simulée par notre modèle d'évolution d'état de surface au cours de la durée de vie de la chaussée sous scénario d'investissement maximal avec dégradation de surface trois fois plus rapide que celle choisie dans notre modèle de base, soit égale à 0.15 m/km et par an. Le niveau d'IRI augmente jusqu'au 3^{ème} resurfaçage pour ensuite rester stable jusqu'à la fin de la durée de vie de chaussée. Le niveau d'IRI maximal atteint 1.8 m/km et par an, ce qui semble raisonnable bien qu'un peu élevé avec un tel entretien d'après les données de terrain qui nous ont été fournies.

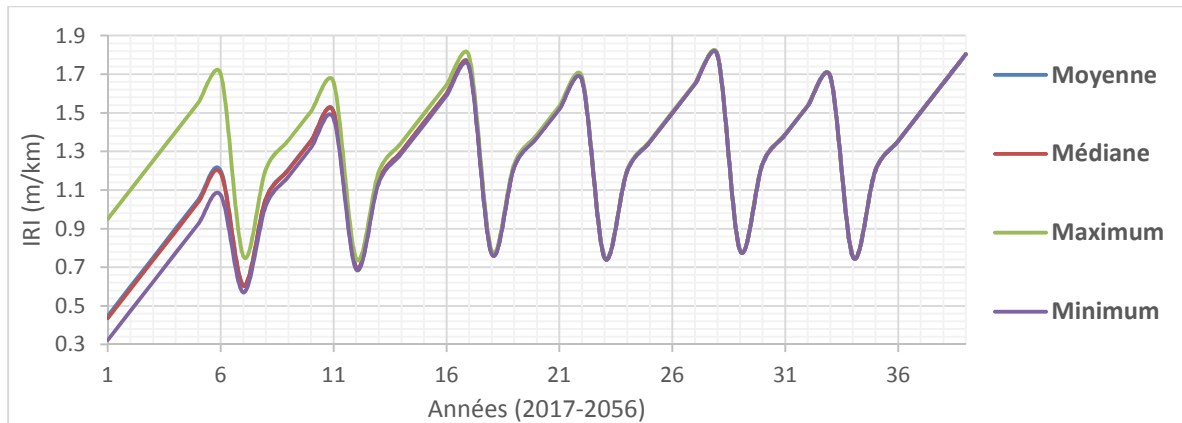


Figure 110 IRI simulé au cours de la durée de vie de la chaussée sous scénario d'investissement maximal avec dégradation de surface trois fois plus rapide

La Figure 111 représente quant à elle l'IRI au cours du temps sous scénario d'investissement minimal avec dégradation de surface trois fois plus rapide. Le niveau maximal d'IRI monte évidemment beaucoup plus haut que précédemment, presque jusqu'à 3.5 m/km avant le premier resurfaçage et au-delà de 4 m/km à la fin de la durée de vie de chaussée. Ces niveaux d'IRI ne sont pas des niveaux que l'on retrouve sur les autoroutes en France aujourd'hui, néanmoins les résultats du modèle ne sont pas incohérents avec ce qui pourrait se passer dans la réalité lorsque l'on regarde les niveaux d'IRI sur routes départementales qui sont certes moins fréquentées mais également moins entretenues. Il faudrait, pour vérifier notre modèle, obtenir des données de terrain d'autoroutes resurfacées moins régulièrement afin de mesurer comment se comporte l'IRI de ces chaussées fortement circulées avec le temps.

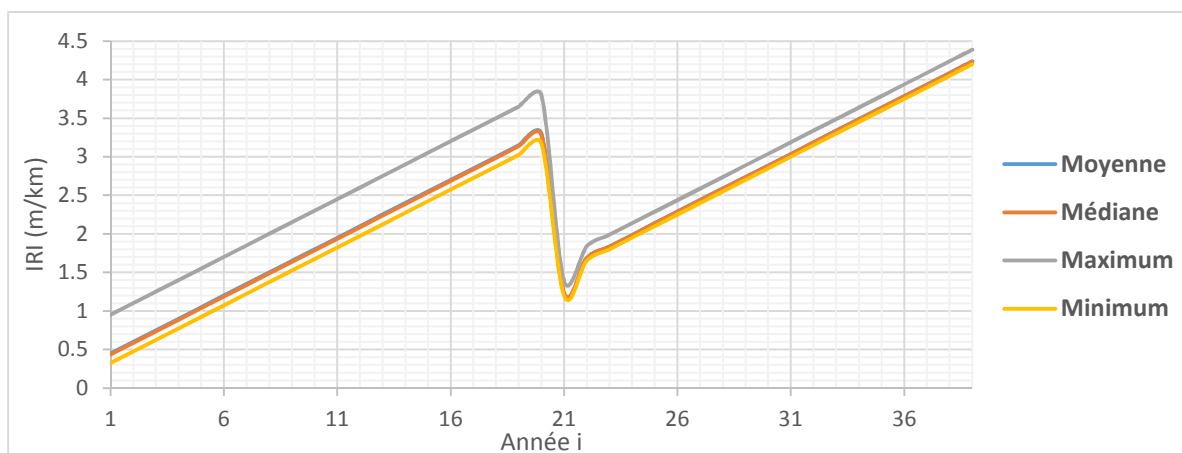


Figure 111 IRI simulé au cours de la durée de vie de la chaussée sous scénario d'investissement minimal avec dégradation de surface trois fois plus rapide

Notons au passage que, dans notre premier algorithme de calcul, nous n'avons pas implémenté la partie de la méthode relative à la dégradation accélérée du système de suspension des véhicules qui apparaît pour des IRI supérieurs à 3 m/km. Dans nos calculs, nous omettons donc cet effet supplémentaire dont il faudrait tenir compte.

B/ Résultats de l'évaluation holistique

Les gains et pertes à la fois environnementales et financières pour les usagers sont à peu près proportionnels au facteur appliqué à la vitesse de dégradation de l'IRI au cours du temps. À titre d'exemple, la Figure 112 présente l'évolution des gains sous dégradation de chaussée trois fois plus rapide (représentation à titre indicatif, car les unités des différents indicateurs sont différentes). En réalité, pour ce scénario, l'IRI dépassant le seuil de 3 m/km, viendraient s'ajouter les effets liés à l'usure des suspensions.

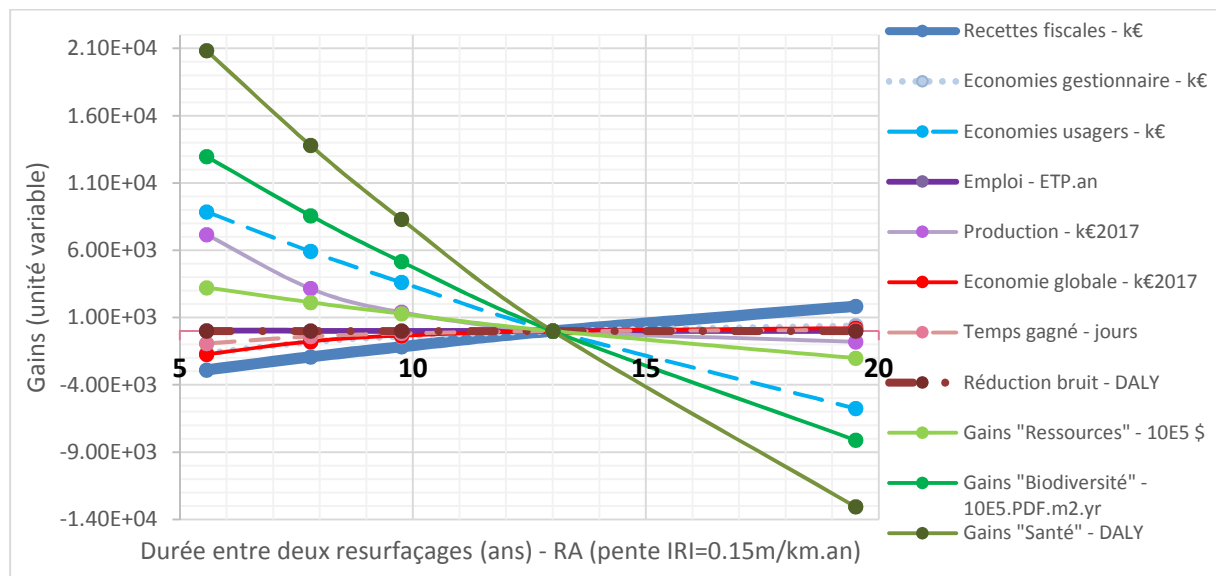


Figure 112 Avantage à choisir la variante par rapport au programme de référence sous hypothèse de vitesse de dégradation de l'IRI trois fois plus rapide

4 Enseignements

Après avoir présenté l'autoroute étudiée en termes de structures de chaussée, de niveau de trafic, de comportement de surface et de politiques de resurfaçage actuelle, nous avons expliqué notre protocole d'application de la méthode puis présenté les résultats obtenus pour la comparaison de cinq scénarios d'entretien différents. Nous synthétisons ici les enseignements tirés de cette étude de cas, pour le lecteur qui n'aurait pas lu l'étude de cas en détail.

4.1 Résumé technique des résultats de l'étude de base

Les conclusions présentées dans cette synthèse préliminaire ne concernent que le tronçon autoroutier particulier supportant un trafic journalier d'environ 10 000 véhicules/jour par sens, selon des hypothèses et des valeurs de paramètres données précédemment dans ce mémoire, sur la durée de vie de 39 ans des 10 km de chaussée autoroutière étudiés.

Le diagramme radar de comparaison holistique des impacts des cinq différents programmes d'entretien évalués montre que, sur une base des impacts normalisée par la valeur de ceux du scénario de référence, les programmes d'entretien étudiés ne se différencient principalement qu'en termes de dépenses du gestionnaire routier et d'impact sanitaire du bruit de la route, principalement car ces indicateurs ne dépendent pas des aspects relatifs aux consommations des véhicules, qui impactent

fortement de nombreux indicateurs absolus. De plus, cette normalisation a pour effet de masquer l'importance des effets obtenus. Aussi, on peut se poser la question des gains et pertes obtenues en faisant varier les programmes d'entretien par rapport aux programmes pratiqués actuellement par les gestionnaires.

Ce deuxième traitement quantitatif a permis de mettre en évidence plusieurs éléments. D'abord, les comportements opposés des gains de deux groupes d'indicateurs par rapport au sens d'évolution de l'investissement en entretien des routes. Il y a en effet une corrélation positive entre l'évolution de l'investissement en entretien de resurfaçage et sept types de gains, et une corrélation négative pour les quatre autres types de gains. Les corrélations positives concernent les gains macroéconomiques, environnementaux, et en partie sociaux, i.e. les économies pour les usagers, l'emploi en France, la production nationale, la réduction de l'impact sanitaire lié au bruit, les économies en ressources non renouvelables, la sauvegarde de la biodiversité, et la protection de la santé publique. Les corrélations négatives à l'investissement routier concernent trois indicateurs financiers et un indicateur social : recettes fiscales, économies pour le gestionnaire, économie globale pour la société, et temps gagné par l'utilisateur.

Concernant la rentabilité de l'investissement en resurfaçage pour un groupe d'acteurs {SCA + usagers} à taux d'actualisation respectivement de 8 et 1%, l'étude de cas met en évidence que chaque euro supplémentaire investi en entretien permet d'économiser entre environ 2 et 3.5 euros pour les usagers (respectivement pour 4 à 1 resurfaçages supplémentaires sur la durée de vie de chaussée). Dans cet exemple, la rentabilité maximale s'obtient en passant de 2 à 3 resurfaçages pour une période de 39 ans, soit en passant d'une durée de vie des surfaces de 13 à un peu moins de 10 ans. A l'inverse, dans le scénario de réduction de l'investissement en resurfaçage, 1€ économisé par le gestionnaire coûte 5.4 € aux usagers.

Nous proposons également une notion de « rentabilité sanitaire » marginale, soit un rapport des années de vie économisées monétarisées par la somme des dépenses supplémentaires investies en entretien par rapport à la référence : nous montrons que chaque euro supplémentaire investi en resurfaçage permettrait d'économiser entre 420 et 710 euros en vie humaine (valeur tutélaire de la vie humaine selon l'approche du rapport Quinet et indexée au temps). Dans notre exemple, cette rentabilité marginale maximale s'obtient en passant de 2 à 3 resurfaçages sur 39 ans, soit d'une durée de vie des surfaces de 13 à un peu moins de 10 ans. Au contraire dans le cas d'une diminution par deux de l'investissement, 1€ économisé par rapport à l'entretien classique coûte 1100 € en vies humaines.

Le troisième traitement graphique présente les tendances continues (virtuelles) d'évolution des gains pour l'ensemble des parties prenantes du transport routier selon la durée s'écoulant entre deux resurfaçages. Il met en évidence une non linéarité à la durée du cycle de resurfaçage de quatre types de gains : la production économique, le temps gagné, l'économie pour les gestionnaires, et l'économie globale pour la société. Il donne à penser que le modèle économique de l'entretien routier devrait être modifié afin d'aligner les intérêts financiers aux intérêts macroéconomiques et environnementaux en particulier.

En quatrième traitement, nous nous sommes intéressés à la constitution des résultats de comparaison absolue, puis des gains et des pertes selon le niveau d'investissement en entretien des autoroutes, afin de comprendre les phénomènes sous-jacents à leur constitution et, in fine, les leviers d'un entretien adapté aux enjeux du développement durable. Les indicateurs qui dépendent de plusieurs systèmes (en dehors du coût global) sont les deux indicateurs macroéconomiques, les trois indicateurs environnementaux et le temps perdu. Sur les trois indicateurs environnementaux – santé, biodiversité, ressources –, 100 % des impacts sont causés par le sous-système « carburant », ce qui recoupe bien

les résultats de la littérature sur le sujet des routes à fort trafic. La part portée par le sous-système « pneumatique », quand elle est non négligeable, est relativement stable. On constate, sur l'ensemble des scénarios, la part majoritaire occupée à faire le plein en carburant dans le temps passé par les usagers des véhicules particuliers: entre 80 % et 85 % du temps passé total. Les résultats sur la constitution des gains sont plus pertinents pour orienter la décision : l'intensité des travaux routiers ne représente pas un levier environnemental direct en tant que tel puisque la part des dommages environnementaux portés par les travaux quel que soit le scénario d'entretien évalué est négligeable. En revanche, il permet des gains environnementaux indirects prépondérants du fait de son impact sur les consommations en carburant. L'intensité des travaux en entretien est le principal constituant des indicateurs d'emploi et de production en France, pour environ 80 % de la somme des valeurs absolues des impacts des sous-systèmes. Les modifications de consommation de carburants supportent quant à elles environ 10 à 20 % des gains ou pertes macroéconomiques respectivement pour une diminution de 50% ou une augmentation de 50 à 300% de la cadence de resurfaçage.

Enfin, notons le faible impact sanitaire obtenu relatif au bruit routier, notamment par comparaison aux effets liés aux émissions de substances physiques nocives dans l'environnement du système. Rappelons toutefois les incertitudes fortes sur ce nouvel indicateur, notamment liées aux lois d'évolution acoustique des revêtements, et calculé d'après les FC d'une thèse récente (Meyer 2017). C'est la raison pour laquelle nous avons décidé de ne pas agréger cet impact aux autres effets sanitaires, malgré leur unité commune (DALY). Les résultats laissent toutefois penser que la gêne acoustique aux riverains reste un problème mineur dans le cas des autoroutes interurbaines – que la population ait pu éviter de s'implanter dans les zones problématiques ou que les lois contre le bruit soient efficaces – puisque le dommage à la santé humaine généré par la pollution des milieux sur toute la *supply chain* de l'entretien routier est beaucoup plus élevé. Cela nécessite évidemment d'être vérifié.

4.2 Résumé technique des résultats d'analyses de sensibilité

Des analyses de sensibilité sur les caractéristiques de la route et de son entretien ont été testées afin de confirmer ou d'infirmer les tendances mises en évidence sur le cas autoroutier étudié. Elles portent sur le niveau de trafic, les techniques routières choisies, et la vitesse de dégradation de l'état de surface.

Tout d'abord, nous avons testé le modèle, *ceteris paribus*, sur le trafic moyen journalier annuel, avec un rapport ½, 2, et 3 par rapport au trafic réel d'environ 10 000 véhicules par jour et par sens considéré dans le scénario de base. Quatre groupes de gains aux comportements similaires par rapport à l'évolution du trafic apparaissent : un groupe de gains parfaitement proportionnels au trafic incluant recettes fiscales, économies pour les usagers, temps gagné et réduction de l'impact sanitaire du bruit, un deuxième groupe de gain au comportement un peu plus sensible au trafic constitué des indicateurs environnementaux, un troisième groupe de gains faiblement sensible au niveau de trafic comprenant gain macroéconomiques et économie globale, et enfin le gain en termes d'investissement pour le gestionnaire insensible au trafic.

Ensuite, nous avons testé la variation des résultats selon la technique routière utilisée sur l'autoroute : BBSG, BBUM, ESU bicouche pré-gravillonnée (mêmes lois de dégradation d'IRI et rapidité du chantier identique). Une caractéristique importante qui les différencie est l'épaisseur du revêtement mis en œuvre. Trois indicateurs ne sont pas concernés par une modification du revêtement: les économies aux usagers, le temps perdu, les recettes fiscales. Les gains environnementaux ne sont pas non plus affectés visiblement par la technique de resurfaçage utilisée, même avec une variante ESU, qui est pourtant bien plus sobre environnementalement. L'essentiel de l'enjeu environnemental lié à l'entretien routier est le niveau de consommation des véhicules engendré. Enfin, quatre types de gains

sont fortement sensibles à la technique utilisée : les deux gains macroéconomiques, l'économie globale et le gain pour le gestionnaire.

Enfin, nous avons étudié la sensibilité de notre modèle au paramètre de vitesse de dégradation de l'IRI en fonction du temps, vitesse fixée à 0.05 m/km.an dans le scénario de base et affectée d'un facteur ½, 2 ou 3, correspondant à des vitesses de dégradation de 0.025 m/km.an, 0.10 m/km.an, et 0.15 m/km.an. Des études statistiques des niveaux de l'IRI simulés selon nos lois de dégradation du revêtement et d'effet des travaux de resurfaçage ont également été effectuées afin de tester la vraisemblance des variantes choisies. Les résultats de sensibilité sont proches de ceux obtenus dans l'étude de sensibilité au trafic. Notons que la simulation de l'IRI à vitesse de dégradation deux fois plus lente que dans le cas de base semble plus proche des valeurs constatées sur les données réelles de notre autoroute que la simulation de l'IRI dans le cas de base, la vitesse de dégradation de ce dernier cas ayant été choisie en se basant sur notre étude bibliographique. Ces résultats sont donc particulièrement importants et nous les détaillons. Les gains et pertes à la fois environnementales et financières pour les usagers sont à peu près proportionnels au ratio appliqué à la pente de dégradation d'IRI, tandis que les autres indicateurs de changent pas (Figure 85, Figure 91). Par rapport au modèle de base, la diminution par deux de la vitesse de dégradation d'IRI diminue environ par deux à la fois les pertes (resp. gains) de recettes fiscales et gains (resp. pertes) des usagers et de l'environnement lors d'une augmentation (resp. diminution) de l'investissement en resurfaçage. Le niveau de rentabilité des scénarios d'augmentation ou diminution d'investissement routier sont également deux fois moins importants (en valeur absolue) (Figure 89, Figure 90 Vs Figure 107, Figure 108) : on observe une rentabilité financière maximale pour les usagers de 2€ par euro supplémentaire investi (scénario +50% d'investissement, DVS = 9.75 ans), et une « rentabilité sanitaire humaine » maximale de 400 €/€ investi (même scénario). Une diminution par deux de l'investissement implique au contraire 3€ de perte aux usagers et 600€ de perte humaine par euro économisé. Alors que le modèle de base mettait en évidence un optimum financier de durée de vie de surface inférieur ou égal à 5.6 ans pour le système d'acteur {SCA+usagers} et entre 5.6 et 9.75 ans pour le système financier complet, cette analyse de sensibilité suggère un optimum financier de durée de vie de surface autour de 8 ans pour le premier système et un optimum entre 8 et 13 ans pour le système complet.

5 Conclusion

Cette étude de cas montre le caractère dimensionnant, pour la performance durable des politiques de resurfaçage, de l'interaction chaussée-véhicule : en cela, notre hypothèse de travail de thèse est validée pour une autoroute à 20 000 UVP/jour ou plus. Il conviendrait de regarder, sur routes à plus faible trafic, à partir de quel seuil les conséquences de cette interaction deviennent négligeables.

Notre étude met en évidence une certaine non-linéarité du système étudié : comme la plupart des systèmes physiques, le système de l'entretien routier est plutôt non linéaire. Mathématiquement, un système de comportement non linéaire est un système qui ne satisfait pas le principe de superposition, i.e. dont les sorties ne sont pas proportionnelles aux entrées. Cela s'explique par le périmètre large de notre évaluation, qui tient compte d'effets inverses dont les rapports de proportionnalités et les sensibilités sont inégaux pour chaque indicateur évalué, par exemple, pour ceux dépendant des consommations des véhicules, du fait qu'une cadence de resurfaçage plus rapide puisse réduire les consommations véhiculaires concernées, et vice versa.

On pourrait élargir la gamme de scénarios testés. Notamment, des scénarios prédictifs du second type, dit « Et si » – qui consistent à évaluer la situation si un événement spécifique se produit (Börjeson et al. 2006) – seraient bien adaptés à l'évaluation d'un fort taux de pénétration de l'électromobilité, à l'apparition massive du véhicule autonome, ou encore à une crise de certaines matières premières.

Notre étude de cas a été réalisée en faisant l'hypothèse d'une durée de vie de la chaussée fixée à 39 ans. Or, dans le cas d'une chaussée neuve, il serait opportun de se poser la question des gains et optima (multicritères) obtenus en fonction d'une durée de vie variable continue sur un intervalle donné : il serait alors possible d'optimiser à la fois la valeur de la durée de vie de la structure et le programme de resurfacement selon les optima de performance multicritère de manière intégrée (donc incluant les impacts de la construction de chaussée également). Il y a une vingtaine d'années, les dépenses relatives à la construction de la chaussée et de la couche de forme représentaient à peu près un tiers des coûts d'une route neuve, et étaient responsables de la moitié des dépenses d'entretien (Corté, Goux, et al. 1994), les dépenses d'investissement et d'entretien sur 50 ans (incluant entretien courant, entretien lourd et réhabilitation) étant à peu près comparables. Bien entendu, le contexte d'un projet étant très important, il est délicat de généraliser des ratios de dépenses. Pourtant, ces chiffres coïncident plutôt bien aux dires d'experts actuels. C'est une des raisons pour lesquelles le guide de conception et de dimensionnement des structures de chaussées publié en 1994 par le LCPC-Sétra soulignait déjà la nécessité d'une optimisation économique de la gestion patrimoniale des infrastructures routières sur la base d'un coût actualisé global de construction et d'entretien. Cependant, une approche en coût global reste difficile du fait de l'absence de lois d'évolution de chaussées robustes, et par conséquent par des scénarios d'entretien type discutables. Vingt ans plus tard, plusieurs lois d'évolution ont été développées, toujours basées sur une méthode statistique, mais si l'analyse de stratégie, qui porte sur des agrégats statistiques, peut aller jusqu'à 15 à 20 ans, la programmation pluriannuelle de travaux peut quant à elle difficilement être conduite à plus de 5 ou 6 ans (Lepert 2006).

Nous avons réalisé des études de sensibilité sur trois paramètres du modèle : niveau de trafic, technique de resurfacement, vitesse de dégradation de la surface routière. D'autres études de sensibilité pourraient être réalisées pour compléter le test de la robustesse de notre algorithme, notamment sur les taux d'actualisation des différents acteurs considérés, sur le prix du carburant (marché pétrolier) et sur le taux de pénétration de l'électromobilité.

Un taux d'actualisation différent est considéré pour, d'une part, les sociétés concessionnaires d'autoroutes, d'autre part, les ménages et l'État, et, enfin, pour la société dans sa globalité. Ces paramètres sont primordiaux pour les résultats financiers et économiques obtenus dans la mesure où ils fixent la valeur de la monnaie au cours du temps pour chaque acteur. Ils sont donc une représentation quantitative de la réalité des marchés financiers (ou systèmes financiers) impliquant chaque acteur et donc une retranscription de la valeur de la monnaie dans le temps. Évidemment, comme l'ont montré les crises économiques successives, l'évolution des marchés reste incertaine, et des phénomènes de ruptures imprévisibles peuvent apparaître. D'où l'importance de réaliser des analyses de sensibilité sur ces taux.

Concernant le prix des carburants, le marché du pétrole est un marché particulièrement instable depuis quelques décennies, bien que nous ayons mis en évidence des tendances de long terme mathématiquement assez monotones. À l'approche du pic pétrolier et du « peak everything », des augmentations radicales et turbulentes du coût hors taxe devraient apparaître et induire de l'instabilité dans le système général du transport routier. Il est probable que ce phénomène transparaisse sur tous les indicateurs puisque cela devrait se répercuter à la fois sur les pratiques de mobilité de long terme et sur les niveaux de trafic, mais également sur le gestionnaire routier qui est consommateur de liants hydrocarbonés issus des ressources fossiles.

Concernant la pénétration de l'électromobilité, la réverbération sur les stratégies d'entretien des routes est assez évident (ce taux de pénétration dépendant d'ailleurs en partie de la conjoncture du marché pétrolier). Le taux de pénétration de ces technologies est évidemment un facteur d'incertitude important qui pèse sur les résultats d'une évaluation de long terme. L'électromobilité, comme nous l'avons montré au chapitre 1, ne présente ni les mêmes impacts environnementaux, ni les mêmes

coûts financiers que ceux de la mobilité routière thermique. Son bilan est néanmoins fortement dépendant du mix électrique de long terme (aspects environnementaux, financiers et macroéconomiques). D'ailleurs, quel que soit le taux de pénétration de l'électromobilité, le système électrique considéré et son évolution sont importants dans l'évaluation : ils ont des impacts à la fois sur les indicateurs environnementaux, économiques et financiers. Or, sur 39 ans, le mix électrique est assez incertain. Nous voyons en particulier deux grandes tendances émerger dans la discussion publique : réalisation du grand carénage (prolongation du fonctionnement des centrales nucléaires en échange d'un fort investissement) ou transition vers les énergies renouvelables (scénario Négawatt par exemple). Ces deux options présentent des profils environnementaux, financiers et économiques très différents.

6 Bibliographie

- Börjeson, Lena, Mattias Höjer, Karl-Henrik Dreborg, Tomas Ekvall, et Göran Finnveden. 2006. « Scenario Types and Techniques: Towards a User's Guide ». *Futures* 38 (7): 723-39. <https://doi.org/10.1016/j.futures.2005.12.002>.
- Cherqui, Frédéric. 2005. « Méthodologie d'évaluation d'un projet d'aménagement durable d'un quartier - méthode ADEQUA ». Université de La Rochelle, LEPTAB - Laboratoire d'Etude des Phénomènes de Transfert Appliqués aux Bâtiments. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00012089>.
- Corté, Goux, et al. 1994. « Conception et dimensionnement des structures de chaussées ». Paris; Bagnaux: LCPC-Sétra.
- De Bortoli, Anne. 2014. « Eco-concevoir l'entretien routier : contexte national et identification des enjeux énergétiques du système routier ». *Revue générale des Routes RGRA*, n° 920 (mai): 67-70.
- Gobin, Christophe, et Stéphanie Chevallier. 2012. « The building signature : characterization and implementation in construction processes ». the Final Report of the European project SUPERBUILDINGS (Sustainability and performance assessment and benchmarking of buildings-Superbuildings).
- Humbert, Sebastien, Julian D. Marshall, Shanna Shaked, Joseph V. Spadaro, Yurika Nishioka, Philipp Preiss, Thomas E. McKone, Arpad Horvath, et Olivier Jolliet. 2011. « Intake Fraction for Particulate Matter: Recommendations for Life Cycle Impact Assessment ». *Environmental Science & Technology* 45 (11): 4808-16. <https://doi.org/10.1021/es103563z>.
- Jolliet, Saadé, et Crettaz. 2005. *Analyse du cycle de vie - Comprendre et réaliser un écobilan*. Gérer l'environnement. Presses polytechniques et universitaires romandes.
- Knoepfel, Peter, et Marc Münster. 2004. *Guide des outils d'évaluation de projets selon le développement durable*. Office fédéral du développement territorial (ARE)DETEC - Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication. https://www.vd.ch/fileadmin/user_upload/themes/environnement/developpement_durable/fichiers_pdf/ARE_outils_evaluation.pdf.
- Lepert. 2006. « Gestion technico-économique des infrastructures routières ». *Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées*, n° 261-62: 3-23.
- Meadows, Donella H., et Club of Rome, éd. 1972. *The Limits to growth; a report for the Club of Rome's project on the predicament of mankind*. New York: Universe Books.
- Meyer, Rodolphe. 2017. « Development of time dependent characterization factors for life cycle impact assesment of noise emissions from mobility ». Luxembourg: Luxembourg Institute of Science and Technology (LIST) - Université de Cergy-Pontoise.
- Quirion, Philippe. 2013. « L'effet net sur l'emploi de la transition énergétique en France : une analyse input-output du scénario négaWatt ». Document de travail No 46-2013. CIRED. <http://www2.centre-cired.fr/IMG/pdf/CIREDWP-201346.pdf>.
- Sala, Serenella, et Jessica Andreasson. 2018. « Improving Interpretation, Presentation and Visualisation of LCA Studies for Decision Making Support ». In *Designing Sustainable Technologies, Products and Policies*, édité par Enrico Benetto, Kilian Gericke, et Mélanie Guiton, 337-42. Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-66981-6_37.

Wang, Ting, John Harvey, et Alissa Kendall. 2013. « Network-Level Life-Cycle Energy Consumption and Greenhouse Gas from CAPM Treatments ». Research Report UCPRC-RR-2014-05. University of California Pavement Research Center UC Davis, UC Berkeley.

Wang, Ting, In-Sung Lee, Alissa Kendall, John Harvey, Eul-Bum Lee, et Changmo Kim. 2012. « Life Cycle Energy Consumption and GHG Emission from Pavement Rehabilitation with Different Rolling Resistance ». *Journal of Cleaner Production* 33: 86-96. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.05.001>.

CONCLUSION

Table des matières

1	Contributions de la thèse à l'évaluation dans le domaine routier	458
1.1	Apports chapitre par chapitre	458
1.2	Enseignements et recommandations sur les pratiques de resurfaçage	459
1.2.1	Vers une mécanique multipartite équitable de l'entretien routier, convergeant vers l'intérêt collectif	459
1.2.2	Des effets de levier financier et sanitaire très forts de l'entretien routier	460
1.2.3	Généralisation autoroutière des résultats par analyses de sensibilité	460
2	Portée et limites	461
2.1	Périmètre	461
2.2	Aspect systémique	462
2.3	Incertitudes et variabilité	462
2.4	Statique, dynamique et prospective	463
2.5	Calage et validation des modèles	463
3	Pistes de recherche	464
3.1	Résilience de la méthode	464
3.1.1	Priorités sociétales	464
3.1.2	Pénétrations et ruptures technologiques	465
3.2	Questionnements d'ordre méthodologique	465
3.2.1	Maille de résolution	465
3.2.2	Aspect multicritère	466
3.2.3	Représentation de l'impact au climat	467
3.2.4	Classification et pondérations	468
3.3	Approfondissement de la physique routière	468
3.3.1	Lois d'évolution d'état de surface	468
3.3.2	Lois de consommations véhiculaires selon l'état de surface	469
3.3.3	Lois de bruit de roulement	469
3.3.4	Données environnementales	470
3.3.5	Sécurité routière et état de surface	470
4	Bibliographie	470

1 Contributions de la thèse à l'évaluation dans le domaine routier

1.1 Apports chapitre par chapitre

Après avoir dressé le contexte de l'entretien des routes en France, cette thèse s'est attachée à expliquer plus finement son sujet d'étude – l'entretien routier et ses sous-systèmes (Chapitre 1), la systémique des impacts du resurfaçage de chaussée (Chapitre 2) et les indicateurs d'états de surface et de performance des routes (Chapitre 3) – pour s'y appuyer dans le développement d'une méthode d'évaluation de performance holistique (chapitre 4), nourrie de données environnementales spécialement développées pour son fonctionnement (chapitre 5), méthode dont le fonctionnement et les typologies de résultats ont été illustrés par une étude de cas autoroutière (chapitre 6).

Le caractère systémique du fonctionnement routier et de sa performance (chapitres 1 et 2), dans son interaction véhicule-chaussée, a été mis en évidence comme nœud névralgique de l'évaluation des stratégies d'entretien, dans un contexte de réduction budgétaire pour l'entretien routier et d'augmentation afférente des dégradations de surface. Ont également été mis en évidence les besoins fondamentalement interdisciplinaires nécessaires pour saisir la dynamique de l'entretien et les rétroactions se produisant au sein des systèmes géophysiques, biologiques et socioéconomiques, qui sont autant de partis pris disciplinaires pertinents pour conceptualiser les phénomènes déterminants du bien-être humain en lien avec le resurfaçage routier (chapitre 2).

Aujourd'hui majoritairement abordés de manière « monopile » du développement durable, i.e. seulement sur l'aspect environnemental, économique ou social, les méthodes et indicateurs de performance en lien avec l'objet routier et sa performance se sont dans la pratique avérés incomplets, perfectibles, ou à adapter spécifiquement à l'aide à la décision en entretien routier, malgré des normes telle que la EN NF 15804+A1 plutôt prometteuses dans leur caractère intégré de la performance des ouvrages construits (chapitre 3).

Face à ces considérations portant sur le manque d'intégration ou d'adaptation des méthodes existantes à l'entretien routier, nous avons développé un modèle d'évaluation holistique intégré dont le caractère interdisciplinaire est indéniable : basé sur des méthodes d'évaluation environnementales (Analyse de Cycle de Vie), macro- et socioéconomiques (resp. analyse de Leontief et analyse coût-bénéfice), ainsi que financières (analyse du coût global par acteur et pour la société), le modèle s'appuie en particulier sur des sous-modèles physiques ou statistiques en génie civil (techniques routières) et en acoustique (chapitre 4).

Cette méthode originale a généré le besoin de construire des données d'arrière-plan spécifiques au problème étudié et au contexte français (chapitre 5). Elle a d'abord nécessité une étude de deux indicateurs d'état de surface – l'Indicateur de Rugosité International et les Notes par Bande d'Onde – et de leurs liens, afin de permettre aux gestionnaires et décideurs de s'en saisir, les NBO étant utilisées en France au détriment de l'indicateur international d'IRI. Ensuite, un travail approfondi a été mené pour développer des données d'Inventaires de Cycle de Vie des différentes techniques de resurfaçage, des pneumatiques des différentes catégories de véhicules sur le marché français, des carburants et émissions des catégories de véhicules au cours du temps (évolution des technologies et performances) et des pièces de suspensions des différents véhicules. Ces données sont primordiales à l'évaluation environnementale par Analyse de Cycle de Vie.

Le caractère opérationnel de la méthode est ensuite éprouvé sur un cas d'étude. Il est mené sur un tronçon autoroutier de 10 km, et a permis de tirer quelques enseignements spécifiques à ce tronçon

(chapitre 6). Nous synthétisons de nouveau les enseignements spécifiques de cette étude de cas³⁹⁰, et approfondissons la réflexion vers des préconisations plus générales ci-après (1.2). Cette étude valide notre hypothèse de travail : le caractère dimensionnant de l'interaction chaussée-véhicule pour la performance durable des politiques de resurfacement pour une autoroute à 20 000 UVP/jour ou plus. Il conviendrait de regarder, sur routes à plus faible trafic, à partir de quel seuil les conséquences de cette interaction deviennent négligeables.

1.2 Enseignements et recommandations sur les pratiques de resurfacement

L'étude de cas réalisée fait la démonstration, sur un tronçon autoroutier français de 10 km et emprunté par 10 000 véhicules par jour et par sens (2x2 voies), de l'applicabilité de la méthode d'évaluation développée. Elle étudie les impacts de 5 scénarii d'investissement en resurfacement routier sur une durée de vie de chaussée de 39 ans, dont un scénario de référence où l'on resurface la chaussée tous les 13 ans, 3 scénarios d'investissement accru et un scénario d'investissement dégradé de 50%.

1.2.1 Alignement des intérêts : vers une mécanique multipartite équitable de l'entretien routier, convergeant vers l'intérêt collectif ?

Comparé au scénario de référence, l'augmentation de l'investissement en entretien a un effet positif sur la majorité des 11 indicateurs de la méthode d'évaluation. Plus précisément, nous observons les comportements contraires de deux groupes d'indicateurs par rapport au sens d'évolution de l'investissement en entretien des routes, comparé au niveau d'investissement actuel :

- corrélation positive entre investissement et sept types de gains : gains macroéconomiques, environnementaux, et sociaux
- corrélation négative pour les quatre autres types de gains : recettes fiscales, économies pour le gestionnaire, économie globale pour la société, et temps gagné par l'utilisateur.

Notons qu'il nous semble possible de modifier certains fonctionnement du système afin d'obtenir un optimum de cadence d'entretien consensuel pour davantage de parties prenantes. Dans le cas des recettes fiscales, il pourrait être envisagé de modifier les taux ou les systèmes de prélèvements afin qu'ils aillent dans le sens de l'environnement et de la macroéconomie. De plus, peut-être que la prise en compte des économies engendrées par les gains en emploi rendraient le bilan financier de l'État positif : en effet, les économies sur les versements chômage et les gains de prélèvements sociaux grâce à la création d'emploi contrebalancent peut-être la perte de recettes fiscales collectées via notamment la TICPE.

Ensuite, le gestionnaire dépense évidemment davantage en entretien routier sous scénario d'investissement accru. Soit on considère qu'il s'agit d'un service public et les seules économies du gestionnaire ne sont pas un objectif social : seul compte le bilan multi-acteur incluant les différentes parties prenantes. Soit le gestionnaire est privé, et il faut mettre en place un système de rémunération équitable pour pousser l'investissement vers l'optimum social multicritère : cela peut se négocier dans le cas des SCA dans les contrats de plan État-SCA, dans la mesure où ce bilan multicritère est quantifié, explicité, et discuté entre les différentes parties prenantes.

Le bilan d'économie globale quant à lui, calculé sous la forme d'une VAN à taux d'actualisation unique (2.5%) pour les flux financiers de l'ensemble des différents agents économiques, est un indicateur qui nous semble critiquable. Il s'inspire de la méthode du calcul socioéconomique préconisée par la

³⁹⁰ Nous reprenons les éléments clés en conclusion pour les lecteurs n'ayant pas lu le chapitre 6 dédié à l'étude de cas, de manière à en faire un texte relativement indépendant

Commission Quinet pour évaluer l'intérêt public des investissements publics (Quinet et al. 2013). Toutefois, il ne représente pas selon nous la réalité des comportements des agents économiques.

Pour finir avec le dernier des 4 indicateurs ne présentant pas de gains sous scénario d'investissement accru en entretien, le temps perdu en intensifiant l'entretien pourrait être réduit en améliorant la gestion des travaux. Dans notre étude, les travaux sont réalisés sous basculement avec réduction de voies et de vitesse, de jour et de nuit. Peut-être des améliorations peuvent-elle être apportées sur cette gestion.

Ainsi, il nous semble possible, en améliorant les modèles économiques publics et publics-privés comme gestion des travaux, d'obtenir un optimum de stratégie d'entretien consensuel entre les différentes parties prenantes du transport routier, pour une mise en cohérence de l'action publique vers un développement durable et équitable.

1.2.2 Des effets de levier financier et sanitaire très forts de l'entretien routier

Dans l'étude de base, nous avons également calculé des effets de levier de l'investissement en entretien des routes sur le développement durable. Nous avons en particulier montré que chaque euro supplémentaire investi en entretien permet d'économiser entre 2 et 3.5 € pour les usagers, tandis que dans le scénario de réduction de l'investissement en resurfaçage, 1€ économisé par le gestionnaire coûte 5.4 € aux usagers. En termes de « rentabilité sanitaire » marginale, une augmentation d'1 € de l'investissement en entretien permet d'économiser en vie humaine entre 420 et 710 €. Dans le cas d'une diminution par deux de l'investissement, 1€ économisé par le gestionnaire coûte 1100 € en vies humaines. Ces deux types de rentabilité permettent de mettre en évidence une fenêtre optimale monocritère de la durée des couches de surface entre deux resurfaçages. Cette rentabilité sanitaire est très élevée, même en considérant une forte incertitude potentielle sur les résultats, liée aux biais de calcul déjà évoqués dans le chapitre 6 (impact sanitaire mondiale Vs valeur de la vie humaine française, considérations densités de population génériques). Elle vient appuyer les constats faits à plusieurs reprises sur l'insuffisante prise en compte de la pollution de l'air dans les politiques publiques. La Cour des Comptes Européenne a récemment (septembre 2018) dénoncé une politique communautaire défailante face à ce qu'elle qualifie de « plus grand risque environnemental pour la santé des Européens »³⁹¹.

1.2.3 Généralisation autoroutière des résultats par analyses de sensibilité

1.2.3.1 Trois degrés de sensibilité notables

La question de la robustesse de la méthode proposée a également été abordée. À ce titre, trois types d'analyses de sensibilité ont été réalisées : sur le niveau de trafic, sur la vitesse de dégradation de la route, et sur la technique de resurfaçage choisie. Les conclusions qui ressortent de ces analyses sont plurielles :

- Les gains environnementaux et financiers pour les usagers sont à peu près proportionnels au niveau de trafic et à la vitesse de dégradation de la surface routière.
- La plus-value environnementale (« *endpoint* ») d'un programme d'entretien autoroutier n'est pas dimensionnée par la performance environnementale des matériaux routiers

³⁹¹ https://www.lemonde.fr/pollution/article/2018/09/11/pollution-de-l-air-l-alerte-de-la-cour-des-comptes-europeenne_5353349_1652666.html

- Quatre types de gains sont en revanche fortement sensibles à la technique utilisée : les deux gains macroéconomiques, l'économie globale et le gain pour le gestionnaire

Notons à ce propos la pertinence des résultats de l'étude de sensibilité réalisée avec une pente d'IRI de 0.025 m/km.an, qui nous paraît particulièrement importante dans la mesure où le comportement de l'IRI ainsi simulé sur 39 ans semble davantage en adéquation avec les observations de terrain. Néanmoins, s'agissant d'une vitesse de dégradation bien plus faible que celles relevées dans la littérature, nous avons préféré rester prudent sur ce paramètre et le faire varier autour d'une valeur de base plus en adéquation avec les études académiques déjà réalisées, de manière à en retirer des résultats plus génériques. En effet, il n'est pas exclu que l'autoroute étudiée ait un comportement d'IRI atypique.

1.2.3.2 Un choix des matériaux routiers sans influence sur la performance environnementale de l'entretien autoroutier

Le second point précédant constitue un élément de connaissance important. En effet, le type de revêtement choisi pour resurfer une autoroute – type et quantité de matériaux, mode opératoire des travaux – n'est pas un levier environnemental pour la performance du système autoroutier sur les trois indicateurs sélectionnés dans la méthode holistique. En réalité, il le serait en partie si nous étions en mesure de considérer des lois d'évolution de l'IRI spécifiques à chaque type de revêtement, ce qui nécessiterait des études de terrain complémentaires. Il le serait également probablement sur certains indicateurs *midpoints*, comme peut-être sur un indicateur de production de déchet solide que l'on pourrait calculer avec la méthode de caractérisation ReCiPe. Il serait intéressant d'affiner les déterminants des performances environnementales des programmes d'entretien routier sur un ensemble d'indicateurs d'ACV *midpoints*, moins agrégés que nos trois indicateurs *endpoints*.

1.2.3.3 Des études de cas dédiées nécessaires à l'appréhension des bonnes pratiques d'entretien pour les réseaux non concédés

Précisons de nouveau que les enseignements de bonnes pratiques qui ressortent de notre application du modèle sur un tronçon autoroutier sont évidemment spécifiques au type de réseau et à la France. Les conclusions sur les bonnes pratiques à adopter en termes de programmes d'entretien pour d'autres types de routes – départementales, nationales, voies express, routes communales ou encore tronçon urbains – ou d'autres contextes géographiques seraient probablement assez différentes. Ces différences sont attendues pour plusieurs raisons, par exemple la variation des vitesses de circulation des véhicules, de la composition du trafic, des niveaux de trafic, des états de surface actuels de ces réseaux, des pratiques actuelles de resurfaçage qui leur sont appliquées. Notons d'ailleurs que la méthode n'a pas été adaptée dans ce travail à l'évaluation de programmes d'entretien en milieu urbain, aux routes communales, ou encore aux réseaux étrangers.

2 Portée et limites

Cette section se focalise uniquement sur la méthode d'évaluation développée.

2.1 Périmètre

La méthode développée constitue un premier modèle original qui pourra être amélioré sur plusieurs points, dont quelques-uns sont évoqués ci-après.

Le périmètre de thèse est déjà très large, par la diversité des parties prenantes prises en compte, l'ampleur du spectre interdisciplinaire des impacts considérés, et les indicateurs à calculer. Ainsi, le

travail a été recentré sur la gestion des couches de surfaces. La méthode pourrait d'abord être appliquée à tout l'entretien routier – incluant les opérations d'entretien léger – mais cela nécessiterait des données supplémentaires et des travaux de recherche approfondis sur ces opérations. Ensuite, aucun aspect patrimonial/structurel n'a été traité. Notamment, l'effet de la dégradation des couches de surface sur les couches routières inférieures, par exemple du fait de la perte potentielle d'imperméabilité liée à la fissuration, n'est pas abordé. C'est aussi le cas de l'effet du renforcement mécanique par les couches superficielles type BB que nous n'avons pas inclus non plus dans le modèle. Nous n'avons pas non plus quantifié l'effet de la dégradation des couches inférieures sur celle des couches supérieures, bien qu'elle puisse engendrer des différences non négligeables dans les lois de dégradation de l'état de surface sur la durée de vie de chaussée. On pourrait également regretter l'exclusion des dépendances routières, et par exemple des bassins de rétention du périmètre d'évaluation, d'autant que les conséquences environnementales d'un entretien insuffisant de ces derniers dépendent de la qualité des eaux recueillies et donc des caractéristiques de la chaussée (lixiviats, etc). Finalement, élargir le périmètre d'étude à l'ensemble des objets de la route permettrait de comparer les effets des investissements routiers au sens large, avec un apport opérationnel en termes d'arbitrage financier très pertinent. Enfin, dans le cas de routes éclairées, le besoin d'éclairage dépend des propriétés photométriques des surfaces routières (coefficient de luminance), donc du matériau utilisé et de son âge : ce point ne concerne pas notre étude de cas mais pourrait être intéressant pour d'autres infrastructures routières.

Enfin, nous avons décidé, face au manque d'éléments académiques, de ne pas traiter des questions d'évaluation de la sécurité et du confort de l'usager routier. La question de la sécurité routière et de son lien avec l'état de chaussée a été évaluée de manière parcellaire par la communauté, mais les avancées dans le domaine n'ont pas suffi à permettre le développement d'un indicateur pertinent pour l'heure. La question du confort nous semble moins primordiale puisqu'elle ne met pas de vies en jeu, bien qu'elle soit importante du point de vue socioéconomique. Elle a principalement été abordée dans la littérature socioéconomique par des études économétriques, qui relèvent une part de l'attractivité supplémentaire des autoroutes par rapport aux autres routes qui s'expliquerait par le confort.

2.2 Aspect systémique

Nous avons placé au cœur de notre recherche l'action de la chaussée sur le véhicule et ses impacts, et inversement l'action du véhicule sur la chaussée via la dégradation de surface. Cependant, à l'échelle du tronçon, nous ne sommes pas allés vers les phénomènes de rétroaction qui apparaissent à plus grande échelle. Un premier exemple pourrait être l'effet rétroactif du changement climatique (capturé dans l'indicateur d'impact aux écosystèmes et à la santé) engendré par le système qui vient à son tour modifier la dégradation de l'infrastructure. Un second exemple serait l'impact de l'intensité en entretien sur l'appareil productif qui vient le modifier. La prise en compte de ces phénomènes rétroactifs pourrait constituer un travail de thèse à part entière.

2.3 Incertitudes et variabilité

Les incertitudes et la variabilité concernent à la fois les aspects physiques et les aspects prospectifs.

L'étude prospective étant réalisée sur le long terme, sa portée est nécessairement soumise à de nombreuses incertitudes qui ne seront abordées que de manière très rudimentaire par des analyses de sensibilité facteur par facteur. Un travail complémentaire conséquent pourrait porter sur l'utilisation de méthodes d'AS plus systémiques, telles que les simulations de Monte Carlo ou encore

mieux les méthodes de criblage de Morris (Faivre et al. 2013), pour faire varier simultanément une gamme plus importante de paramètres.

Notre méthode mobilise des connaissances scientifiques développées sur plusieurs dizaines d'années de recherche dans divers domaines, incluant la définition d'indicateurs de patrimoine fiables, des lois de vieillissement de chaussée, des lois d'évolution de paramètres physiques (acoustique et génie civil). Néanmoins, il est très délicat d'évaluer un système complexe. Il faudrait un nombre de variables et de paramètres importants, ce qui peut fragiliser a contrario la robustesse du modèle. Certains sous-modèles se basent sur des données d'entrée à forte variabilité : c'est par exemple le cas du modèle acoustique, incluant les parties respectivement liées aux processus physiques d'émission et de propagation du bruit routier. Les coefficients de corrélation entre indicateurs de chaussée et impacts (accidents, bruit) restent d'ailleurs souvent très faibles (globalement de 10^{-x} , « x » étant variable, à 0.5).

Certains indicateurs sont particulièrement critiquables : c'est le cas de l'indicateur d'effet sanitaire du bruit routier, en partie car les tendances d'évolution du bruit de roulement en fonction du vieillissement des revêtements sont difficiles à saisir, et les facteurs de caractérisation sont également incertains. Dans le cas de l'interurbain, on peut même actuellement se poser la question de l'intérêt de cet indicateur, la densité de population étant assez faible, et d'autant plus faible que le bruit est gênant (adaptation au contexte dans les stratégies de localisation). Cet indicateur est probablement d'autant plus important que la densité de population est élevée : en ville, l'effet de concentration ne permet pas d'éviter les zones bruyantes, bien que cela fasse partie des prix hédoniques des logements.

2.4 Statique, dynamique et prospective

Bien que visant une évaluation prospective, certaines parties du modèle sont statiques. Il s'agit par exemple de la structure économique mondiale et nationale dont les relations sont quantifiées de manière statique avec la matrice technologie utilisée dans l'analyse de Leontief. Or, les marchés, les relations entre les secteurs et les emplois sont dynamiques. On aurait pu à ce titre considérer une augmentation de la productivité comme le fait Quirion (2013). Les états physiques global et locaux du système terrestre sont également considérés comme stables, de même que les densités de population (modèles d'Analyse de Cycle de Vie et acoustique). Des progrès technologiques automobiles ont été considérés dans l'évolution du parc routier et ses consommations et émissions, ce qui n'est en revanche pas le cas pour les techniques routières. Les niveaux de fréquentation des routes ont été considérés légèrement croissants, sans ruptures technologiques particulières.

2.5 Calage et validation des modèles

Bien souvent, l'utilisation de modèles développés dans un contexte précis et effectuée dans un autre nécessite, pour améliorer la robustesse des résultats, deux opérations : le calage et la validation. Le calage consiste à ajuster les variables d'entrée et les paramètres d'un modèle de façon à ce qu'il retranscrive un set de données réelles (mesures) (Sétra 2010). La validation quant à elle consiste à confronter un second set de données réelles avec la prévision du modèle. Cela permet de vérifier que le modèle réagisse bien à une variation des données d'entrée et donc qu'il soit suffisant pour effectuer des projections (Sétra 2010).

Il y a un besoin d'ajustement complémentaire de certains modèles, et plus encore un besoin général de validation des sous-modèles utilisés dans la méthode, dans des conditions françaises. Seule une partie du travail a été faite sur le sujet, sans moyens d'expérimentation de terrain plus importants. Les

méthodes de caractérisation de l'ACV utilisées sont par exemple basées sur des études souvent partielles, relativement spécifiques à un contexte géographique et temporel, plus ou moins proche des conditions relatives aux cas étudiés dans cette thèse. De plus, aucune méthode n'a été développée pour valider les impacts environnementaux calculés par ACV.

Enfin, notons que le modèle d'évolution d'IRI (avec les travaux et hors travaux) est primordial comme nous l'avons déjà indiqué, et qu'il devra être approfondi avec un traitement statistique adapté sur données, si possible massives, de terrain. Mais le lien entre IRI et consommations véhiculaires est également central dans la méthode d'évaluation et pour les résultats: il est important de caler et valider les modèles reliant IRI à consommations véhiculaires dans des conditions françaises comme cela a été fait au Michigan pour les USA : nous détaillerons davantage le projet dans la partie « approfondissements » de cette conclusion (3.3.2).

En bref, la poursuite de ces travaux devrait inclure un calage plus fin des modèles et une validation dans le contexte français quand le modèle s'y prête.

3 Pistes de recherche

3.1 Résilience de la méthode

La résilience d'une méthode tient à la manière dont elle devient obsolète : plus cette obsolescence arrive tardivement, plus on dira que la méthode est « résiliente ».

3.1.1 Priorités sociétales

La question des évolutions sociétales est cruciale dans la résilience de notre méthode, et en fort lien avec les questions d'incertitudes, de variabilité, mais aussi de prospective déjà évoquées. D'abord, les priorités environnementales évoluent avec le temps. Les pratiques industrielles et les comportements évoluent, de nouveaux polluants apparaissent. À ce titre, les méthodes d'évaluation environnementale doivent également évoluer (ICV, méthodes de caractérisation, voire indicateurs à actualiser régulièrement dans le cas de ceux orientés problèmes (i.e. « *midpoint* »)) pour répondre aux nouveaux enjeux dans un contexte socioéconomique différent. En particulier, un développement massif de l'usage des agrocarburants nécessiterait probablement un indicateur d'usage des sols par exemple, notamment dans le cas de concurrences entre productions alimentaires potentiellement insuffisantes et productions énergétiques, comme cela s'est déjà produit en Amérique centrale et du sud.

Ensuite, les priorités sociales et économiques sont en particulier façonnées par les gouvernements et les institutions, influençant également les comportements. En effet, les comportements de mobilité pourraient également être fortement mis sous pression et influencés par les gouvernements si le risque climatique devient plus reconnu et trouve une place réelle dans la gouvernance internationale. Cela pourrait influencer à la fois la longueur et l'intensité des déplacements, les technologies de mobilité des personnes et des marchandises (électromobilité ?), en lien avec les politiques d'autres secteurs fortement imbriqués comme celui par exemple de l'énergie.

A l'inverse, le changement climatique pourrait avoir un fort impact de rétroaction sur les doctrines routières, par exemple sur la durabilité des structures et matériaux en climats extrêmes, sur la performance des systèmes de drainage qui est primordiale pour la longévité des structures, du fait des vagues caniculaires, des inondations, des tempêtes, de la hausse du niveau de la mer et de la dégradation du pergélisol. Quelques rapports ont été publiés sur l'adaptation des transports au

changement climatique. L'Agence Européenne de l'Environnement considère que l'impact des vagues de canicules et des précipitations extrêmes sur les infrastructures routières devrait se faire sentir dès 2025 en Europe, avec des effets très négatifs à horizon 2080 (European Environment Agency 2014). Un guide sur l'entretien des chaussées sous l'influence de changements climatiques a été publié par le Département des Transports du Royaume-Uni en 2008 (Willway, Reeves, et Baldachin 2008). La Norvège a révisé ses manuels et guides techniques pour le transport routier en tenant compte de ces changements en 2013 tandis que la Suède a mené un projet d'identification des sections routières sensibles aux inondations (European Environment Agency 2014).

3.1.2 Pénétrations et ruptures technologiques

Le rapport Rethink X est un travail prospectiviste pour le secteur du transport entre 2020 et 2030 qui a fait grand bruit au moment de sa publication au printemps 2017 (Arbib et Seba 2017). Utilisant un modèle tout à fait opaque, ses auteurs ont prévu qu'à horizon 2030, 95% du transport de passagers aux USA serait réalisé en « Personal Rapid Transit pooling », un système de navettes autonomes partagées, réduisant le parc de véhicules thermiques particuliers de 60%, ceux-ci ne réalisant plus que 5% des véhicules-kilomètres. L'intensité d'usage des véhicules augmenterait d'un facteur 10, pour une production de véhicules chutant de 70% par an. Le système de partage de véhicules et le changement de technologies permettrait de diviser le coût kilométrique par 4, engendrant un équilibre du prix du baril de pétrole autour de « 25.4 » dollars. Ce futur s'assortirait d'un fort report modal des trajets en courts courriers, bus et vélo vers le PRT. Si nous ne sommes pas en capacité d'appréhender la qualité du modèle et de ses résultats, faute de transparence sur le fonctionnement du modèle, ce travail illustre, peut-être de manière fantaisiste, comment notre futur proche pourrait être très différent d'une linéarité du monde connu. Si de tels changements, ou d'autres, se produisaient, les politiques de développement et d'entretien des infrastructures routières et de transport en général devraient être complètement repensées.

Si les parts modales sont un paramètre primordial pour ces politiques publiques, l'évolution des matériaux – matériaux alternatifs et par exemple biosourcés, recyclage – et surtout des énergies de traction n'est pas en reste. Si les impacts environnementaux de l'exploitation des véhicules venaient à chuter, particulièrement ceux de l'énergie de traction et dans une moindre mesure ceux des pneumatiques, les arbitrages d'entretien en seraient changés, car la contribution des travaux d'entretien aux impacts environnementaux croîtrait.

Enfin, plusieurs chercheurs et constructeurs travaillent au développement de la voiture volante. Si le bilan énergétique (voire acoustique) ne semble pas peser en sa faveur, une telle voiture nécessiterait évidemment de repenser totalement les infrastructures telles que nous les connaissons. Dès lors, comment gérer un « risque patrimonial » d'obsolescence des infrastructures ? Faudrait-il les laisser se dégrader, continuer à entretenir tout le réseau, ou en abandonner une partie ?

3.2 Questionnements d'ordre méthodologique

3.2.1 Maille de résolution

La question de la bonne « maille de résolution » du modèle se pose à plusieurs égards. Dans le cas des données d'état de surface routière, on a utilisé des données moyennées par sous-tronçon de 10m, et l'on pourrait se poser la question de l'influence de cette agrégation sur les résultats finaux. Dans ce cas, la question est à aborder dans l'étude de calage-validation des modèles de consommation véhiculaire ou de tout autre sous-modèle utilisant l'IRI comme donnée d'entrée. Le fait de ne considérer que les données de la voie lente, et de moyenner les valeurs bi-trace est également

questionnable. En réalité, les véhicules balayent la route dans toute sa largeur, et les valeurs d'indicateur varient en deux dimensions. Cela a nécessairement un impact sur la quantification, bien que la majeure partie des effets se produise en bandes de roulement.

3.2.2 Homogénéité des sous-modèles méthodologiques

Un travail transdisciplinaire soulève nécessairement la question de l'homogénéité des hypothèses et périmètres considérés dans les différentes parties du modèle. Nous pouvons relever plusieurs hétérogénéités dans notre méthode d'évaluation.

D'abord, l'indicateur de bruit se calcule selon une variable temporelle et non pas selon l'IRI, contrairement aux autres indicateurs dépendant de l'état de surface. Il serait plus correct de se baser sur la même variable pour calculer ces indicateurs. Toutefois, l'évolution de l'IRI se calcule par rapport à une variable temporelle aussi. A l'inverse, on pourrait envisager de tout baser sur la progression de l'IRI (ou d'un autre indicateur plus adapté), y compris le choix des stratégies de resurfaçage – aujourd'hui basé sur la variable temporelle (durée qui s'écoule entre deux opérations) : le déclenchement de l'opération de resurfaçage pourrait se faire selon un seuil de niveau d'IRI, comme cela est proposé dans plusieurs études dans la littérature.

L'indicateur de bruit ne reflète que l'impact aux riverains de la route évaluée, et omet l'impact du bruit généré sur l'ensemble de la supply chain relative à l'entretien routier (côté resurfaçage et consommations véhiculaires), tandis que les autres indicateurs environnementaux considèrent l'ensemble de la supply chain. De plus, l'impact du bruit à la biodiversité n'est pas pris en compte. Compte tenu du faible impact sanitaire du bruit obtenu sur l'étude de cas autoroutière, on peut penser qu'homogénéiser l'approche, si cela s'annonce ardu en l'état de la connaissance scientifique (manque de données d'ICV pour l'ACV du bruit), aurait peu d'influence sur les résultats obtenus en termes sanitaires. La question se pose pour d'autres types de routes, et également pour le dommage à la biodiversité.

Ensuite, on tient compte de l'effet des pollutions sur la santé des riverains, avec des densités de population par défaut – autant pour l'indicateur de bruit via les facteurs de caractérisation de Meyer (2017) que pour l'indicateur de dommage à la santé humaine via les facteurs de caractérisation d'IMPACT World+. Ces densités sont différentes et plus ou moins adaptées à l'étude de cas. De plus, on pourrait imaginer inclure les dommages sanitaires aux usagers également. En effet, aucune étude n'a évalué l'impact sanitaire sur l'usager routier de la pollution de l'air de l'habitacle, notamment en zones congestionnées par des travaux de resurfaçage. Or, la densité de personnes est forte dans une telle zone, de même que la pollution atmosphérique.

3.2.3 Aspect multicritère

La question du choix du ou des indicateurs dans une méthode d'évaluation ayant pour objectif de soutenir la prise de décision est fondamentale, mais reste sans réponse.

Nous avons fait le choix d'une méthode multicritère, non pondérée, basée sur une évaluation technico-économique élargie à l'essentiel des parties prenantes. Elle se veut « démocratique » ou responsable, avec comme objectif la recherche de l'utilité publique. Par la recherche d'une quantification réaliste et holistique, elle tente de mettre de côté les aspects non rationnels de la prise de décision mais qui ont une grande importance pratique : jeux politiques, lobbying, et aspects institutionnels en général.

Selon certains auteurs, l'analyse multicritère serait « l'antithèse de la recherche d'une solution optimale fondée sur la maximisation d'une fonction objectif unique. [Elle] cherche au contraire à satisfaire au mieux un nombre de critères aussi grand que possible tout en évitant de sélectionner des projets qui apparaissent franchement mauvais sur certains critères particuliers, même si ces critères

sont en petit nombre » (Blanquier 1984). Cependant, il reste nécessaire de constituer un set d'indicateurs restreint afin de produire des résultats d'évaluation « lisibles » et compréhensibles, sans risquer le « décrochage cognitif » du lecteur que nous avons déjà abordé. Grand sujet de discussion sur l'évaluation, toute sélection d'indicateurs reste relativement arbitraire. Cette sélection est d'autant plus difficile dans un modèle comme le nôtre, à la croisée des sciences pour l'ingénieur (génie civil et acoustique) et des sciences humaines et sociales (évaluation avec un but final de bien-être humain).

Par cette nécessité d'un nombre d'indicateurs relativement restreint, nous avons fait le choix d'indicateurs environnementaux orientés dommage (i.e. « *endpoint* »), peut-être plus incertains (Hauschild et al. 2013) et moins précis dans l'interprétation que l'on peut en faire que les indicateurs *midpoint*. Ces indicateurs *midpoint* sont par ailleurs utilisés dans les évaluations purement ACV de systèmes de transport (de Bortoli, Féraïlle, et Leurent 2017), selon une sélection d'ailleurs plus proche des préconisations de catégories d'impacts de la norme ISO 15643. Ainsi, deux jeux d'indicateurs pourraient être proposés, le jeu sélectionné dans la méthode que nous présentons ici pour une approche holistique « décideur » avec des indicateurs physiques et non monétaires en nombre « correctement restreints », et un ensemble d'indicateurs d'ACV plus complet pour les incursions quantitatives plus détaillées sur la thématique environnementale.

3.2.4 Représentation de l'impact au climat

L'absence d'un indicateur de changement climatique pour représenter les enjeux environnementaux d'une décision relative au transport routier est évidemment un point de questionnement presque systématique pour les décideurs et l'opinion publique. L'urgence environnementale est tellement assimilée au changement climatique, souvent avec des confusions entre polluants locaux et gaz à effet de serre, qu'une méthode d'évaluation durable peut difficilement être envisagée comme pertinente dans le sens commun sans indicateur spécifique d'impact au changement climatique. Néanmoins, que la posture environnementale choisie soit anthropocentrique ou biocentrique (cf. chapitre 2), le changement climatique pose problème à deux points de vue : il met en péril le maintien de la nature telle qu'elle serait sans intervention humaine, ainsi que le bien-être humain. Ce maintien de la nature telle qu'elle serait sans intervention humaine est bien traduit par l'indicateur de dommage à la biodiversité. Les enjeux de bien-être humain sont quant à eux représentés par l'indicateur de santé humaine, complété par l'indicateur de dommage à la biodiversité qui est évidemment lié à la qualité des services écosystémiques apportés à l'homme par le fonctionnement des systèmes naturels. Ainsi, l'ajout d'un indicateur de changement climatique n'aurait pas plus de sens environnemental que ce qui est déjà représenté par l'ensemble d'indicateurs actuellement proposé. Un effort de pédagogie doit évidemment être fait pour expliquer cela aux lecteurs des résultats de la méthode.

D'un point de vue quantitatif en effet, le changement climatique contribue fortement aux impacts sur la santé et sur la biodiversité calculés dans les indicateurs *endpoint*. À titre d'exemple, nous avons calculé les parts des impacts totaux portés par le changement climatique d'un procédé d'utilisation de voiture à essence, dans des conditions de circulation françaises moyennes (consommation et émissions issues du handbook de l'AEE). Ce calcul met en évidence la prépondérance de la consommation de carburant et des émissions relatives à l'utilisation des véhicules dans les impacts environnementaux, en absolu comme en relatif, des politiques d'entretien des routes. Nous avons comparé les contributions du changement climatique aux deux indicateurs *endpoint* selon deux méthodes de caractérisation : ReCiPe et IMPACT World+ (V1.36). Le traitement des résultats de ReCiPe montre des contributions respectives de 69% et 86% du changement climatique aux impacts sur la santé et sur la biodiversité. IMPACT World+, plus récent, fait ressortir des contributions respectives de

51% et 76%. Bien que ces contributions diminuent avec une méthode de caractérisation plus récente, le changement climatique présente une part majoritaire des impacts sur la santé et la biodiversité, et est particulièrement crucial dans la préservation des écosystèmes. Ces résultats sont corrélés avec les analyses menées par les développeurs de la méthode (Bulle et al. 2019).

3.2.5 Classification et pondérations

Dans la pratique, les méthodes de classification des indicateurs comme celles de pondération avant agrégation en un indicateur unique sont utilisées afin de faciliter la prise de décision. Ces méthodes sont variées, et souvent complexes (voire par exemple les méthodes ELECTRE I à IV (Figueira, Mousseau, et Roy 2016)). L'utilisation de facteurs de pondération est parfois effectuée en ACV.

La préconisation d'une de ces méthodes nous semble délicate dans une approche académique, dans la mesure où elles recouvrent des choix sociaux complexes, parfois avec une transparence qui pourrait être améliorée. Dans le cas des approches de classification, le paradoxe de Condorcet montre que, dans une société d'individus rationnels et donc dont les préférences sont transitives, un classement rationnel individuel des préférences peut tout de même mener à un comportement de groupe irrationnel, i.e. à une impossibilité de choix rationnel (phénomène cyclique) (Arnsperger et Van Parijs 2007). Ainsi, aucune classification ne pourrait réellement satisfaire à l'intérêt collectif, même dans le cas d'une rationalité des individus, et il nous semble nécessaire de conserver un caractère multicritère des évaluations afin de représenter tous les intérêts sociétaux et de permettre le débat démocratique.

Les méthodes de pondération quant à elles suggèrent implicitement la substituabilité des impacts (Choo, Schoner, et Wedley 1999; Munda 2007), puisque tous les indicateurs vont être retranscrits en une même unité. La monétarisation est par exemple un type de pondération plus ou moins rationnel basé sur des valeurs de référence ou valeurs tutélaires qui permettent de transformer chaque impact en valeur monétaire. Dans le cas de la valeur tutélaire du coût de la vie par exemple, que nous avons utilisée dans notre calcul de rentabilité sanitaire de l'investissement en entretien routier, deux approches sont possibles pour calculer une valeur tutélaire : la propension à payer (pour sa vie) ou la perte pour la société (productivité). Ainsi, il n'y a pas de valeur unique d'une vie humaine, non seulement du fait du parti pris philosophique derrière la quantification monétaire de la valeur d'une vie qui oriente vers une méthode de calcul, mais également du fait des différences entre les pays. Ainsi, la valeur de la vie statistique en France vaut davantage qu'en Grèce ou aux USA, et on pourrait, dans l'intérêt collectif, troquer une vie humaine (3M€) contre une économie de 200 000h (à 15€/h), soit 22 années de vie.

Pour contrer la complexité de lecture des analyses multicritères sans utiliser la classification ou la pondération, il existe des techniques d'amélioration de la lisibilité des résultats d'analyse par traitement graphique adéquat. Une manière simple d'améliorer l'appréhension des résultats peut être de les organiser par blocs thématiques. Toutefois, le risque reste que le lecteur ne s'intéresse qu'à une partie des blocs au détriment des aspects qui l'intéressent moins. Dans tous les cas, une classification cognitive s'instaure automatiquement dans la lecture humaine.

3.3 Approfondissement de la physique routière

3.3.1 Lois d'évolution d'état de surface

L'état de surface de la chaussée est modifiée sous l'effet des travaux d'entretien et également hors travaux sous l'effet des agressions mécaniques et météorologiques. Il est primordial d'étudier à l'échelle nationale ces lois d'évolution d'IRI. L'évolution sous travaux devra entre autres être étudiée

selon les catégories de techniques (épaisseur entre autres). L'évolution hors travaux devra être analysée sur plusieurs paramètres, dont par exemple la nouvelle classification HiTi relative aux niveaux de trafic et de rigueur hivernale développée par la DGITM pour le RN, et qui ressemble à la classification utilisée dans les travaux en cours sur le sujet réalisés à l'Université de Californie, Davis (Tseng 2012; T. Wang, Harvey, et Kendall 2013). Rappelons que chaque route se comporte de manière spécifique (cf. échec de la définition de lois de dégradations de long terme satisfaisantes), que l'évolution d'un tronçon dépend de son état originel, et que la modification du climat qui marquera probablement fortement le XXIème siècle ne devrait pas simplifier les approches (cf. aspect systémique déjà évoqué). Les algorithmes génétiques pourraient être une piste intéressante, dans la mesure où ceux-ci pourraient apprendre de l'historique propre de la chaussée. Il pourrait être intéressant de tester l'utilisation du deep learning, basé sur un jeu de données massives (issues de l'auscultation classique des gestionnaires ou de données smartphones comme testé en France avec le projet Miranda), afin de sortir des lois temporelles fiables qui permettraient in fine de confirmer les meilleures pratiques à adopter pour un entretien routier durable.

3.3.2 Lois de consommations véhiculaires selon l'état de surface

Toutefois, si l'évolution de l'état surfacique est un paramètre clé de notre modèle, la qualité de modélisation des effets de surconsommation des véhicules qui s'en suivent est tout aussi primordiale dans le calcul de performance holistique final. Il conviendrait à ce sujet de valider les lois adaptées dans ce travail de thèse dans les conditions françaises, par une expérimentation sur piste d'essai comme réalisé aux USA (Chatti et Zaabar 2012) ou encore mieux en conditions réelles.

Pour aller plus loin, on pourrait également questionner le choix de l'IRI comme variable d'entrée des lois de consommation véhiculaire. Cet indicateur d'état de surface de chaussée n'a pas été développé pour calculer ces effets mais pour donner un étalon de comparaison internationale de niveaux de service. Il serait peut-être possible de déterminer un indicateur mieux adapté dans sa sensibilité aux effets que l'on souhaite quantifier, en analysant les corrélations directes du profil routier.

3.3.3 Lois de bruit de roulement

Le calcul de notre indicateur acoustique sanitaire se base sur des lois d'effet du vieillissement de chaussée sur le niveau de bruit de roulement. Ces lois ne sont donc pas basées sur un indicateur d'état de chaussée mais sur une variable temporelle (la base de données de l'ex-LRPC de Strasbourg fournit des statistiques d'âge des revêtements). Ainsi, le gain en termes de réduction de l'impact sanitaire du bruit n'est pas sensible à la vitesse de dégradation de surface. Il conviendrait d'étudier la sensibilité du bruit de roulement au niveau d'IRI et/ou d'autres indicateurs d'état de surface, par exemple incluant la macrotecture en sus de la mégatexture et de l'uni puisque celle-ci est importante dans le bruit de roulement (chapitre 1). Une base de travail pourrait être le travail de Descornet et Sandberg : ceux-ci ont cherché à évaluer l'évolution du bruit en fonction de la texture de la chaussée (Descornet et Sandberg 1980; U Sandberg et Descornet 1980). De leur étude statistique a émergé une formule simple et juste en première approximation donnant une estimation du niveau de bruit de roulement à partir des niveaux de texture dans les bandes d'octave correspondantes et appelée relation de Descornet-Sandberg. Cette relation n'est pas applicable aux textures négatives (par exemple du type enrobé drainant) et nécessiterait d'être approfondie afin d'obtenir les lois couvrant tous les types de revêtements français, en sus d'en vérifier son actualité.

3.3.4 Données environnementales

La part donnée aux aspects environnementaux est importante dans la méthode, avec 1/3 des indicateurs couvrant les dommages principaux qui mettent en péril le bien-être humain. Afin d'améliorer l'évaluation de ces dommages, un soin particulier doit être apporté aux données d'ICV. On penserait volontiers à l'actualisation d'ICV routiers, néanmoins, on a montré que l'influence des consommations et émissions des opérations d'entretien sur l'impact environnemental sont tout à fait négligeables dans la problématique d'entretien autoroutier selon notre modèle. Raffiner les ICV véhiculaires est donc la priorité – en tout cas pour l'évaluation des politiques d'entretien autoroutier, peut-être moins pour d'autres types de routes – et en particulier ceux des énergies de traction, dont les carburants et leur combustion, avec un aspect prospectif encore plus fort que ce que nous avons pu inclure dans notre travail. La question du véhicule électrique et de ses ICV apparaît également comme un point de prospective environnementale important, qui pourrait renverser les éléments conclusifs amenés par l'étude de cas que nous avons réalisée. Plus généralement, les données développées le sont majoritairement pour la période temporelle actuelle : il serait intéressant d'avoir des ICV dynamiques.

3.3.5 Sécurité routière et état de surface

Nos lectures académiques sur le lien entre état de surface routière et sécurité ne se sont pas avérées concluantes pour développer un indicateur pertinent dans la méthode. Un travail statistique croisant diverses conditions d'accidents routiers matériels, corporels et mortels, dont l'état de surface de l'infrastructure, pourrait permettre de vérifier les premiers résultats issus des enquêtes REAGIR des années 1980. Nous ignorons si les fichiers d'accidents routiers comprennent des données d'état de surface.

Une étude complémentaire serait également intéressante afin de cerner les impacts macroéconomiques de l'accidentologie routière. Un accident a des effets macroéconomiques divers, selon le fonctionnement d'un pays (solidarité sociale, système de santé, économie), qui peuvent être positifs comme négatifs. En effet, il nécessite l'intervention de services publics mais également privés. On pourrait calculer cet effet global sur la production et l'emploi en s'inspirant d'une analyse de Leontief en se basant sur des statistiques par type d'accident (mortel, corporel, matériel) pour déterminer les consommations directes dans les différents secteurs de l'économie.

3.3.6 Qualité des données et incertitudes

Sur les différents points cités ci-dessus, si l'étude de cas menée dans cette thèse propose des analyses de sensibilité paramètre par paramètre qui permettent d'extraire des tendances générales de bonne pratique durable d'entretien des autoroutes, des méthodes de gestion et d'analyse de l'incertitude (certaines déjà citées en conclusion en 2.3) mais aussi d'évaluation de la qualité des données d'entrée pourraient être déployées dans la méthode d'évaluation, afin de s'assurer de la qualité des résultats d'évaluation. Particulièrement, on aurait pu utiliser la matrice du Pedigree pour hiérarchiser les priorités de régionalisation des ICV et évaluer la qualité des ICV existants et développés pour le marché français. De manière générale, estimer l'incertitude en entrée et la propager tout au long de la chaîne d'évaluation pour estimer l'incertitude en sortie est important afin de valider la prise de décision soutenue par cette évaluation.

4 Bibliographie

Arbib, James, et Tony Seba. 2017. « RethinkX - Disruption, Implications and Choices - Rethinking Transportation 2020-2030 - The Disruption of Transportation and the Collapse of the Internal-

Combustion Vehicle and Oil Industries ». https://static1.squarespace.com/static/585c3439be65942f022bbf9b/t/591a2e4be6f2e1c13df930c5/1494888038959/RethinkX+Report_051517.pdf.

Arnsperger, Christian, et Philippe Van Parijs. 2007. *Éthique économique et sociale*. Paris: La Découverte.

Blanquier, A. 1984. *Sélection des investissements aux niveaux national et régional*. Sciences économiques. Paris: Dunod.

Bortoli, Anne de, Adélaïde Féraïlle, et Fabien Laurent. 2017. « Life Cycle Assessment to support decision-making in transportation planning : a case of French Bus Rapid Transi ». In *Proceedings of the Transportation Research Board 2017*. Washington DC, USA. <https://trid.trb.org/view.aspx?id=1439665>.

Bulle, Cécile, Manuele Margni, Laure Patouillard, Anne-Marie Boulay, Guillaume Bourgault, Vincent De Bruille, Viêt Cao, et al. 2019. « IMPACT World+: A Globally Regionalized Life Cycle Impact Assessment Method ». *The International Journal of Life Cycle Assessment*, février. <https://doi.org/10.1007/s11367-019-01583-0>.

Chatti, Karim, et Imen Zaabar. 2012. *Estimating the effects of pavement condition on vehicle operating costs*. NCHRP report 720. Washington, D.C: Transportation Research Board. http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/nchrp_rpt_720.pdf.

Choo, Eng U., Bertram Schoner, et William C. Wedley. 1999. « Interpretation of Criteria Weights in Multicriteria Decision Making ». *Computers & Industrial Engineering* 37 (3): 527-41. [https://doi.org/10.1016/S0360-8352\(00\)00019-X](https://doi.org/10.1016/S0360-8352(00)00019-X).

Descornet, G, et U Sandberg. 1980. « Road surface influence on tire/road noise. Part II ». In , 261-72. Miami.

European Environment Agency. 2014. *Adaptation of Transport to Climate Change in Europe: Challenges and Options across Transport Modes and Stakeholders*. Luxembourg: Publications Office. <http://bookshop.europa.eu/uri?target=EUB:NOTICE:THAL14008:EN:HTML>.

Faivre, Robert, Bertrand looss, Stéphanie Mahévas, David Makowski, et Hervé Monod. 2013. *Analyse de sensibilité et exploration de modèles: application aux sciences de la nature et de l'environnement*. Versailles: Éd. Quae.

Figueira, José Rui, Vincent Mousseau, et Bernard Roy. 2016. « ELECTRE Methods ». In *Multiple Criteria Decision Analysis*, édité par Salvatore Greco, Matthias Ehrgott, et José Rui Figueira, 233:155-85. New York, NY: Springer New York. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-3094-4_5.

Hauschild, Michael Z., Mark Goedkoop, Jeroen Guinée, Reinout Heijungs, Mark Huijbregts, Olivier Jolliet, Manuele Margni, et al. 2013. « Identifying Best Existing Practice for Characterization Modeling in Life Cycle Impact Assessment ». *The International Journal of Life Cycle Assessment* 18 (3): 683-97. <https://doi.org/10.1007/s11367-012-0489-5>.

Munda, Giuseppe. 2007. *Social Multi-Criteria Evaluation for a Sustainable Economy*. Springer Science & Business Media.

GLOSSAIRE

MOT	DEFINITION
ACTEUR	Celui qui joue un rôle important, qui prend une part active à une affaire
ARTIFICIEL	Produit par le travail de l'homme et non par la nature, produit par le travail de l'homme et non par la nature, qui n'est pas conforme à la réalité, qui est affecté et manque de naturel
BIOME	Ecosystèmes terrestres ou aquatiques caractéristiques de grandes zones biogéographiques soumises à un climat particulier
CLIMAT	Ensemble de circonstances atmosphériques et météorologiques (humidité, pressions, températures...) propres à une région
CLIMATOLOGIE	étude des différents climats et des mouvements atmosphériques à grande échelle et à long terme
COLLECTIVITE	Ensemble, généralement assez dense, d'individus groupés naturellement ou rassemblés pour une certaine durée par des sentiments, des intérêts, des droits ou des devoirs communs perçus comme distincts de ceux des individus qui le composent et tendant à s'exprimer dans une organisation commune (CNRTL)
ECOBILAN	Synonyme d'ACV
ECOLOGIE	Du grec οἶκος (maison, habitat) et logos (science, discours), il s'agit de la science qui étudie les êtres vivants dans leur milieu et les interactions entre eux
ECONOMIE	Du grec οἰκονομία « administration d'un foyer », l'économie est une activité humaine qui consiste en la production, la distribution, l'échange et la consommation de biens et de services. Le mot est néanmoins polysémique puisque l'économie est le concept étudié par les sciences économiques, qui s'appuient sur des théories économiques qui permettent l'étude et l'optimisation de la gestion des organisations humaines. Pour les économistes néoclassiques, le mot « économie » est synonyme de « science économique » ou « économie politique ». L'économie peut encore faire référence à la situation économique d'un pays ou d'une zone géographique, c'est-à-dire de sa position conjoncturelle (par rapport aux cycles économiques) ou structurelle. Dans ce sens, l'économie est donc un quasi-synonyme à la fois de système et de régime.
EFFICACITE	Elle représente les résultats obtenus, ou performances, aux objectifs fixés
EFFICIENCE	Elle rapporte les résultats obtenues, ou performances, aux ressources utilisées
ENTRETIEN COURANT (CHAUSSEES)	Ensemble des activités curatives réalisées tout au long de l'année pour traiter des dégradations ponctuelles que l'on peut classer en quatre familles : les déformations (affaissements, flaches, ornières), les fissures (longitudinales, transversales, faïençage), les arrachements (nids de poule, pelade, plumage), les remontées de liant (ressuage). Les travaux associés sont subdivisés en deux catégories : l'entretien courant programmé et l'entretien palliatif
ENTRETIEN PREVENTIF (CHAUSSEES)	Egalement parfois appelé entretien périodique ou programmé, il se fait sur des itinéraires dont les caractéristiques structurelles sont bonnes. L'entretien préventif est programmé avant que les dégradations

	n'atteignent une gravité pouvant mettre en cause la conservation de la chaussée, la sécurité ou le confort des usagers, ainsi que l'intégrité de la couche de surface
ENTRETIEN ROUTIER	Ensemble des actions entreprises pour maintenir la qualité de la route et de ses équipements afin d'assurer aux usagers des conditions de sécurité et de confort définies. Le domaine de l'entretien à réaliser sur une route concerne la chaussée, les dépendances, les ouvrages d'art, les équipements de sécurité et de signalisation
ETAT	Groupement humain fixé sur un territoire déterminé, soumis à une même autorité.
FACTEUR	Variable contrôlée X dont on étudie ou mesure différents niveaux afin de mesurer l'impact sur une autre variable de réponse Y
FACTEUR DE CARACTERISATION DE DOMMAGE	Dommages engendrés par unité de substance de référence (Jolliet, Saadé, et Crettaz 2005)
FACTEUR DE PONDERATION	Facteur traduisant une importance ou une valeur (sociale, économique, etc.) relative à une référence
FLUX DE REFERENCE	Quantités de produit nécessaires et achetées pour remplir la fonction du système (Jolliet et al. 2005)
FORÇAGE RADIATIF	Changement d'équilibre entre les radiations pénétrant l'atmosphère et celles qui s'en échappent. Un forçage radiatif positif a tendance à réchauffer la surface de la Terre, et un forçage négatif tend en moyenne à en refroidir la surface.
GEODESIE	Etude de la forme et des dimensions de la Terre
GEOGRAPHIE	Discipline englobante cherchant à comprendre la Terre et toutes ses complexités humaines et naturelles de manière localisée et dynamique
GEOPHYSIQUE	Discipline importante des sciences de la Terre qui concerne l'étude des caractéristiques physiques de la Terre, ou d'autres planètes, utilisant des techniques de mesures indirectes (gravimétrie, géomagnétisme, sismologie, radar géologique, résistivité apparente, etc.)
GEOPHYSIQUE APPLIQUEE	Etude des couches externes de la croûte terrestre pour rechercher des gisements de pétrole et de minerais utiles
GEOPHYSIQUE DES COUCHES LIMITES	Elle inclut les disciplines, d'océanographie, hydrologie (physique, chimie et circulation des eaux), météorologie, climatologie, et glaciologie
GEOPHYSIQUE INTERNE	Géodésie, gravimétrie, géomagnétisme, sismologie, géodynamique, géophysique des maths, géophysique appliquée
HYDROLOGIE	Etude de la physique, la chimie et la circulation des eaux dans les rivières et les lacs, et les variations de la nappe phréatique ;
INDEX (DE BRANCHE)	En économie, un Index est un nombre abstrait, dont l'évolution dans le temps se doit de représenter l'évolution des coûts du type d'ouvrage auquel se réfère cet index. Dans la pratique, on distingue principalement les Index BT et les index TP, mais ce ne sont pas les seuls. Certaines branches particulières de la construction ont analysé les structures de coûts de leurs ouvrages pour élaborer des index particuliers (Voies ferrées, travaux de lignes électriques, etc.). Chaque Index est ainsi composé d'une somme d'indices élémentaires, qui sont les indices de prix des facteurs de production de l'ouvrage, chacun d'entre eux étant pondéré par un coefficient représentant en % de la somme totale, l'importance du coût du facteur de production considéré, dans le coût global de construction de l'ouvrage.(https://www.lemoniteur.fr/article/indices-index-comment-actualiser-ou-reviser-les-prix-d-un-marche-6093896)

INVENTAIRE DE CYCLE DE VIE	Deuxième phase de l'ACV permettant de quantifier les différents flux traversant le système
INVENTAIRE DE PRODUCTION	Récapitulatif des flux de références et des intrants (quantités de matières et énergies consommées)
LISSE	Se dit d'une route très peu "rugueuse"
LITTÉRATURE GRISE	Documents produits par diverses instances publiques, commerciales ou industrielles, soumis aux règles de la propriété intellectuelle, et non contrôlés par l'édition commerciale. Par extension, on vient opposer la littérature grise à la littérature académique en France
MAINTENANCE ROUTIERE	Selon la définition de l'AFNOR, la maintenance vise à maintenir ou à rétablir un bien dans un état spécifié afin que celui-ci soit en mesure d'assurer un service déterminé. La maintenance routière fait donc référence à toutes les activités nécessaires à la conservation en état de fonctionnement et en bon état patrimonial des routes. Elle intègre donc à la fois les activités d'entretien des chaussées, mais également l'entretien des parties non circulées telles que les dépendances, et inclue des activités telles que le désherbage des bas-côtés, le salage pour la viabilité hivernale, l'éclairage des infrastructures linéaires et ponctuelles, etc
METHODE	(1- général) Manière de conduire et d'exprimer sa pensée conformément aux principes du savoir / procédé d'investigation (2 - maths) Démarche rationnelle appliquée aux nombres (3 - philosophie/sciences) Démarche rationnelle destinée à découvrir et à démontrer la vérité
METHODES INPUT/OUTPUT	Basée sur des tableaux entrées-sorties, c'est une méthode de calcul des émissions et extractions sur la base de flux économiques engendrés par l'activité ou le produit concerné, contrairement à l'inventaire basé sur les procédés qui se calculent à partir des flux physiques
METHODOLOGIE	Littéralement science de ou discours sur la méthode », cartographie des méthodes ou tout simplement métaméthode (i.e. méthode des méthodes), la méthodologie est l'étude systématique, par observation de la pratique scientifique, des principes qui la fondent et des méthodes de recherche utilisées. Le concept se rapporte aux méthodes de recherche permettant d'arriver à certains objectifs au sein d'une science, ou plus communément à l'ensemble des techniques d'un domaine particulier. Par extension, ensemble de règles et de démarches adoptées pour conduire une recherche
MILIEU	En géographie, le milieu désigne ce qui entoure un être ou une chose : la nature qui nous entoure, les rapports que les hommes entretiennent entre eux, l'univers technologique, le tout en interrelations (autre définition en chimie, biologie, philosophie ou sociologie (i.e. conditions des personnes dans leur classe sociale))
MODELE	Deux sens utilisés dans la thèse : (1) représentation schématique d'un processus, d'une démarche raisonnée. (2) Ce qui est donné pour servir de référence, de type, et qui peut donc être destiné à être imité, reproduit
MONETARISATION	Transformation en valeur monétaire
NATURE	Mot polysémique, qui a plusieurs sens fondamentaux : la composition et la matière d'une chose (ce qu'elle est, son essence) ; L'origine et le devenir d'une chose dans sa spontanéité et sa léthargie temporelle (libre d'une fin, la nature humaine) ; L'ensemble des systèmes et des phénomènes naturels et humains sont aussi reconnus comme des composés de la nature. Ce mot vient du latin natura signifiant "ce qui existe depuis la naissance" ; il évoque donc à ce qui est dans son état natif, c'est-à-dire qui n'a pas été modifié depuis sa naissance. Le mot naturel qualifie effectivement parfois un objet

	ou une substance qui n'a pas été transformé, mélangé ou altéré par un artifice quelconque
NECROMASSE	Masse de matière organique morte présente dans une parcelle, un volume ou un écosystème donné
OROGRAPHIE	Domaine de la géomorphologie et de la géographie physique concernant la description des montagnes et par extension, plus généralement du relief, y compris sous-marin avec l'orographie sous-marine.
PARAMETRE	Caractéristique d'une distribution statistique d'une variable
PARC ROULANT	Composition par type de véhicules qui roulent sur un territoire selon leur nombre de kilomètres parcouru
PARC STATIQUE	Nombre de véhicules en service sur un territoire
PARTIE PRENANTE	Acteur individuel ou collectif (i.e. groupe ou organisation), activement ou passivement concerné par une décision : ses intérêts peuvent être affectés positivement ou négativement par la prise de décision
PATRIMOINE	Ensemble des biens d'un groupe, d'une communauté, d'une collectivité. Le patrimoine culturel ou historique recouvre les biens matériels ou immatériels, ayant une importance artistique et/ou historique. Il existe aussi les patrimoines architectural, archéologique, ethnologique, industriel, artistique, documentaire, bibliographique, culturel immatériel, linguistique. On évoque également le patrimoine rural, le patrimoine urbain et le patrimoine maritime.
PERFORMANCE	Résultats obtenus
PLURIDISCIPLINAIRE	Consiste à aborder un objet selon les différents points de vue en juxtaposant les regards spécialisés, afin d'utiliser la complémentarité intrinsèque des disciplines pour la résolution d'un problème
PROTOCOLE	Instructions précises et détaillées mentionnant toutes les opérations à effectuer dans un certain ordre ainsi que les principes fondamentaux à respecter pour exécuter une opération, réaliser une expérience
REMANENCE	Persistance d'un état après la disparition de sa cause
RENTABILITE	Fait référence aux revenus obtenus par rapport aux capitaux investis
RESILIENCE	Capacité d'un système à surmonter une altération de son environnement
RESURFAÇAGE	Opération de renouvellement des revêtements routiers ou couches de surface de chaussée
RIVERAIN	Individu qui habite, et par extension qui se situe, près d'un site ou d'une infrastructure. On précisera « routier » quand il est celui à proximité de la route
ROBUSTESSE	Insensibilité à de petits écarts sur les hypothèses. La robustesse traduit le plus souvent la résistance de l'estimation aux données aberrantes
RUGOSITE ROUTIERE	Écarts de planéité de la surface de chaussée affectant la dynamique véhiculaire, le confort au roulement, les charges dynamiques et le drainage. Exemple de caractéristiques : profil longitudinal, profil transversal, dévers (ASTM, définition E867, dans Sayers et Karamihas 1998). Par extension, écarts de planéité aux longueurs d'onde de mégatexture et d'uni
SANTE	Etat de complet bien-être physique, mental et social, qui ne consiste pas seulement en une absence de maladie ou d'infirmité (préambule de 1946 à la Constitution de l'organisation mondiale de la santé)
SCIENTIFIQUE	Qui a rapport à la science, qui utilise ses méthodes et acquis de la science, la science étant la somme de connaissances approfondies des choses dans ce qu'elles sont. Du point de vue des valeurs, scientifique fait référence à des caractéristiques rigoureuses et méthodiques.

SOCIETE	Ensemble d'êtres humains vivant en groupe organisé, milieu humain dans lequel qqn vit, tout groupe social formé de personnes qui se réunissent pour une activité ou des intérêts communs, ...
STOCK	En économie, un stock est un agrégat qui intègre à la période présente des éléments qui étaient déjà présents dans l'agrégat de la période précédente. La notion de stock s'oppose ainsi à celle de flux, qui est un agrégat qui se renouvelle entièrement de période en période. De ce point de vue strictement économique, les stocks sont un ensemble de biens, droits et créances détenus par un agent, et ils sont alors synonymes de capital ou de patrimoine.
TAUX	Expression arithmétique de la variation dans le temps d'un élément quantifié ou de la relation existant à un moment donné entre deux éléments quantifiés
TAUX D'ACTUALISATION	Le taux d'actualisation représente le coût du capital, qui dépend notamment de la structure du financement du projet et de la probabilité d'occurrence des flux futurs.
TAUX DE RENTABILITE INTERNE TECHNIQUE	Taux d'actualisation qui annule la Valeur Actuelle Nette
THEORIE	Du grec <i>τέχνη</i> , on peut définir de manière simple la technique par l'ensemble des applications de la science dans le domaine de la production. Une technique est une ou un ensemble de méthode(s), un ensemble de procédés et de moyens pratiques propres à une activité, qui repose souvent sur des connaissances scientifiques et destinées à la production. Elle est souvent associée à un savoir-faire, et couvre l'ensemble des procédés de fabrication (matérielle ou immatérielle), de maintenance, de gestion, de recyclage et même d'élimination des déchets, qui utilisent des méthodes issues de connaissances scientifiques ou simplement des méthodes dictées par la pratique de certains métiers.
THEORIE	Du grec <i>θεωρία</i> , «observation»), une théorie est un principe ou une règle qui fonde la connaissance rationnelle. C'est donc un ensemble d'explications, de notions ou d'idées sur un sujet précis, pouvant inclure des lois et des hypothèses, induites par l'accumulation de faits trouvés par l'observation ou l'expérience. En philosophie des sciences, une théorie scientifique doit répondre à plusieurs critères, comme la correspondance entre les principes théoriques et les phénomènes observés. Une théorie doit également permettre de réaliser des prédictions sur ce qui va être observé. Enfin, la théorie doit résister à l'expérience et être compatible avec les nouveaux faits qui peuvent s'ajouter au cours du temps. Si ce n'est pas le cas, la théorie doit être corrigée ou invalidée.
THERMALISATION	Evolution naturelle ramenant des particules, mises brutalement dans des conditions différentes du reste de leur environnement, à un équilibre thermodynamique avec le reste
VARIABLE	Entité qui influence un processus, un procédé ou une autre entité de façon plus ou moins importante.

BIBLIOGRAPHIE GLOBALE

Abdo, Joseph. 2011. « Analyse du cycle de vie de structures routières ». T89. Collection Technique CimBéton - BÉTON ET DÉVELOPPEMENT DURABLE. CIMBÉTON. <http://www.infociments.fr/publications/route/collection-technique-cimbeton/ct-t89>.

ADEME. 2008. « Conduire moins vite c'est moins d'accidents, moins de CO2 et moins cher ». juillet 2008. <http://www2.ademe.fr/servlet/getDoc?cid=96&m=3&id=54779&ref=21479&p1=B>.

ADETEC Déplacements. 2012. « Le coût réel de la voiture en 2012 ». ADETEC Déplacements. www.adetec-deplacements.com/cout_reel_voiture_3p.pdf.

AFNOR. 1994. « NF P98-082 Janvier 1994 ANNULÉE le 12/08/2017 Chaussées - Terrassements - Dimensionnement des chaussées routières - Détermination des trafics routiers pour le dimensionnement des structures de chaussées. » <https://www.boutique.afnor.org/norme/nf-p98-082/chaussees-terrassements-dimensionnement-des-chaussees-routieres-determination-des-trafic-routiers-pour-le-dimensionnement/article/737954/fa029584>.

———. 2000a. « NF EN ISO 14042 Mai 2000 (ANNULÉE le 05/10/2006) - Management environnemental - Analyse du cycle de vie - Évaluation de l'impact du cycle de vie ». <https://www.boutique.afnor.org/norme/nf-en-iso-14042/management-environnemental-analyse-du-cycle-de-vie-evaluation-de-l-impact-du-cycle-de-vie/article/880315/fa049132>.

———. 2000b. « NF S31-119-2 Décembre 2000 Acoustique - Caractérisation in situ des qualités acoustiques des revêtements de chaussées - Mesurages acoustiques au passage - Partie 2 : procédure véhicule maîtrisé ». <https://www.boutique.afnor.org/norme/nf-s31-119-2/acoustique-caracterisation-in-situ-des-qualites-acoustiques-des-revetements-de-chaussees-mesurages-acoustiques-au-passage-/article/762488/fa106697>.

———. 2002. « NF EN ISO 11819-1 Mars 2002 Acoustique - Mesurage de l'influence des revêtements de chaussées sur le bruit émis par la circulation - Partie 1 : méthode statistique au passage ». <https://www.boutique.afnor.org/norme/nf-en-iso-11819-1/acoustique-mesurage-de-l-influence-des-revetements-de-chaussees-sur-le-bruit-emis-par-la-circulation-partie-1-methode-stat/article/642442/fa117372>.

———. 2004a. « NF EN ISO 13473-1 Octobre 2004 Caractérisation de la texture d'un revêtement de chaussée à partir de relevés de profils - Partie 1 : détermination de la profondeur moyenne de la texture ». <https://www.boutique.afnor.org/norme/nf-en-iso-13473-1/caracterisation-de-la-texture-d-un-revetement-de-chaussee-a-partir-de-relevés-de-profil-partie-1-determination-de-la-profondeur/article/720886/fa049013>.

———. 2004b. « NF P01-010 Décembre 2004 (ANNULÉE le 06/08/2016) - Qualité environnementale des produits de construction - Déclaration environnementale et sanitaire des produits de construction ». <https://www.boutique.afnor.org/norme/nf-p01-010/qualite-environnementale-des-produits-de-construction-declaration-environnementale-et-sanitaire-des-produits-de-construction/article/663460/fa136284>.

- . 2006a. « NF EN ISO 14040 Octobre 2006 - Management environnemental - Analyse du cycle de vie - Principes et cadre ». <https://www.boutique.afnor.org/norme/nf-en-iso-14040/management-environnemental-analyse-du-cycle-de-vie-principes-et-cadre/article/704298/fa140281>.
- . 2006b. « NF EN ISO 14044 Octobre 2006 - Management environnemental - Analyse du cycle de vie - Exigences et lignes directrices ». <https://www.boutique.afnor.org/norme/nf-en-iso-14044/management-environnemental-analyse-du-cycle-de-vie-exigences-et-lignes-directrices/article/651688/fa138266>.
- . 2010a. « NF EN 13306 Octobre 2010 ANNULÉE le 27/01/2018 Maintenance - Terminologie de la maintenance ». <https://www.boutique.afnor.org/norme/nf-en-13306/maintenance-terminologie-de-la-maintenance/article/725442/fa159291>.
- . 2010b. « NF EN 15643-1 Décembre 2010 - Contribution des ouvrages de construction au développement durable - Évaluation de la contribution au développement durable des bâtiments - Partie 1 : cadre méthodologique général ». <https://www.boutique.afnor.org/norme/nf-en-15643-1/contribution-des-ouvrages-de-construction-au-developpement-durable-evaluation-de-la-contribution-au-developpement-durable-des-/article/713907/fa160585>.
- . 2010c. « NF P98-150-1 Juin 2010 Enrobés hydrocarbonés - Exécution des assises de chaussées, couches de liaison et couches de roulement - Partie 1 : enrobés hydrocarbonés à chaud - Constituants, formulation, fabrication, transport, mise en oeuvre et contrôle sur chantier ». <https://www.boutique.afnor.org/norme/nf-p98-150-1/enrobes-hydrocarbones-execution-des-assises-de-chaussees-couches-de-liaison-et-couches-de-roulement-partie-1-enrobes-hydr/article/672007/fa166684>.
- . 2012a. « FD ISO/TR 14049 Juillet 2012 Management environnemental - Analyse du cycle de vie - Exemples illustrant l'application de l'ISO 14044 à la définition de l'objectif et du champ d'étude et à l'analyse de l'inventaire ». <https://www.boutique.afnor.org/norme/fd-iso-tr-14049/management-environnemental-analyse-du-cycle-de-vie-exemples-illustrant-l-application-de-l-iso-14044-a-la-definition-de-l-obj/article/801429/fa169651>.
- . 2012b. « NF EN 15804 Août 2012 (ANNULÉE le 26/04/2014) - Contribution des ouvrages de construction au développement durable - Déclarations environnementales sur les produits - Règles régissant les catégories de produits de construction ». <https://www.boutique.afnor.org/norme/nf-en-15804/contribution-des-ouvrages-de-construction-au-developpement-durable-declarations-environnementales-sur-les-produits-regles-re/article/753567/fa165263>.
- . 2013. « NF EN 16271 Février 2013 - Management par la valeur - Expression fonctionnelle du besoin et cahier des charges fonctionnel - Exigences pour l'expression et la validation du besoin à satisfaire dans le processus d'acquisition ou d'obtention d'un produit ». <https://www.boutique.afnor.org/norme/nf-en-16271/management-par-la-valeur-expression-fonctionnelle-du-besoin-et-cahier-des-charges-fonctionnel-exigences-pour-l-expression-et-la/article/669103/fa164075>.
- . 2014. « NF EN 15804+A1 Avril 2014 - Contribution des ouvrages de construction au développement durable - Déclarations environnementales sur les produits - Règles régissant les catégories de produits de construction ». <https://www.boutique.afnor.org/norme/nf-en-15804a1/contribution-des-ouvrages-de-construction-au-developpement-durable-declarations-environnementales-sur-les-produits-regles-re/article/819047/fa184203>.

- . 2016. « F EN 13108-8 Octobre 2016 Mélanges bitumineux - Spécifications pour le matériau - Partie 8 : agrégats d'enrobés ». <https://www.boutique.afnor.org/norme/nf-en-13108-8/melanges-bitumineux-specifications-pour-le-materiau-partie-8-agregats-d-enrobes/article/814543/fa179879>.
- . 2018. « NF EN 13306 Janvier 2018 Maintenance - Terminologie de la maintenance ». <https://www.boutique.afnor.org/norme/nf-en-13306/maintenance-terminologie-de-la-maintenance/article/828621/fa185755>.
- AFSSET. 2007. « Bruit & santé - Effets biologiques et sanitaires du bruit - Comment lutter contre le bruit ? » AFSSET. <https://www.anses.fr/fr/system/files/AP2003et1000Sy.pdf>.
- . 2009. « Pollution par les particules dans l'air ambiant - Synthèse des éléments sanitaires en vue d'un appui à l'élaboration de seuils d'information et d'alerte du public pour les particules dans l'air ambiant ». AFSSET. <https://www.anses.fr/en/system/files/AIR2007et0006Ra.pdf>.
- Agence Européenne de l'Environnement. 2005. *EEA Core Set of Indicators: Guide*. Luxembourg: Publications Office. http://www.eea.europa.eu/publications/technical_report_2005_1/at_download/file.
- Aliapur R&D. 2009. « Utilisation des pneus usagés comme combustible alternatif - Valeurs de référence et protocoles de caractérisation ». https://www.aliapur.fr/sites/default/files/files/RetD/Pneus_usages_comme_combustible_alternatif_extrait.pdf?rewrite.
- Allard-Prigent, Céline, Cédric Audenis, Karine Berger, Nicolas Carnot, Sandrine Duchene, et Fabrice Pesin. 2002. « PRESENTATION DU MODELE MESANGE - Modèle Econométrique de Simulation et d'Analyse Générale de l'Economie ». Document de travail. Ministère de l'Economie, des Finances et de l'Industrie. <https://www.tresor.economie.gouv.fr/Ressources/file/326640>.
- Althaus, Hans-Jörg, Roland Hischier, Maggie Osses, Alex Primas, et Niels Jungbluth. 2007. « Life Cycle Inventories of Chemicals - Data v2.9 (2007) ». EcoInvent Report n°8.
- André, Michel. 2009. « The Artemis European tools for estimating the transport pollutant emissions ». In *Comprehensive Inventories -Leveraging Technology and Resources*. Baltimore, Maryland. <http://www.epa.gov/ttnchie1/conference/ei18/session6/andre.pdf>.
- André, Michel, Anne-Laure Roche, et Lauréline Bourcier. 2013. « Statistiques de parcs et trafic pour le calcul des émissions de polluants des transports routiers en France ». Rapport Ifsttar-LTE. https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/ADM00013842_ADM_ATTACHE1.pdf.
- Anfosso-Lédée, Fabienne, et Loïc Toussaint. 2015. « Long-term acoustical performance of low noise road surfaces in urban areas in Switzerland ». In . Maastricht.
- Annema, Jan Anne, Koen Frenken, Carl Koopmans, et Maarten Kroesen. 2016. « Relating Cost-Benefit Analysis Results with Transport Project Decisions in the Netherlands ». *Letters in Spatial and Resource Sciences*, juillet. <https://doi.org/10.1007/s12076-016-0175-5>.
- ANSES. 2004. « Sélection des agents dangereux à prendre en compte dans l'évaluation des risques sanitaires liés aux infrastructures routières ». Rapport du groupe de travail. http://solidarites-sante.gouv.fr/IMG/pdf/Selection_des_agents_dangereux_a_prendre_en_compte_dans_l_evaluation_des_risques_sanitaires_lies_aux_infrastructures_routieres.pdf.
- Araus, José Luis, et Gustavo A. Slafer, éd. 2011. *Crop stress management and global climate change*. CABI climate change series 2. Wallingford, Oxfordshire, UK ; Cambridge, MA: CABI.

Arbib, James, et Tony Seba. 2017. « RethinkX - Disruption, Implications and Choices - Rethinking Transportation 2020-2030 - The Disruption of Transportation and the Collapse of the Internal-Combustion Vehicle and Oil Industries ». https://static1.squarespace.com/static/585c3439be65942f022bbf9b/t/591a2e4be6f2e1c13df930c5/1494888038959/RethinkX+Report_051517.pdf.

Archilla, Adrian, et Samer Madanat. 2000. « Development of a pavement rutting model from experimental data ». *The Journal of Transportation Engineering*, août 2000, UCTC Reprint No. 452 édition.

Arnsperger, Christian, et Philippe Van Parijs. 2007. *Éthique économique et sociale*. Paris: La Découverte.

Ash, N, et Al. 2011. « Les Écosystèmes et le Bien-être humain. Un manuel pour les praticiens de l'évaluation ». Washington D.C.: Island Press.

ASTAG. 1991. « Die selbstkosten des gütertransports mit nutzfahrzeugen ». Bern: Schweizer Nutzfahrzeugverband.

Athena Institute. 2006. « A life cycle perspective on concrete and asphalt roadways: embodied primary energy and global warming potential ». Ottawa, Canada: Cement Association of Canada.

ATILH. 2017. « Déclaration Environnementale de Produit - Ciments courants français CEM I - En conformité avec la norme NF EN 15804+A1 et son complément national NF EN 15804/CN ». http://www.infociments.fr/telecharger/document/pdf/developpement-durable/construction-durable/dep-ciments/dep-ciments-ATILH_DEP_CEM%20I_17-02-17.pdf.

Aumont, Bernard. 2005. « Production d'ozone troposphérique et régimes chimiques ». Créteil: Laboratoire Interuniversitaire des Systèmes Atmosphériques. http://www.lisa.u-pec.fr/~aumont/contenu/enseignement/M2_SGE/cours_O3prod.pdf.

Aurangzeb, Qazi, Imad L. Al-Qadi, Hasan Ozer, et Rebekah Yang. 2014. « Hybrid Life Cycle Assessment for Asphalt Mixtures with High RAP Content ». *Resources, Conservation and Recycling* 83 (février): 77-86. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.12.004>.

AzariJafari, Hessam, Ammar Yahia, et Mourad Ben Amor. 2016. « Life Cycle Assessment of Pavements: Reviewing Research Challenges and Opportunities ». *Journal of Cleaner Production* 112 (janvier): 2187-97. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.080>.

Balaguera, Alejandra, Gloria Isabel Carvajal, Jaume Albertí, et Pere Fullana-i-Palmer. 2018. « Life Cycle Assessment of Road Construction Alternative Materials: A Literature Review ». *Resources, Conservation and Recycling* 132 (mai): 37-48. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.01.003>.

Balay. 2008. « Dimensionnement des chaussées aéroporturaires et chaussées routières à assises non traitées (2002-2005) ». *RGRA*, n° 864 (février): 31-35.

Barquins. 2010. « Tribologie des matériaux caoutchouteux ». *Techniques de l'Ingénieur*, n° TRI4500 (octobre). <http://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/mecanique-th7/materiaux-et-tribologie-42467210/tribologie-des-materiaux-caoutchouteux-tri4500/comportement-tribologique-tri4500niv10003.html#3.3>.

Barreau, Blandine, Gaëlle Hossie, et Suzanne Lutfalla. 2013. « Approvisionnements en métaux critiques - Un enjeu pour la compétitivité des industries française et européenne ». N°2013-04. Document de

travail. Commissariat général à la stratégie et à la prospective. http://archives.strategie.gouv.fr/cas/system/files/dt_metaux_critiquesvalbbsl_le_09-07final.pdf.

Baumann. 2012. « Route: un logiciel expert pour choisir sa chaussée durable ». LeMoniteur.fr. 26 décembre 2012. <http://www.lemoniteur.fr/179-innovation-produits/article/actualite/19776487-route-un-logiciel-expert-pour-choisir-sa-chaussee-durable>.

Bauwens, Alexandra, Catherine Sohier, et Aurore Degré. 2013. « Impacts du changement climatique sur l'hydrologie et la gestion des ressources en eau du bassin de la Meuse (synthèse bibliographique) ». *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, Le Point sur, , n° 17(1): 76-86.

Bell, James R., Lynda Alderson, Daniela Izera, Tracey Kruger, Sue Parker, Jon Pickup, Chris R. Shortall, Mark S. Taylor, Paul Verrier, et Richard Harrington. 2015. « Long-Term Phenological Trends, Species Accumulation Rates, Aphid Traits and Climate: Five Decades of Change in Migrating Aphids ». Édité par Ken Wilson. *Journal of Animal Ecology* 84 (1): 21-34. <https://doi.org/10.1111/1365-2656.12282>.

Bennett. 1996. « The HDM-4 road user effects model ». University of Birmingham. http://www.lpcb.org/index.php/component/docman/doc_view/430-1996-workshop-on-road-user-effects?Itemid=.

Bennett, C.R, et I.D Greenwood. 2003. « Volume 7: Modeling Road User and Environmental Effects in HDM-4, Version 3.0, International Study of Highway Development and Management Tools (ISOHDM) ». World Road Association (PIARC). <http://www.lpcb.org/index.php/documents/papers-and-reports/reports-and-books/194-2003-modelling-road-user-and-environmental-effects-in-hdm-4/file>.

Bentham, Jeremy. 1781. *An Introduction to the Principles of Morals and Legislation*.

Bérenghier, Michel, et al. 2001. « Influence de la couche de roulement de la chaussée sur le bruit du trafic routier ». 4. Cfr - info - Notes d'information. Comité français pour les techniques routières. <http://portail.documentation.developpement-durable.gouv.fr/dtrf/pdf/pj/Dtrf/0002/Dtrf-0002693/DT2693.pdf?openerPage=notice>.

Beresniak, Ariel, Antonieta Medina-Lara, Jean Paul Auray, Alain De Wever, Jean-Claude Praet, Rosanna Tarricone, Aleksandra Torbica, Danielle Dupont, Michel Lamure, et Gerard Duru. 2015. « Validation of the Underlying Assumptions of the Quality-Adjusted Life-Years Outcome: Results from the ECHOUTCOME European Project ». *Pharmacoeconomics* 33 (1): 61-69. <https://doi.org/10.1007/s40273-014-0216-0>.

Bernard, Frédérick, Timo Blomberg, et Mike Southern. 2012. « Life Cycle Inventory : bitumen ». In . Nantes, France.

Bertalanffy, Ludwig von, et Jean Benoît Chabrol. 1973. *Théorie générale des systèmes*. Paris: Dunod.

Berthier, Jean. 1991. *Véhicules et routes*. Les Sélections-Techniques de l'ingénieur. Ed. Techniques Ingénieur.

Bertolini, Gérard. 2008. « Les contours de la concurrence entre cimenterie et incinération spécialisée de déchets en Europe ». *Revue francophone d'écologie industrielle*, n° n°49. http://odel.irevues.inist.fr/dechets-sciences-techniques/docannexe/file/1415/2_bertolini.pdf.

Bertrand, Thomas, Laure Martel, William Margheriti, et Aurianne Vienney. 2015. « Analyse des coûts d'exploitation des véhicules pour les usagers ». Archives de l'ENPC. Analyse des coûts d'exploitation des véhicules pour les usagers. France: Ecole des Ponts ParisTech.

- Beukering, Pieter J. H., et Marco A. Janssen. 2000. « A Dynamic Integrated Analysis of Truck Tires in Western Europe ». *Journal of Industrial Ecology* 4 (2): 93-115. <https://doi.org/10.1162/108819800569825>.
- Biesmeijer, J. C. 2006. « Parallel Declines in Pollinators and Insect-Pollinated Plants in Britain and the Netherlands ». *Science* 313 (5785): 351-54. <https://doi.org/10.1126/science.1127863>.
- Bihouix, Philippe. 2014. *L'âge des low tech: vers une civilisation techniquement soutenable. Anthropocène Seuil*. Paris: Éditions du Seuil.
- Biscaglia. 2005. « Stop and Start : un système innovant ». septembre 2005. <http://www.ademe.fr/htdocs/publications/lettre/105/tech.htm>.
- Bitelli, Gabriele, Andrea Simone, Fabrizio Girardi, et Claudio Lantieri. 2012. « Laser Scanning on Road Pavements: A New Approach for Characterizing Surface Texture ». *Sensors* 12 (12): 9110-28. <https://doi.org/10.3390/s120709110>.
- Blagodatsky, Sergey, Jianchu Xu, et Georg Cadisch. 2016. « Carbon Balance of Rubber (Hevea Brasiliensis) Plantations: A Review of Uncertainties at Plot, Landscape and Production Level ». *Agriculture, Ecosystems & Environment* 221 (avril): 8-19. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.01.025>.
- Blanquier, A. 1984. *Sélection des investissements aux niveaux national et régional*. Sciences économiques. Paris: Dunod.
- Blokland, Gijssan van, Christiaan Tollenaar, et Ronald van Loon. 2014. « Modelling of Acoustic Aging of Road Surfaces ». CEDR Call 2012: Noise: Integrating strategic noise management into the operation and maintenance of national road networks Deliverable D2.2.
- Blomberg, Timo, Jeff Barnes, Frédéric Bernard, Philippe Dewez, Stéphane Le Clerc, Marco Pfitzmann, Laurent Porot, Mike Southern, et Ron Taylor. 2011. « Life Cycle Inventory: Bitumen ». Brussels, Belgium. <http://www.eurobitume.eu/fileadmin/pdf-downloads/LCI%20Report-Website-2ndEdition-20120726.pdf>.
- Bordes, P, G Guinard, et G Laurent. 1996. « L'entretien courant des chaussées - guide pratique ». Sétra.
- Börjeson, Lena, Mattias Höjer, Karl-Henrik Dreborg, Tomas Ekvall, et Göran Finnveden. 2006. « Scenario Types and Techniques: Towards a User's Guide ». *Futures* 38 (7): 723-39. <https://doi.org/10.1016/j.futures.2005.12.002>.
- Bortoli, Anne de, Adélaïde Féraïlle, et Fabien Leurent. 2017. « Life Cycle Assessment to support decision-making in transportation planning : a case of French Bus Rapid Transi ». In *Proceedings of the Transportation Research Board 2017*. Washington DC, USA. <https://trid.trb.org/view.aspx?id=1439665>.
- Boulangé, Laurence, Erick Lemonnier, Franck Ollivier, Lionel Bobeau, et Jean-Pierre Baud. 2016. « Exposition professionnelle aux fumées de bitume - Principales conclusions de la campagne nationale de 2015 ». *Revue Générale des Routes et de l'Aménagement*, n° 939: pp 62-68.
- Bouscaren, et Leygonie. 1989. « Le programme européen CORINAIR = The European CORINAIR programme. » 31, no124. Journée scientifique de Toulouse.
- Boustani, Avid, Sahni Sahni, Timothy Gutowski, et Steven Graves. 2010. « Tire Remanufacturing and Energy Savings ». Massachusetts Institute of Technology, Sloan School of Management,

Environmentally Benign Manufacturing Laboratory.
<http://web.mit.edu/ebm/www/Publications/MITEI-1-h-2010.pdf>.

Branchu, P, A.L Badin, B Béchet, L Eisenlohr, T Le Priol, F Marseille, et E Trielli. 2013. « Pollution d'origine routière et environnement de proximité ». *Vertigo*, n° Hors Série (février).

Bras, Bert, et Austin Cobert. 2011. « Life-Cycle Environmental Impact of Michelin Tweel® Tire for Passenger Vehicles ». *SAE International Journal of Passenger Cars - Mechanical Systems* 4 (1): 32-43.
<https://doi.org/10.4271/2011-01-0093>.

BRGM. 1996. « Etude technico-économique des granulats de substitutions dans les bétons hydrauliques ». Ministère de l'Industrie, de la Poste et des Télécommunications.
<http://infoterre.brgm.fr/rapports/RR-39261-FR.pdf>.

Bryce, James, Joao Santos, Gerardo Flintsch, Samer Katicha, Kevin McGhee, et Adelino Ferreira. 2014. « Analysis of Rolling Resistance Models to Analyse Vehicle Fuel Consumption as a Function of Pavement Properties ». In *Asphalt Pavements*, par Y Kim, 263-73. CRC Press.
<https://doi.org/10.1201/b17219-39>.

Bulle, Cécile, Manuele Margni, Laure Patouillard, Anne-Marie Boulay, Guillaume Bourgault, Vincent De Bruille, Viêt Cao, et al. 2019. « IMPACT World+: A Globally Regionalized Life Cycle Impact Assessment Method ». *The International Journal of Life Cycle Assessment*, février. <https://doi.org/10.1007/s11367-019-01583-0>.

Bureau, Dominique, Pierre Picard, et Bernard Salanié. 2007. *Développement durable, Majeure d'Eco-Sciences, Année 3, ECO565*. Palaiseau: École polytechnique.

Cabannes, Pierre-Yves, Hélène Erkel-Rousse, Caroline Klein, Guy Lalanne, Olivier Monso, Erwan Pouliquen, et Olivier Simon. 2012. « Survol de Mésange : un modèle macroéconomique à l'usage du praticien ». *Economie et Statistique*, n° n°451-453.

Can, A., G. Guillaume, et B. Gauvreau. 2015. « Noise Indicators to Diagnose Urban Sound Environments at Multiple Spatial Scales ». *Acta Acustica United with Acustica* 101 (5): 964-74.
<https://doi.org/10.3813/AAA.918891>.

Capitano, Kyle Jordan. 2015. « Methodologies for Life Cycle Assessment of Passenger Vehicles ». Thèse de master, Ontario, Canada: University of Windsor.
<http://scholar.uwindsor.ca/cgi/viewcontent.cgi?article=6459&context=etd>.

Capony, Adrien. 2013. « Evaluation environnementale d'un chantier de terrassement - mise au point d'un outil paramétrable de mesures d'émissions relatives aux engins de terrassement ». Ecole Centrale de Nantes. <http://www.theses.fr/2013ECDN0002>.

Carnegie Mellon University. s. d. « CMU - Economic Input-Output Life Cycle Assessment - Carnegie Mellon University ». Consulté le 23 janvier 2018. <http://www.eiolca.net/index.html>.

Carpenter, et Cenek. 1999. « Tyre Wear Modelling for HDM 4 ». 986529474. Central Laboratories Report. Opus International Consultants Limited.
http://www.lpcb.org/index.php/component/docman/doc_view/11018-1999-wb-tyre-wear-modelling-for-hdm-4?Itemid=32.

CAS. 2005. « Révision du taux d'actualisation des investissements publics ». Commissariat Général du Plan.

http://metroauxrigollots.fr/archives/pdf/SW54/Rapport_Lebegue_Revision_Taux_Actualisation_Investissements_Publics.pdf.

Cavaillès, Henri. 1946. *Ma route française - son histoire, sa fonction - Etude de géographie humaine*. Librairie Armand Colin.

CCFA. 2015. « L'industrie automobile française - Analyse & statistiques 2014 ». Comité des Constructeurs Français d'Automobiles.

Cerema. 2014. « Uni longitudinal - Etat de l'art et recommandations ».

CEREMA. 2015. « L'adhérence des chaussées - État de l'art et recommandations ». Guide technique. Collection Références.

———. 2016. « Étude sur les parcs roulants routiers français - Inventaire, comparaison et impact sur les courbes d'émission ». http://www.infra-transports-materiaux.cerema.fr/IMG/pdf/1541w-Etude_parcs_roulant_routiers_francais.pdf.

Cerema-DTeciTM, et IDRRIM. 2014. *Uni longitudinal: état de l'art et recommandations : guide technique*. Bron.

Cerezo, Veronique. 2011. « L'adhérence des revêtements routiers ». Journée Cotita, octobre 18. http://www.cotita.fr/IMG/pdf/1pdf_cete69_DLL_SAGRI_Club_Labo_2011_10_18_v2.pdf.

CETE de l'Ouest. 2008. « Département de la Sarthe - Cartes de bruit stratégiques - Grandes infrastructures de transports - Réseau autoroutier COFIROUTE - Résumé non technique - Article R 572-5 du code de l'environnement ». http://www.sarthe.gouv.fr/IMG/Cofiroute_cle09bfa6.pdf.

CFTR. 2003. « Aide au choix des techniques d'entretien des couches de surface des chaussées - Guide technique ». Sétra. http://catalogue.setra.fr/document.xsp?id=Dtrf-0003341&qid=sdx_q0&n=5&q=.

CGDD. 2012. « Les véhicules utilitaires légers au 1er janvier 2011 ». n°310. Chiffres & statistiques. Commissariat Général au Développement Durable. http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/fileadmin/documents/Produits_editoriaux/Publications/Chiffres_et_statistiques/2012/Chiffres%20et%20stats%20310%20V%C3%A9hicules%20utilitaires%20I%C3%A9gers%20au%201%2001%202011%20-%20avril%202012.pdf.

———. 2015. « Chiffres clés du transport - Édition 2015 ». Commissariat Général au Développement Durable. http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/fileadmin/documents/Produits_editoriaux/Publications/Reperes/2015/reperes-transport-ed2015-b.pdf.

———. 2016a. « Le service de pollinisation ». Analyse.

———. 2016b. « Vingt-cinq années de transport intérieur de voyageurs ». Etudes & Documents. Commissariat Général au Développement Durable. http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/fileadmin/documents/Produits_editoriaux/Publications/Etudes_et_documents/2016/ed148-transport-interieur-voyageurs-mai-2016.pdf.

Chandra, Satish. 2004. « Effect of Road Roughness on Capacity of Two-Lane Roads ». *Journal of Transportation Engineering* 130 (3): 360-64. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(2004\)130:3\(360\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2004)130:3(360)).

Chappat, Michel, et Julian Bilal. 2003. « The Environmental Road of the Future - Life Cycle Analysis - Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions ». Colas Group.

Charlot-Valdieu, Catherine, et Philippe Outrequin. 2013. *Coût global des bâtiments et des projets d'aménagement mode d'emploi*. Paris: Ed. Le Moniteur.

Chatti, Karim, et Imen Zaabar. 2012. *Estimating the effects of pavement condition on vehicle operating costs*. NCHRP report 720. Washington, D.C: Transportation Research Board. http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/nchrp_rpt_720.pdf.

Chehovits, et Galehouse. 2010. « Energy Usage and Greenhouse Gas Emissions of Pavement Preservation Processes for Asphalt Concrete Pavements ». In . http://techtransfer.berkeley.edu/icpp/papers/65_2010.pdf.

Cheng, Ling, Dezhen Chen, Guojie Yan, et Hang Zheng. 2010. « Life Cycle Assessment of Road Surface Paving with Warm Mix Asphalt (WMA) Replacing Hot Mix Asphalt (HMA) ». In , 1-5. IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICEEE.2010.5660713>.

Cherqui, Frédéric. 2005. « Méthodologie d'évaluation d'un projet d'aménagement durable d'un quartier - méthode ADEQUA ». Université de La Rochelle, LEPTAB - Laboratoire d'Etude des Phénomènes de Transfert Appliqués aux Bâtiments. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00012089>.

Chester, Mikhail. 2008. « Life-cycle Environmental Inventory of Passenger Transportation in the United States ». Dissertations. Berkeley: Institute of Transportation Studies, UC Berkeley.

Chevasson. 2007. « Le calcul économique à l'épreuve des contraintes du secteur des transports routiers. Les cas de l'insécurité routière et de l'effet de serre ». LET, Laboratoire Economie des Transports. http://theses.univ-lyon2.fr/documents/getpart.php?id=lyon2.2007.chevasson_g&part=129571.

Chevassus-au-Louis, Bernard, Jean-Michel Salles, Sabine Bielsa, Dominique Richard, Gilles Martin, et Jean-Luc Pujol. 2009. « Approche économique de la biodiversité et des services liés aux écosystèmes - Contribution à la décision publique ». Rapports et documents. Centre d'Analyse Stratégique. <http://www.ladocumentationfrancaise.fr/var/storage/rapports-publics/094000203.pdf>.

Chiu, Chui-Te, Tseng-Hsing Hsu, et Wan-Fa Yang. 2008. « Life Cycle Assessment on Using Recycled Materials for Rehabilitating Asphalt Pavements ». *Resources, Conservation and Recycling* 52 (3): 545-56. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2007.07.001>.

Chong, Dan, et Yuhong Wang. 2017. « Impacts of Flexible Pavement Design and Management Decisions on Life Cycle Energy Consumption and Carbon Footprint ». *The International Journal of Life Cycle Assessment* 22 (6): 952-71. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1202-x>.

Choo, Eng U., Bertram Schoner, et William C. Wedley. 1999. « Interpretation of Criteria Weights in Multicriteria Decision Making ». *Computers & Industrial Engineering* 37 (3): 527-41. [https://doi.org/10.1016/S0360-8352\(00\)00019-X](https://doi.org/10.1016/S0360-8352(00)00019-X).

Choquette-Levy, Nicolas, Margaret Zhong, Heather L MacLean, et Joule A. Bergerson. 2017. « COPTeM: A Model to Investigate the Factors Driving Crude Oil Pipeline Transportation Emissions ». *Environmental Science & Technology*, novembre. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b03398>.

Chowdhury, Raja, Defne Apul, et Tim Fry. 2010. « A Life Cycle Based Environmental Impacts Assessment of Construction Materials Used in Road Construction ». *Resources, Conservation and Recycling* 54 (4): 250-55. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2009.08.007>.

Christory. 2007. « Routes et rues stratégiques en France : du présent au futur - vers des chantiersfurtifs ». septembre. <http://lavocwww.epfl.ch/JT/2007/Presentations/Christory%20Routes%20et%20rues%20strar%C3%A9giques%20en%20France.pdf>.

CITEPA. 2016a. « Mesures primaires de réduction des émissions de NOx ». <https://www.citepa.org/fr/air-et-climat/techniques-de-reduction/mesures-primaires-de-reduction-des-emissions-de-nox>.

———. 2016b. « Mesures secondaires de réduction des émissions de NOx ». <https://www.citepa.org/fr/air-et-climat/techniques-de-reduction/mesures-secondaires-de-reduction-des-emissions-de-nox>.

———. 2016c. « Dioxyde de soufre - SO₂ ». <https://www.citepa.org/fr/air-et-climat/polluants/aep-item/dioxyde-de-soufre>.

———. 2016d. « Oxydes d'azote - NOx ». <https://www.citepa.org/fr/air-et-climat/polluants/aep-item/oxydes-d-azote>.

———. 2016e. « Pollution photochimique ». <https://www.citepa.org/fr/air-et-climat/phenomenes/pollution-photochimique>.

Cluzel, F., B. Yannou, Y. Leroy, et D. Millet. 2012. « Proposition for an Adapted Management Process to Evolve from an Unsupervised Life Cycle Assessment of Complex Industrial Systems towards an Eco-Designing Organisation ». *Concurrent Engineering* 20 (2): 111-26. <https://doi.org/10.1177/1063293X12446663>.

CNR. 2017. « Evolution du prix du gazole et incidence sur le prix de revient situation au 28 février 2017 ».

Cobert, Austin. 2009. « Environmental comparison of Michelin Tweel™ and pneumatic tire using life cycle analysis ». Master's of Science Thesis in the School of Mechanical Engineering, Georgia Institute of Technology. https://smartech.gatech.edu/bitstream/handle/1853/37202/cobert_austin_m_200912_mast.pdf.

Coffin, Alisa W. 2007. « From Roadkill to Road Ecology: A Review of the Ecological Effects of Roads ». *Journal of Transport Geography* 15 (5): 396-406. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2006.11.006>.

Cohen, Simon, et Mehdi Danech-Pajouh. 2000. « Initiation à l'ingénierie du trafic routier ». Support de cours.

Comité Professionnel du pétrole. 2017. « L'intégral - Pétrole 2016 - Statistiques existante sur l'industrie pétrolière et aperçu sur les autres énergies, en France et dans le monde. »

Commission Européenne. 2014. « The European Critical Raw Materials review ». http://europa.eu/rapid/press-release_MEMO-14-377_en.htm.

Commission mondiale sur l'environnement et le développement de l'Organisation des Nations unies, présidée par Gro Harlem Brundtland. 1987. « Rapport Brundtland ». http://www.diplomatie.gouv.fr/sites/odyssee-developpement-durable/files/5/rapport_brundtland.pdf.

Communauté du Grand Lyon - Direction de la Voirie - VQL. 2009. « Guide Technique de conception et de dimensionnement des structures de chaussées communautaires ». Fascicule 2.

http://www.grandlyon.com/fileadmin/user_upload/media/pdf/voirie/20091118_gl_voirie_guide_conception_structures_de_chaussees.pdf.

Conseil Economique, Social et Environnemental. 2009. « Infrastructures et développement durable des territoires : un autre regard - une nouvelle vision ». Année 2009 n°23. Avis et Rapports du Conseil Economique, Social et Environnemental. <http://www.cgpme.fr/upload/docs/TardyDaniel.pdf>.

Continental. 1999. « Life Cycle Assessment of a car tire ». Continental. http://www.proyectaryproducir.com.ar/public_html/Seminarios_Posgrado/Material_de_referencia/LCA%20of%20a%20Car%20Tire%20-%20Continental.pdf.

Corniou, Jean-Pierre. 2012. « Le réseau routier français, un actif menacé ». *Les Echos*, 1 juin 2012, LesEchos.fr édition. http://archives.lesechos.fr/archives/cercle/2012/06/01/cercle_47481.htm.

Corté, Goux, et al. 1994. « Conception et dimensionnement des structures de chaussées ». Paris; Bagnaux: LCPC-Sétra.

Corté, Guidoux, et al. 1998. « Catalogue des structures types de chaussées neuves ». Sétra-LCPC.

CoTITA Est - IDRRIM - USIRF. 2016. « GEPUR : Gestion et Entretien du Patrimoine Urbain et Routier - Méthodes, outils et techniques ». Volet n°1 : Routes Interurbaines et traverses d'agglomérations. http://www.fnpt.fr/upload/docs/application/pdf/2016-09/guide_gepur_juin_2016.pdf.

Cour des comptes. 2015. « Les politiques publiques de lutte contre la pollution de l'air ». Cour des comptes. <https://www.ccomptes.fr/Publications/Publications/Les-politiques-publiques-de-lutte-contre-la-pollution-de-l-air>.

Cour des Comptes. 2015. « Les politiques publiques de lutte contre la pollution de l'air ». <https://consultation.securite-routiere.gouv.fr/media/default/0001/01/47c34b26daa6573ba898b835dda132307adac465.pdf>.

Cross, Stephen, Warren Chesner, Henry Justus, et Edward Kearney. 2011. « Life-Cycle Environmental Analysis for Evaluation of Pavement Rehabilitation Options ». *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2227 (décembre): 43-52. <https://doi.org/10.3141/2227-05>.

CRR. 2008. « Carbon footprints of tyre production – new versus remanufactured - A report comparing the carbon footprint of a new and a retread tyre for use by light commercial vehicles ». Center for Remanufacturing and Reuse. <http://www.remanufacturing.org.uk/pdf/story/1p158.pdf>.

Cucurachi, S., et R. Heijungs. 2014. « Characterisation Factors for Life Cycle Impact Assessment of Sound Emissions ». *Science of The Total Environment* 468-469 (janvier): 280-91. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.07.080>.

Cuenoud. 2011. « Valorcol : asphalt mix complying with environment and sustainable development ». *European Roads Review* Spring.

Cula, Patrick. 2011. « La route, un patrimoine ». SPRIR de Franche Comté, Dole, novembre 28. https://www.google.fr/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=6&cad=rja&uact=8&ved=0ahUK Ewi2rrn4z9nKAhVDQBoKHajDB8gQFghBMAU&url=http%3A%2F%2Fwww.cotita.fr%2FIMG%2Fppt%2Fppt_1-1_Patrick_Cula.ppt&usq=AFQjCNHfHFd6DoqCkXVhhQTvLkF1qfehMw&sig2=g8EUq9p_-aTvIAFq8e8oYw&bvm=bv.113034660,d.ZWU.

Curran, Mary Ann. 2015. *Life cycle assessment student handbook*. Hoboken, New Jersey: Wiley.

Daniel, Geoffrey, Vianney Behaghel, Quentin Deslot, et Farcette. 2017. « Infrastructures routières et critères de performance environnementale dans les marchés publics ». Archives de l'ENPC. Rapport de Groupe d'Analyse de l'Intervention Publique pour le Mastère PAPDD. Ecole des Ponts ParisTech.

Davoine, Lucie. 2009. « L'économie du bonheur: Quel intérêt pour les politiques publiques ? » *Revue économique* 60 (4): 905. <https://doi.org/10.3917/reco.604.0905>.

De Bortoli, Anne. 2014. « Eco-concevoir l'entretien routier : contexte national et identification des enjeux énergétiques du système routier ». *Revue générale des Routes RGRA*, n° 920 (mai): 67-70.

———. 2015. « Assessing environmental impacts of road projects: the recent development of specialized eco-comparators in France ». In *Proceedings of the XXVth World Road Congress*. Seoul, North Korea: World Road Association.

Delanne, Yves. 2008. « Mesure et analyse de l'uni des chaussées ». LCPC.

Descornet. 1984. « Mode opératoire - Mesure du bruit de contact pneu/route ». Centre de Recherches Routières. <http://www.brrc.be/publications/mf/mf5084.pdf>.

Descornet, G. 1990. « Road-Surface Influence on Tire Rolling Resistance ». In *Surface Characteristics of Roadways: International Research and Technologies*, édité par We Meyer et J Reichert, 401-401-15. 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959: ASTM International. <https://doi.org/10.1520/STP23377S>.

Descornet, G, et U Sandberg. 1980. « Road surface influence on tire/road noise. Part II ». In , 261-72. Miami.

Desportes, Marc, et Antoine Picon. 1997. *De l'espace au territoire: l'aménagement en France XVIe - XXe siècles*. Paris: Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées.

DGITM. 2014a. « Nouveau référentiel d'évaluation des projets de transport ». DGITM.

———. 2014b. « Politique pour l'entretien des chaussées du réseau routier national non concédé ». Volume 2-Rapport sur les simulations budgétaires.

———. 2015. « Image Qualité du Réseau Routier National et Indicateur d'Usage - Manuel de Présentation ».

Direction des Routes. 2000. « Structure expérimentale de chaussée - Recyclage des matériaux de chaussée. »

Doisy. 2007. « Pérennité des performances acoustiques des revêtements ». février. http://media.lcpc.fr/ext/pdf/sem/2007_bruit_05.pdf.

Dones, Roberto, Christian Bauer, Rita Bolliger, Bastian Burger, Thomas Heck, Alexander Röder, Mireille Faist Emmenegger, Rolf Frischknecht, Niels Jungbluth, et Matthias Tuchschnid. 2007. « Life Cycle Inventories of Energy Systems : results for current systems in Switzerland and other UCTE countries - Data v2.0 ». EcolInvent Report.

Doré, Drouin, Pierre, et Desrochers. 2005. « Estimation of the Relationships of Road Deterioration to Traffic and Weather in Canada ». T8080-04-0242. Université Laval. <http://www.bv.transports.gouv.qc.ca/mono/0965375.pdf>.

Ducharne, Agnès, Sylvain Théry, Pascal Viennot, Emmanuel Ledoux, Eric Gomez, et Michel Déqué. 2003. « Influence du changement climatique sur l'hydrologie du bassin de la Seine ».

Dunn, J.R, et R.H Jones. 1991. « Automobile and truck tires adapt to increasingly stringent requirements ». *Elastomerics*, 1991, Palmerton, New York, NY, ETATS-UNIS édition.

Dupont, Ariane, Laurent Hivert, et Claire Papaix. 2013. « BETTI : Rapport Intermédiaire - Rapport méthodologique : Questions soulevées par la réalisation de diagnostics environnementaux des mobilités à l'échelle d'une région urbaine ». Version révisée de décembre 2014 – janvier 2015.

Dupuy, Gabriel. 1995. *Les territoires de l'automobile*. Collection Villes. Paris: Anthropos : Diffusion Economica.

Durand, et Cousin. 2009. « Incidence des PL sur les surcoûts de construction des chaussées neuves ». Sétra.

http://www.setra.equipement.gouv.fr/IMG/pdf/0917w_PL_et_couts_construction_chaussees.pdf.

Duron, Philippe, et Ministère des transports, de la mer et de la pêche. 2013. « Mobilité 21 - « Pour un schéma national de mobilité durable » ». Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie.

http://www.ladocumentationfrancaise.fr/docfra/rapport_telechargement/var/storage/rapports-publics/134000396.pdf.

Dwyer, Larry, Peter Forsyth, et Ray Spurr. 2005. « Estimating the Impacts of Special Events on an Economy ». *Journal of Travel Research* 43 (4): 351-59. <https://doi.org/10.1177/0047287505274648>.

Easterlin, R. 1974. « Does Economic Growth Improve the Human Lot? Some Empirical Evidence ». In: David, R. and Reder, R., Eds., *Nations and Households in Economic Growth: Essays in Honor of Moses Abramovitz*. New York: Academic Press. <http://huwdixon.org/teaching/cei/Easterlin1974.pdf>.

— — —. 2003. « Building a Better Theory of Well-being ». In *Proceedings*. University of Milano-Bicocca. <http://www-bcf.usc.edu/~easterl/papers/BetterTheory.pdf>.

ECOBILAN S.A. 1997. « Overview of life-cycle assessment studies in the automotive sector. » IPTS Technical Report Series. Luxembourg: Office of the European Union. <https://publications.europa.eu/fr/publication-detail/-/publication/7426f51d-a304-48eb-a732-a21890028c97>.

Edenhofer, Ottmar, Ramon Pichs-Madruga, Youba Sokona, et al. 2014. « Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change ». Fifth assessment report. United Nations report - IPCC - Working group III contribution to AR5. http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_and_data_reports.shtml.

EEA. 2013. « EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2009. Technical guidance to prepare national emission inventories ». European Environment Agency Technical report n°12/2013. Luxembourg: European Environment Agency. <http://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2013>.

Elad, Yigal, et Ilaria Pertot. 2014. « Climate Change Impacts on Plant Pathogens and Plant Diseases ». *Journal of Crop Improvement* 28 (1): 99-139. <https://doi.org/10.1080/15427528.2014.865412>.

Eliasson, Jonas, Maria Börjesson, James Odeck, et Morten Welde. 2014. « Does benefit/cost-efficiency influence transport investment decisions? » *Working papers in Transport Economics*, avril. https://ideas.repec.org/p/hhs/ctswps/2014_006.html.

Epps, J. A. 1999. « The road to performance-related specifications ». Reno, Nevada: WesTrack Interim Rep.

Eriksson, Lina, James Mahmud Rice, et Robert E. Goodin. 2007. « Temporal Aspects of Life Satisfaction ». *Social Indicators Research* 80 (3): 511-33. <https://doi.org/10.1007/s11205-006-0005-z>.

ETRMA. 2001. « Life cycle assessment of an average European car tyre ». ETRMA. <http://www.etrma.org/tyres/ELTs/LCA-ELTs>.

———. 2009. « Tyre Generic Exposure Scenario End of Life Tyre Guidance ». ChemRisk LLC. <http://www.etrma.org/uploads/Modules/Documentsmanager/chemrisk--09-12-16-end-of-life-tyre.pdf>.

———. 2015a. « End-of-life Tyre - REPORT 2015 ». ETRMA. <http://www.etrma.org/uploads/Modules/Documentsmanager/elt-report-v9a---final.pdf>.

———. 2015b. « The ETRMA statistics report ». Statistics Edition 2015. ETRMA. <http://www.etrma.org/uploads/Modules/Documentsmanager/20151214--statistics-booklet-2015-final2.pdf>.

———. 2017. « European tyre & rubber industry - Statistics - Edition 2016 ». ETRMA. <http://www.etrma.org/uploads/Modules/Documentsmanager/20161208---statistics-booklet-2016-final5.pdf>.

European Commission, Joint Research Centre, et Institute for Environment and Sustainability. 2011. *International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook: Framework and Requirements for Life Cycle Impact Assessment Models and Indicators*. Luxembourg: Publications Office.

European Environment Agency. 2014. *Adaptation of Transport to Climate Change in Europe: Challenges and Options across Transport Modes and Stakeholders*. Luxembourg: Publications Office. <http://bookshop.europa.eu/uri?target=EUB:NOTICE:THAL14008:EN:HTML>.

———. 2015. *L'environnement en Europe: état et perspectives 2015 : synthèse*. Luxembourg: Office des publications de l'Union européenne. <http://dx.publications.europa.eu/10.2800/4738>.

———. 2016. *EMEP/EEA Air Pollutant Emission Inventory Guidebook 2016: Technical Guidance to Prepare National Emission Inventories*. <http://bookshop.europa.eu/uri?target=EUB:NOTICE:THAL16020:EN>.

———. 2017. « EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2016 – Update May 2017 ».

Evans, Anne, et Russ Evans. 2006. « The Composition of a Tyre: Typical components ». Project code: TYR0009-02. EER Limited. <http://www.wrap.org.uk/sites/files/wrap/2%20-%20Composition%20of%20a%20Tyre%20-%20May%202006.pdf>.

Explicit. 2008. « Enquête sur les consommations d'énergie des commerces et services de proximité en région Ile-de-France ». ADEME-ARENE. https://www.google.fr/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=3&cad=rja&uact=8&ved=0ahUK EwilnMijta_XAhXGqxoKHW-fA4EQFgg7MAI&url=http%3A%2F%2Fwww.arenidf.org%2Ffile%2Fenquetesurlesconsommationsden ergiedescommercpdf%2Fdownload%3Ftoken%3DYVRBMFFV&usg=AOvVaw3rf4v3j-9r9929spA8hYrB.

E&Y. 2016. « L'impact socio-économique du rechapage poids lourd en France et en Europe - L'économie circulaire du pneu en danger ». [http://www.ey.com/Publication/vwLUAssets/ey-l-impact-socio-economique-du-rechapage-poids-lourd-en-france-et-en-europe/\\$FILE/ey-l-impact-socio-economique-du-rechapage-poids-lourd-en-france-et-en-europe.pdf](http://www.ey.com/Publication/vwLUAssets/ey-l-impact-socio-economique-du-rechapage-poids-lourd-en-france-et-en-europe/$FILE/ey-l-impact-socio-economique-du-rechapage-poids-lourd-en-france-et-en-europe.pdf).

Eyerer, P. 1994. « Life Cycle Assessment of automotive products made out of steel, aluminium and polymers on the example oil filter for passenger car engines ». *Polymers in the automobile*, VDI-Verlag, 5-42.

Faburel, Guillaume. 2008. « Les inégalités environnementales comme inégalités de moyens des habitants et des acteurs territoriaux - Pour que l'environnement soit un facteur réel de cohésion urbaine ». *Espace Populations Sociétés*, n° 2008/1 : Populations, vulnérabilités et inégalités écologiques: 111-26.

Faivre, Robert, Bertrand Iooss, Stéphanie Mahévas, David Makowski, et Hervé Monod. 2013. *Analyse de sensibilité et exploration de modèles: application aux sciences de la nature et de l'environnement*. Versailles: Éd. Quae.

Fangmeier, A, L De Temmerman, et al. 1999. « Effects on nutrients and on grain quality in spring wheat crops under elevated CO₂ concentration and stress conditions in th Europea, multiple-site exmperiment "ESPACE-wheat" ». *European Journal of Agronomy* 10: pp 215-229.

Farina, Angela, Maria Chiara Zanetti, Ezio Santagata, et Gian Andrea Blengini. 2017. « Life Cycle Assessment Applied to Bituminous Mixtures Containing Recycled Materials: Crumb Rubber and Reclaimed Asphalt Pavement ». *Resources, Conservation and Recycling* 117 (février): 204-12. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.10.015>.

Fawer, Matthias, Dennis Postlethwaite, et Hans -Jürgen Klüppel. 1998. « Life cycle inventory for the production of zeolite a for detergents ». *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 1998, Volume 3, Issue 2 édition.

Fayard, Alain, Francesco Gaeta, et Emile Quinet. 2005. « French Motorways: Experience and Assessment ». *Research in Transportation Economics* 15 (janvier): 93-105. [https://doi.org/10.1016/S0739-8859\(05\)15008-2](https://doi.org/10.1016/S0739-8859(05)15008-2).

Ferrer, Geraldo. 1997. « The Economics of Tire Remanufacturing ». *Resources, Conservation and Recycling* 19 (4): 221-55. [https://doi.org/10.1016/S0921-3449\(96\)01181-0](https://doi.org/10.1016/S0921-3449(96)01181-0).

FHWA. 1998. « FHWA National Strategic Plan ». Washington, DC.

Figueira, José Rui, Vincent Mousseau, et Bernard Roy. 2016. « ELECTRE Methods ». In *Multiple Criteria Decision Analysis*, édité par Salvatore Greco, Matthias Ehrgott, et José Rui Figueira, 233:155-85. New York, NY: Springer New York. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-3094-4_5.

Fletcher, R.J, L Ries, J Battin, et A.D Chalfoun. 2007. « The role of habitat area and edge in fragmented landscapes : definitively distinct or inevitably intertwined ? » *Canadian Journal of Zoology* 10 (85): 1017-1030.

FNTF. 2013. « Travaux publics - Recueil de statistiques 2012 ».

———. 2015a. « Les travaux publics, rapport d'activité 2015 ». n°73. TP Informations. http://www.fntp.fr/upload/docs/application/pdf/2015-12/recueil_de_statistiques_2014_final_4_complet.pdf.

———. 2015b. « Travaux publics - Recueil de statistiques 2014 ». http://www.fntp.fr/upload/docs/application/pdf/2016-05/recueil_statistiques_2014.pdf.

Foley, Smyth, Murphy, et Gallachóir. 2011. « A well-to-wheel analysis of electric vehicles and greenhouse gas savings ». In . University College Cork. http://www.itrn.ie/uploads/SesA1_ID103.pdf.

Fonseca, Casanova, et Espinosa. 2010. « Influence of Driving Style on Fuel Consumption and Emissions in Diesel-Powered Passenger Car ». In . http://oa.upm.es/13473/1/INVE_MEM_2010_78666.pdf.

Forman, Richard T. T., et Lauren E. Alexander. 1998. « Roads and Their Major Ecological Effects ». *Annual Review of Ecology and Systematics* 29 (1): 207-31. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.29.1.207>.

Fouqueray, Etienne. 2016. « Evaluation de l'impact économique de court terme et de moyen terme des chantiers de grandes infrastructures de transport - Le cas de la LGV SEA Tours-Bordeaux ». Université de Poitiers - Faculté de Sciences économiques.

Fourès, Jean-Marc, et Pierre Pech. 2015. « Prendre les espaces de temps pour maîtriser les impacts diffus générés par les grandes infrastructures de transport terrestre (ITT) sur la biodiversité ». *Vertigo*, n° Volume 15 Numéro 2 (septembre). <https://doi.org/10.4000/vertigo.16620>.

Franco, Vicente, Daniel Garraín, et Rosario Vidal. 2010. « Methodological Proposals for Improved Assessments of the Impact of Traffic Noise upon Human Health ». *The International Journal of Life Cycle Assessment* 15 (8): 869-82. <https://doi.org/10.1007/s11367-010-0213-2>.

Frischknecht, R, U Bollens, S Bosshart, M Ciot, L Ciseri, G Doka, R Dones, U Gantner, et R Hirschler. 1996. « Ökoinventare von energiesystemen: grundlagen für den ökologischen vergleich von energiesystemen und den einbezug von energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz ». Auflage n°3. Pau Scherrer institute: Gruppe Energie - Stoffe - Umwelt (ESU).

Fritschi, L, L Brown, R Kim, D Schwela, et S Kephapopolous. 2011. « Conclusions - Burden of disease from environmental noise: Quantification of healthy years life lost in Europe ». World Health Organisation.

Fussler, C.R, et B Krummenacher. 1991. « Ecobalances: a key to better environmental material choices in automobile design ». *Materials & Design*.

Gagnepain. 2005. « Les pneumatiques - influence du gonflage sur la consommation ». ADEME. <http://www2.ademe.fr/servlet/KBaseShow?sort=-1&cid=96&m=3&catid=13661>.

———. 2006. « La climatisation automobile - Impacts consommation et pollution ». Repères. ADEME. <http://www2.ademe.fr/servlet/getDoc?cid=96&m=3&id=25236&p1=00&p2=12&ref=17597>.

Gandar-Gervais, Catherine. 2008. « La responsabilité environnementale des cimenteries ». *Idées économiques et sociales* 153 (3): 57. <https://doi.org/10.3917/idee.153.0057>.

Garg, Bhagwan D., Steven H. Cadle, Patricia A. Mulawa, Peter J. Groblicki, Chris Laroo, et Graham A. Parr. 2000. « Brake Wear Particulate Matter Emissions ». *Environmental Science & Technology* 34 (21): 4463-69. <https://doi.org/10.1021/es001108h>.

Gautier. 2006. « La lutte contre le bruit de roulement ». janvier. http://www.arts-et-metiers.net/pdf/JeanLucGautier_1_16.pdf.

Gauvreau, Benoit. 2015. « APPROCHE MULTI-ÉCHELLE ET TRANS-DISCIPLINAIRE DE L'ACOUSTIQUE ENVIRONNEMENTALE ». Thesis, Université du Maine, Le Mans. <https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-01571231/document>.

Gense. 2000. « Driving style, fuel consumption and tail pipe emissions ». *TNO Automotive*, mars. <http://etec.vub.ac.be/publications/evs18jvm1.pdf>.

- Giani, Martina Irene, Giovanni Dotelli, Nicolò Brandini, et Luca Zampori. 2015. « Comparative Life Cycle Assessment of Asphalt Pavements Using Reclaimed Asphalt, Warm Mix Technology and Cold in-Place Recycling ». *Resources, Conservation and Recycling* 104 (novembre): 224-38. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.08.006>.
- Gobin, Christophe, et Stéphanie Chevallier. 2012. « The building signature : characterization and implementation in construction processes ». the Final Report of the European project SUPERBUILDINGS (Sustainability and performance assessment and benchmarking of buildings-Superbuildings).
- Goyer, Sarah, Michel Dauvergne, Louissette Wendling, Vincent Gaudefroy, et Christophe Ropert. 2012. « Environmental data of cold mix using emulsified bitumen for a better selection of road materials ». In . <https://trid.trb.org/view.aspx?id=1262605>.
- GPB. 2005a. « Le marché du bitume ». *Bitume Info*, Numéro spécial, , n° n°1: pp10-12.
- . 2005b. « Qualité, normes et spécifications ». *Bitume Info*, Numéro spécial, , n° n°1: p20.
- . 2015. « La disponibilité en bitume - du bitume de qualité et pour longtemps ». *Bitume Info* Eté-Automne 2015 (n°32): pp4-5.
- Greene, Suzanne, Mehdi Akbarian, Frank-Josef Ulm, et Jeremy Gregory. 2013. « Pavement Roughness and Fuel Consumption ». MIT - Concrete sustainability hub.
- Guillermé, A. 1984. *Corps à corps sur la route. Les routes, les chemins et l'organisation des services au XIXème siècle*. Paris: Presses de l'ENPC.
- Gustafsson, Mats, Göran Blomqvist, Anders Gudmundsson, Andreas Dahl, Per Jonsson, et Erik Swietlicki. 2009. « Factors Influencing PM10 Emissions from Road Pavement Wear ». *Atmospheric Environment* 43 (31): 4699-4702. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.04.028>.
- Haider, Syed Waqar, Wouter C. Brink, et Neeraj Buch. 2016. « Local Calibration of Flexible Pavement Performance Models in Michigan ». *Canadian Journal of Civil Engineering* 43 (11): 986-97. <https://doi.org/10.1139/cjce-2015-0556>.
- Häkkinen, T, et K Mäkelä. 1996. « Environmental impact of concrete and asphalt pavements ». 1752. Research Notes. Finland: Technical Research Center of Finland.
- Hall, Charles A.S., Jessica G. Lambert, et Stephen B. Balogh. 2014. « EROI of Different Fuels and the Implications for Society ». *Energy Policy* 64 (janvier): 141-52. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.05.049>.
- Hamdad, Hichem. 2018. *Recherche d'une description optimum des sources et systèmes vibroacoustiques pour la simulation du bruit de passage des véhicules automobiles*. Le Mans. <http://www.theses.fr/2018LEMA1032>.
- Hamet, Jean-François. 2003. « Les mécanismes de génération de bruit de roulement et l'influence des caractéristiques de chaussée ». *Acoustique & Techniques*, n° 32. http://www.infobruit.com/revues/78_09956.PDF.
- Hammarström, U, J Eriksson, R Karlsson, et M-R Yahya. 2012. « A rolling resistance model, a fuel consumption model and the traffic energy saving potential from changed road surface condition ». VTI report 748A. VTI. <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:670621/FULLTEXT01.pdf>.

Hammarström, U, et B Karlsson. 1991. « VETO: A Computer Program for Calculating Transport Costs as a Function of Road Standard ». VTI Report 501. Linköping: Swedish Road and Traffic Institute. <https://trid.trb.org/view.aspx?id=279636>.

Hammer, Emmanuel, Simon Steiner, Marlène Dias, et Erik Bühlmann. 2015. « Long-term acoustical performance of low noise road surfaces in urban areas in Switzerland ». In . Maastricht.

Harris, J. 1987. « QALYfying the Value of Life. » *Journal of Medical Ethics* 13 (3): 117.

Hauschild, Michael Z., Mark Goedkoop, Jeroen Guinée, Reinout Heijungs, Mark Huijbregts, Olivier Jolliet, Manuele Margni, et al. 2013. « Identifying Best Existing Practice for Characterization Modeling in Life Cycle Impact Assessment ». *The International Journal of Life Cycle Assessment* 18 (3): 683-97. <https://doi.org/10.1007/s11367-012-0489-5>.

Hawkins, Troy R., Bhawna Singh, Guillaume Majeau-Bettez, et Anders Hammer Strømman. 2013. « Comparative Environmental Life Cycle Assessment of Conventional and Electric Vehicles: LCA of Conventional and Electric Vehicles ». *Journal of Industrial Ecology* 17 (1): 53-64. <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2012.00532.x>.

Headey, Bruce, et Alexander J Wearing. 1992. *Understanding Happiness: A Theory of Subjective Well-Being*. Melbourne: Longman Cheshire.

Heggie, et Vickers. 1998. « Commercial Management and Financing of Roads ». World Bank. http://siteresources.worldbank.org/INTROADSHIGHWAYS/Resources/338993-1115316562809/10-poor_rd_maint.pdf.

Henderson, Andrew D., Michael Z. Hauschild, Dik van de Meent, Mark A. J. Huijbregts, Henrik Fred Larsen, Manuele Margni, Thomas E. McKone, Jerome Payet, Ralph K. Rosenbaum, et Olivier Jolliet. 2011. « USEtox Fate and Ecotoxicity Factors for Comparative Assessment of Toxic Emissions in Life Cycle Analysis: Sensitivity to Key Chemical Properties ». *The International Journal of Life Cycle Assessment* 16 (8): 701-9. <https://doi.org/10.1007/s11367-011-0294-6>.

Hetzel, Jean. 2009. *Indicateurs du développement durable dans la construction*. La Plaine-Saint-Denis: AFNOR.

Hoang. 2005. « Tronçons autoroutiers : une méthodologie de modélisation environnementale et économique pour différents scénarios de construction et d'entretien ».

Hoegh-Guldberg, O., P. J. Mumby, A. J. Hooten, R. S. Steneck, P. Greenfield, E. Gomez, C. D. Harvell, et al. 2007. « Coral Reefs Under Rapid Climate Change and Ocean Acidification ». *Science* 318 (5857): 1737-42. <https://doi.org/10.1126/science.1152509>.

Hong, Feng, et Jorge A. Prozzi. 2006. « Estimation of Pavement Performance Deterioration Using Bayesian Approach ». *Journal of Infrastructure Systems* 12 (2): 77-86. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1076-0342\(2006\)12:2\(77\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1076-0342(2006)12:2(77)).

Horvath. 2003. « Life-cycle Environmental and Economic Assessment of Using Recycled Materials for Asphalt pavements ». University of California, Berkeley. <http://uctc.net/research/papers/683.pdf>.

Huang, Yue, Roger Bird, et Margaret Bell. 2009. « A Comparative Study of the Emissions by Road Maintenance Works and the Disrupted Traffic Using Life Cycle Assessment and Micro-Simulation ». *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 14 (3): 197-204. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2008.12.003>.

- Huang, Yue, Roger N. Bird, et Oliver Heidrich. 2007. « A Review of the Use of Recycled Solid Waste Materials in Asphalt Pavements ». *Resources, Conservation and Recycling* 52 (1): 58-73. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2007.02.002>.
- Hubert, Jean-Paul, Pierre Pistre, et Jean-Loup Madre. 2016. « L'utilisation de l'automobile par les ménages dans les territoires peu denses : analyse croisée par les enquêtes sur la mobilité et le Recensement de la population », *ÉCONOMIE ET STATISTIQUE*, , n° N° 483-484-485: 26p.
- Hugrel, C, et R Joumard. 2004. « Transport routier - parc, usage et émissions des véhicules en France de 1970 à 2025 ». Rapport de recherche.
- Humbert, Sebastien, Julian D. Marshall, Shanna Shaked, Joseph V. Spadaro, Yurika Nishioka, Philipp Preiss, Thomas E. McKone, Arpad Horvath, et Olivier Jolliet. 2011. « Intake Fraction for Particulate Matter: Recommendations for Life Cycle Impact Assessment ». *Environmental Science & Technology* 45 (11): 4808-16. <https://doi.org/10.1021/es103563z>.
- Iacub, Marcela. 2016. *La fin du couple*. Les essais. Paris: Stock.
- IAU. 2013. « La circulation routière en Île-de-France en 2010 ». Institut d'Aménagement et d'Urbanisme. http://www.omnil.fr/IMG/pdf/la_circulation_routiere_en_idf_en_2010.pdf.
- IDRRIM. 2016. « Diagnostic et conception des renforcements de chaussées ». Référence.
- IEA. 2017. « Oil Information 2017 ». International Energy Agency.
- IFEN. 2008. « Global environmental and sustainable development indicators - Report and Summary of the Ifen Science Council Meeting 25 June 2007 ». n°11. les dossiers ifen. http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/fileadmin/documents/Produits_editoriaux/Publications/Etudes_et_documents/2008/dossier11_CS_indicateursGlobaux_anglais.pdf.
- INERIS. 2011. « Dioxyde de soufre (SO₂) ». Fiche de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques.
- Infociments. 2016. « Infociments 2016 - l'essentiel ». <http://www.infociments.fr/publications/industrie-cimentiere/statistiques/st-g08-2015>.
- INRS. 2016. « Dioxyde de soufre ». Base de données FICHES TOXICOLOGIQUES n°41. Fiche toxicologique.
- INSEE. 2014. « Tableaux de l'Économie Française - Édition 2014 - Pétrole - Charbon ». INSEE RÉFÉRENCES. <https://www.insee.fr/fr/statistiques/1288394?sommaire=1288404>.
- . 2016. « a production de pneumatiques en France : une industrie concentrée ». INSEE FOCUS n°54. INSEE. <https://www.insee.fr/fr/statistiques/1908485#graphique-figure5>.
- Inyim, Peeraya, Jose Pereyra, Michael Bienvenu, et Ali Mostafavi. 2016. « Environmental Assessment of Pavement Infrastructure: A Systematic Review ». *Journal of Environmental Management* 176 (juillet): 128-38. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.03.042>.
- Jawjit, Warit, Carolien Kroeze, et Suwat Rattanapan. 2010. « Greenhouse Gas Emissions from Rubber Industry in Thailand ». *Journal of Cleaner Production* 18 (5): 403-11. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2009.12.003>.

Jolliet, Olivier, Myriam Saadé-Sbeith, Shanna Shaked, Alexandre Jolliet, et Pierre Crettaz. 2016. *Environmental life cycle assessment*. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group.

Jolliet, Saadé, et Crettaz. 2005. *Analyse du cycle de vie - Comprendre et réaliser un écobilan*. Gérer l'environnement. Presses polytechniques et universitaires romandes.

Jouffe, Yves, David Caubel, Sylvie Fol, et Benjamin Motte-Baumvol. 2015. « Faire Face Aux Inégalités de Mobilité: Tactiques, Stratégies et Projets Des Ménages Pauvres En Périphérie Parisienne ». *Cybergeo*, janvier. <https://doi.org/10.4000/cybergeo.26697>.

Joumard, Robert. 1990. *Emissions unitaires de polluants des véhicules légers: étude*. Arcueil: Institut national de recherche sur les transports et leur sécurité.

Jullien, A., M. Dauvergne, et V. Cerezo. 2014. « Environmental Assessment of Road Construction and Maintenance Policies Using LCA ». *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 29 (juin): 56-65. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2014.03.006>.

Jullien, A., C. Proust, T. Martaud, E. Rayssac, et C. Ropert. 2012. « Variability in the Environmental Impacts of Aggregate Production ». *Resources, Conservation and Recycling* 62 (mai): 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.02.002>.

Jullien, Agnès, Vincent Gaudefroy, Anne Ventura, Chantal de la Roche, Régis Paranhos, et Pierre Monéron. 2010. « Airborne Emissions Assessment of Hot Asphalt Mixing: Methods and Limitations ». *Road Materials and Pavement Design* 11 (1): 149-69. <https://doi.org/10.1080/14680629.2010.9690264>.

Jungbluth, Niels. 2004. « Erdöl. In : Sachbilanzen von energiesystemen : Grundlagen für den ökologischen vergleich von energiesystemen und den einbezug von energisystemen in Ökobilanzen für die Scheiz (Ed. Dones R.) ». EcoInvent.

Kane, Do, et Piau. 2010. « On the Study of Polishing of Road Surface under Traffic Load ». *Journal of Transportation Engineering*, n° 136: 45-51.

Kang, Seunggu. 2013. « The development of a regional inventory database for the material phase of the pavement life-cycle with updated vehicle emission factors using moves ». Thèse de master, University of Illinois at Urbana-Champaign. https://www.ideals.illinois.edu/bitstream/handle/2142/45592/Seung%20Gu_Kang.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

Kang, Seunggu, Rebekah Yang, Hasan Ozer, et Imad Al-Qadi. 2014. « Life-Cycle Greenhouse Gases and Energy Consumption for Material and Construction Phases of Pavement with Traffic Delay ». *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2428 (décembre): 27-34. <https://doi.org/10.3141/2428-04>.

Kant, Emmanuel. 1785. *Fondements de la métaphysique des moeurs*.

Kellenberger, Daniel, Hans-Jörg Althaus, Tina Künniger, Martin Lehmann, Niels Jungbluth, et Philipp Thalmann. 2007. « Life Cycle Inventories of Building Products ». EcoInvent Report n°7. EcoInvent. https://db.ecoinvent.org/reports/07_BuildingProducts.pdf?area=463ee7e58cbf8.

Keoleian Gregory A., Kendall Alissa, Dettling Jonathan E., Smith Vanessa M., Chandler Richard F., Lepech Michael D., et Li Victor C. 2005. « Life Cycle Modeling of Concrete Bridge Design: Comparison

of Engineered Cementitious Composite Link Slabs and Conventional Steel Expansion Joints ». *Journal of Infrastructure Systems* 11 (1): 51-60. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1076-0342\(2005\)11:1\(51\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1076-0342(2005)11:1(51)).

Kerali, Odoki, et Stannard. 2006. *HDM-4 - Vue d'ensemble de HMD-4 (Version 2)*. Vol. 1. AIPCR - Banque Mondiale.

http://www.hdmglobal.com/esp/hdm4v2_downloadGSPDF.asp?File=HDM4Version2_Vol1_Fra_webversion.pdf.

Klein, A.-M., B. E Vaissiere, J. H Cane, I. Steffan-Dewenter, S. A Cunningham, C. Kremen, et T. Tschardtke. 2007. « Importance of Pollinators in Changing Landscapes for World Crops ». *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 274 (1608): 303-13. <https://doi.org/10.1098/rspb.2006.3721>.

Knoepfel, Peter, et Marc Münster. 2004. *Guide des outils d'évaluation de projets selon le développement durable*. Office fédéral du développement territorial (ARE)DETEC - Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication. https://www.vd.ch/fileadmin/user_upload/themes/environnement/developpement_durable/fichiers_pdf/ARE_outils_evaluation.pdf.

Kolli, Zehir. 2012. « Dynamique de renouvellement du parc automobile: Projection et impact environnemental ». UNIVERSITE DE PARIS I, PANTHEON-SORBONNE. <http://hal.archives-ouvertes.fr/tel-00860364/>.

Kragh, Jørgen, Bent Andersen, et Gilles Pigasse. 2013. « Acoustic ageing of pavement - dvs-drd joint research programme – super silent traffic ». n°460. Ministère des transports danois - Direction des routes (Vejdirektoratet). http://vejdirektoratet.dk/DA/viden_og_data/publikationer/Lists/Publikationer/Attachments/798/acoustic%20ageing%20of%20pavement.pdf.

Kucukvar, Murat, Mehdi Noori, Gokhan Egilmez, et Omer Tatari. 2014. « Stochastic decision modeling for sustainable pavement designs ». *The International Journal of Life Cycle Assessment* 19 (6): 1185-99. <https://doi.org/10.1007/s11367-014-0723-4>.

Laboratoire central des ponts et chaussées (France). 2001. *Commande et contrôle des reconnaissances géotechniques de tracés*. Paris: LCPC.

Laganier, R, et J Lucas. 1990. « The Influence of Pavement Evenness and Macrotecture on Fuel Consumption ». In *Surface Characteristics of Roadways: International Research and Technologies*, édité par We Meyer et J Reichert, 454-454-56. 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959: ASTM International. <https://doi.org/10.1520/STP23381S>.

Laita, A., J. S. Kotiaho, et M. Mönkkönen. 2011. « Graph-Theoretic Connectivity Measures: What Do They Tell Us about Connectivity? » *Landscape Ecology* 26 (7): 951-67. <https://doi.org/10.1007/s10980-011-9620-4>.

Lave, Lester B., Elisa Cobas-Flores, Chris T. Hendrickson, et Francis C. McMichael. 1995. « Using Input-Output Analysis to Estimate Economy-Wide Discharges ». *Environmental Science & Technology* 29 (9): 420A-426A. <https://doi.org/10.1021/es00009a003>.

LCPC. 1998. « Catalogue des dégradations de surface des chaussées ». 52. Techniques et méthodes des LPC - Méthode d'essai. <http://portail.documentation.equipement.gouv.fr/dtrf/notice.html?id=Dtrf-0001954>.

LCPC-Sétra. 2000. « Aide à la gestion de l'entretien des réseaux routiers – volet chaussées - méthode ».

LCPC-Sétra, France. 1994. *Conception et dimensionnement des structures de chaussée*. Paris; Bagnaux: LCPC ; SETRA.

Le Corbusier. 1935. *La ville radieuse*. Edition de l'architecture d'aujourd'hui.

Le Guern, Y, C Petiot, et E Schloesing. 2011. « Mode de prise en compte de la fin de vie lors de la réalisation d'analyses de cycle de vie (ACV) « produits » - Etat de l'Art ». RECORD 10-1019/1A. Bio Intelligence Service. http://www.record-net.org/storage/etudes/10-1019-1A/rapport/Rapport_record10-1019_1A.pdf.

Le Maître, Hélène. 2014. « Monétarisation des impacts sur le bruit des projets routiers ». Rapport d'étude. Céréma. http://www.infra-transports-materiaux.cerema.fr/IMG/pdf/1402w- rapport_monetarisation_bruit-2.pdf.

Le Maître, Süssner, et Zarak. 1998. « Evaluation of Tire Wear Performance ». Society of Automotive Engineers, Inc. https://www.google.fr/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&ved=0CDYQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.lpcb.org%2Findex.php%2Fcomponent%2Fdocman%2Fdoc_download%2F62-1998-france-evaluation-of-tire-wear-performance%3Fitemid%3D32&ei=syj5UdvZDKLA7Aauy4CgCw&usq=AFQjCNGd9t0rQfw7JfKTPKt4649Slq8Dyw&sig2=WtARsoOwZmfj25mHa1Nn-Q.

Le Moigne, Jean-Louis. 1984. *La théorie du système général: théorie de la modélisation*. 2e éd. mise à jour. Systèmes-décisions. Paris: Presses universitaires de France.

Leclerc, Cédric. 2008. « Réduction de la traînée d'un véhicule automobile simplifié à l'aide du contrôle actif par jet synthétique ». Toulouse, France: Institut national polytechnique de Toulouse.

Leclercq. 2002. « Modélisation dynamique du trafic et applications à l'estimation du bruit routier ». Insa Lyon. <http://theses.insa-lyon.fr/publication/2002ISAL0070/these.pdf>.

Lelong, J. 1999. « Vehicle Noise Emission: evaluation of tyre/road and motor noise contribution ». In *Proceedings of Internoise 1999*. Fort Lauderdale, Florida, USA.

Lelong, et Michelet. 2001. « Passengers cars. Power unit and tyre-road noise, driving behaviour: what are the stakes? » In . http://www.inrets.fr/ur/ite/publications/publications-pdf/Lelong-publi/emission_synthese.pdf.

Leontief, Wassily. 1970. « Environmental Repercussions and the Economic Structure: An Input-Output Approach ». *The Review of Economics and Statistics* 52 (3): 262. <https://doi.org/10.2307/1926294>.

Leontief, Wassily W. 1936. « Quantitative Input and Output Relations in the Economic Systems of the United States ». *The Review of Economics and Statistics* 18 (3): 105. <https://doi.org/10.2307/1927837>.

Lepert. 2006. « Gestion technico-économique des infrastructures routières ». *Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées*, n° 261-62: 3-23.

Leurent, Fabien. 2013. « Chapitre 4 - L'équipement territorial au prisme de l'éco-conception : quels principes et quelles méthodes pour l'aménagement et le transport? » In *Eco-conception des ensembles bâtis et des infrastructures*, pp 57-105. Presses de l'Ecole des mines.

Leurent, Fabien, et Elisabeth Windisch. 2013. « Electric vs. Gasoline-powered vehicles: the effects on a nation's economic production and public finances ». *Routes/Roads*, n° n°357.

- <https://routesroadsmag.piarc.org/en/Routes-Roads-Magazine-Issue-357-Climate-Change/1685,Routes-Roads-Magazine-Electric-Vs-Gasoline-Effects-Economy-Finances#c3e63u7JL70>.
- Levrel, Harold. 2006. « Biodiversité et développement durable : quels indicateurs ? » EHESS. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00128430/document>.
- Lin, Tse-Hung, Yu-Shu Chien, et Wei-Ming Chiu. 2016. « Rubber tire life cycle assessment and the effect of reducing carbon footprint by replacing carbon black with graphene ». *International Journal of Green Energy* 14 (novembre): 97-104. <https://doi.org/10.1080/15435075.2016.1253575>.
- Lopes, M.S, et C.H Foyer. 2011. « The impact of high CO2 on plant abiotic stress tolerance ». In *Crop stress management and global climate change*, pp 85-103.
- Louhghalam, A, M Akbarian, et F-J Ulm. 2014. « Pavement Infrastructures Footprint: The Impact of Pavement Properties on Vehicle Fuel Consumption ». Massachusetts Institute of Technology Cambridge, Massachusetts, United States. <https://cshub.mit.edu/sites/default/files/documents/louhghalam-Euro-C-2014.pdf>.
- Loveridge, Scott. 2004. « A Typology and Assessment of Multi-Sector Regional Economic Impact Models ». *Regional Studies* 38 (3): 305-17. <https://doi.org/10.1080/003434042000211051>.
- Lundberg, Jakob, et Fredrik Moberg. 2003. « Mobile Link Organisms and Ecosystem Functioning: Implications for Ecosystem Resilience and Management ». *Ecosystems* 6 (1): 0087-0098. <https://doi.org/10.1007/s10021-002-0150-4>.
- Lutsey, N, et D Sperling. 2006. « Energy Efficiency, Fuel Economy, and Policy Implications ». *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Institute of Transportation Studies, University of California, Davis, , n° n°1941.
- Maibach, M, D Peter, et B Seiler. 1999. « Ökoinventar transporte : Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Transportsystemen und den Eingebzug von Transportsystemen in Ökobilanzen technischer ». Zurich: INFRAS.
- Manney, Gloria L., Michelle L. Santee, Markus Rex, Nathaniel J. Livesey, Michael C. Pitts, Pepijn Veefkind, Eric R. Nash, et al. 2011. « Unprecedented Arctic ozone loss in 2011 ». *Nature* 478 (7370): 469-75. <https://doi.org/10.1038/nature10556>.
- Marshall, Alfred. 1890. *Principles of Economics*.
- Martaud, Thomas. 2008. « Evaluation environnementale de la production de granulats naturels en exploitation de carrière : indicateurs, modèles et outils ». Thèse de doctorat en Sciences de l'univers, Université d'Orléans. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00412080>.
- Maslow, Abraham. 1943. *A theory of Human motivation*.
- Mazumder, Mithil, Vedaraman Sriraman, Hyun Hwan Kim, et Soon-Jae Lee. 2016. « Quantifying the Environmental Burdens of the Hot Mix Asphalt (HMA) Pavements and the Production of Warm Mix Asphalt (WMA) ». *International Journal of Pavement Research and Technology* 9 (3): 190-201. <https://doi.org/10.1016/j.ijprt.2016.06.001>.
- McGhee, Kevin, et James Gillespie. 2006. « Impact of a Smoothness Incentive/Disincentive on Hot-Mix Asphalt Maintenance Resurfacing Costs ». FHWA/VTRC 06-R28, VTRC 06-R28. <https://ntl.bts.gov/lib/37000/37300/37317/06-r28.pdf>.

Meadows, Donella H., et Club of Rome, éd. 1972. *The Limits to growth; a report for the Club of Rome's project on the predicament of mankind*. New York: Universe Books.

MEDDE. 2013. « Chiffres clés du transport - Edition 2013 ». Ministère de l'Écologie, du développement durable et de l'énergie. http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/fileadmin/documents/Produits_editoriaux/Publications/Reperes/2013/reperes-transport-2013.pdf.

———. 2014a. « Calcul d'analyse financière ». Fiche Outil sur l'Évaluation Socio-économique des projets de transport. <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/VI.1.pdf>.

———. 2014b. « Chiffres clés du transport - Edition 2014 ». http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/fileadmin/documents/Produits_editoriaux/Publications/Reperes/2014/reperes-chiffres-cles-transport-ed2014-v2.pdf.

———. 2014c. « Effets sur les emplois et les compétences ». Fiche Outil sur l'Évaluation Socio-économique des projets de transport. <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/IV.1.pdf>.

Mellios, Giorgos, Stefan Hausberger, Mario Keller, Christos Samaras, Leonidas Ntziachristos, Panagiota Dilara, Georgios Fontaras, European Commission, Joint Research Centre, et Institute for Energy and Transport. 2009. *Parameterisation of Fuel Consumption and CO2 Emissions of Passenger Cars and Light Commercial Vehicles for Modelling Purposes*. Luxembourg: Publications Office. <http://dx.publications.europa.eu/10.2788/58071>.

MELTT. 1996. « Dictionnaire de l'entretien routier - volume 1-2-3 ». MELTT.

Meyer, Rodolphe. 2017. « Development of time dependent characterization factors for life cycle impact assesment of noise emissions from mobility ». Luxembourg: Luxembourg Institute of Science and Technology (LIST) - Université de Cergy-Pontoise.

Meyer, Rodolphe, Enrico Benetto, Elorri Igos, et Catherine Lavandier. 2017. « Analysis of the Different Techniques to Include Noise Damage in Life Cycle Assessment. A Case Study for Car Tires ». *The International Journal of Life Cycle Assessment* 22 (5): 744-57. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1188-4>.

Michelin. 2007. « Brochure recreusage pour véhicules Poids Lourds ». http://www.michelintransport.com/ple/front/document.DocumentRepositoryServlet?codeDocument=2904&codeRepository=MICH_PLOE&codeRubrique=CatalogueTechnique.

Miedema, H. M. E, W Passchier-Vermeer, et H Vos. 2003. *Elements for a Position Paper on Night-Time Transportation Noise and Sleep Disturbance*. Delft: TNO Inro.

Miedema, Henk M.E., et Catharina G.M. Oudshoorn. 2001. « Annoyance from Transportation Noise: Relationships with Exposure Metrics DNL and DENL and Their Confidence Intervals ». *Environmental Health Perspectives* 109 (4): 409-16. <https://doi.org/10.1289/ehp.01109409>.

Millennium Ecosystem Assessment, éd. 2005. *Ecosystems and human well-being: synthesis*. Washington, DC: Island Press.

Ministère de l'Économie, de l'Industrie et du Numérique. 2014. « L'ÉCONOMIE CIRCULAIRE, OU LA COMPÉTITION POUR LES RESSOURCES - Etude annuelle 2014 du Conseil Général de l'Économie ».

- Ministère de l'Environnement. 2017. « Chiffres clés de l'énergie - Édition 2016 ». MEEM. http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/fileadmin/user_upload/Datalab-13-CC-de_l-energie-edition-2016-fevrier2017.pdf.
- Mladenovič, Ana, Janez Turk, Jaka Kovač, Alenka Mauko, et Zvonko Cotič. 2015. « Environmental Evaluation of Two Scenarios for the Selection of Materials for Asphalt Wearing Courses ». *Journal of Cleaner Production* 87 (janvier): 683-91. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.10.013>.
- Mohd Nor, Zairossani. 2012. « Addressing sustainability of natural rubber industry through life cycle assessment ». présenté à International rubber conference 2012, Kerala, India. <http://clinic.rubberboard.org.in/PDF/ircpdf/CM-01%20Zairossani%20Mohd.pdf>.
- Moliner Santistevé, Enrique, Rosario Vidal Nadal, Vicente Franco García, et Daniel Garraín Cordero. 2014. « MÉTODO PARA EVALUAR EL IMPACTO DEL RUIDO DEL TRANSPORTE RODADO EN EL MARCO DEL ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA ». *DYNA INGENIERIA E INDUSTRIA* 89 (3): 77-84. <https://doi.org/10.6036/5804>.
- Molleron, Henri, et Vincent Besse. 2016. « Cas des fumées de bitume - Contexte historique ». *Revue Générale des Routes et de l'Aménagement*, n° 939: pp 52-60.
- Moretti, Laura, Vittorio Mandrone, Antonio D'Andrea, et Silvia Caro. 2017. « Comparative "from Cradle to Gate" Life Cycle Assessments of Hot Mix Asphalt (HMA) Materials ». *Sustainability* 9 (3): 400. <https://doi.org/10.3390/su9030400>.
- Muller, Isabelle, Jean-Yves Touboulic, et Jean-Michel Michou. 2016. « Combustibles, carburants et bitume - Sécurité d'approvisionnement et transition énergétique ». *Revue Générale des Routes et de l'Aménagement*, n° 940: pp 16-21.
- Müller-Wenk, Ruedi. 2004. « A Method to Include in Lca Road Traffic Noise and Its Health Effects ». *The International Journal of Life Cycle Assessment* 9 (2): 76-85. <https://doi.org/10.1007/BF02978566>.
- Munda, Giuseppe. 2007. *Social Multi-Criteria Evaluation for a Sustainable Economy*. Springer Science & Business Media.
- Musy, André. 2005. *Cours d'Hydrologie Générale de l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne*. Lausanne, Suisse. <http://echo2.epfl.ch/e-drologie/chapitres/chapitre1/main.html>.
- Naess, Arne. 2008. « The shallow and the deep, long-range ecology movement. A summary* ». *Inquiry* 16 (août): 95-100. <https://doi.org/10.1080/00201747308601682>.
- National Research Council, et Transportation Research Board. 2010. *Highway Capacity Manual, 2010*. Washington, D.C.: Transportation Research Board.
- Ng, Y.-K. 2003. « From Preferences to Happiness: Towards a More Complete Welfare Economics ». *Social Choice and Welfare*, 2003, 20 édition.
- Ntziachristos, Leonidas, et Zissis Samaras. 2017. « EMEP/EEA Air pollutant emissions inventory guidebook 2017 - Passenger cars, light commercial trucks, heavy-duty vehicles including buses and motor cycles ». Copenhagen: European environmental agency.
- OCDE. 1992. « Le chargement dynamique des chaussées ».
- . 1998. « Technical report - Dynamic interaction between vehicles and infrastructure experiment (Divine) ». <http://www.oecd.org/sti/transport/roadtransportresearch/2754406.pdf>.

Odoki, et Kerali. 2000. *HDM-4 - Analytical Framework and Model Descriptions*. Vol. 4. AIPCR et Banque Mondiale.

OMS. 2016. « Qualité de l'air ambiant et santé ». N°313. Aide-mémoire.

Ongel, Aybike. 2016. « Inclusion of Noise in Environmental Assessment of Road Transportation ». *Environmental Modeling & Assessment* 21 (2): 181-92. <https://doi.org/10.1007/s10666-015-9477-z>.

Ongel, Aybike, et Fatih Sezgin. 2016. « Assessing the Effects of Noise Abatement Measures on Health Risks: A Case Study in Istanbul ». *Environmental Impact Assessment Review* 56 (janvier): 180-87. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2015.10.008>.

Orfeuil, Jean-Pierre. 1984. « Les budgets énergie-transport ». INRETS. <https://trid.trb.org/view/1036283>.

Organisation for Economic Co-operation and Development Staff. 2008. *Perspectives de l'Environnement de l'OCDE à l'horizon 2030. Chapitre 9 - Biodiversité*. Washington; Biggleswade: Organization for Economic Cooperation & Development Turpin Distribution Services Limited [distributor. <https://www.oecd.org/fr/env/ressources/43901839.pdf>.

OVE. 2017. « TCO Scope 2017 ». *Les Editions de l'Observatoire du Véhicule d'Entreprise*, 2017.

Ozer, Hasan, Rebekah Yang, et Imad L. Al-Qadi. 2017. « Quantifying Sustainable Strategies for the Construction of Highway Pavements in Illinois ». *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 51 (mars): 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2016.12.005>.

Pacheco-Torgal, Fernando, Luisa F. Cabeza, Joao Labrincha, et Aldo Giuntini de Magalhaes. 2014. *Eco-efficient construction and building materials: life cycle assessment (lca), eco-labelling and case studies*. Woodhead publishing series in civil and structural engineering, no. 49. Philadelphia, PA: Woodhead Pub. https://books.google.fr/books?id=_ZjiAgAAQBAJ&pg=PA535&lpg=PA535&dq=Pacheco-Torgal+et+al+2014+tire+truck&source=bl&ots=e8d2E4uhOb&sig=YcY096eHHW87_XXUqfQgCLN74-I&hl=en&sa=X&ved=0ahUKEwiE-Pnau_rWAhUBShQKHxIxCvsQ6AEINzAC#v=onepage&q&f=false.

Papagiannakis, A. T. 2000. « Methodology to Improve Pavement-Investment Decisions ». NCHRP Research Results Digest 246. Washington, DC: Transportation Research Board, National Research Council.

Parsley, L. L, et R Robinson. 1982. « The TRRL, road investment model for developing countries (RTIM2) ». TRRL Laboratory Report 1057. Crowthorne, UK: Transport and Road Research Laboratory.

Paskoff, Roland. 1998. « Conséquences possibles sur les milieux littoraux de l'élévation du niveau de la mer prévue pour les prochaines décennies ». *Annales de Géographie* 107 (600): 233-48. <https://doi.org/10.3406/geo.1998.20847>.

Petit, J.R., et al. 1999. « Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica ». *Nature*, n° 399 (juin): 429-36. <https://doi.org/10.1038/20859>.

Petit, Pascal. 2016. « De l'exposition professionnelle aux hydrocarbures aromatiques polycycliques à l'estimation du risque de survenue de cancers professionnels ». Université Grenoble Alpes.

Peuportier, Bruno, Charlotte Roux, Marie-Lise Pannier, et Natalia Kotelnikova-Weiler. 2017. « Using LCA to assess urban projects, a case study ». In . IFP, Paris.

Pigou, Arthur. 1932. *The Economics of Welfare*. Macmillan and Co. London. <http://www.econlib.org/library/NPDBooks/Pigou/pgEW.html>.

Pinet, Michel, et Marc D'Aubreby. 2015. « Financement des infrastructures et transport routier - Rapport final ». Rapport n° 010144-01. CGEDD. <http://www.actu-environnement.com/media/pdf/news-25009-rapport-cgedd-financement-infrastructures-transport.pdf>.

Plessis, Hw du, At Visser, et Pc Curtayne. 1990. « Fuel Consumption of Vehicles as Affected by Road-Surface Characteristics ». In *Surface Characteristics of Roadways: International Research and Technologies*, édité par We Meyer et J Reichert, 480-480-17. 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959: ASTM International. <https://doi.org/10.1520/STP23383S>.

Poelman, M.A, et R.P. Weir. 1992. « Vehicle Damage Induced by Road Surface Roughness ». In *Vehicle, Tire, Pavement Interface*, p97-15. Philadelphia: ASTM International. <https://doi.org/10.1520/STP15911S>.

Potts, Simon G., Jacobus C. Biesmeijer, Claire Kremen, Peter Neumann, Oliver Schweiger, et William E. Kunin. 2010. « Global Pollinator Declines: Trends, Impacts and Drivers ». *Trends in Ecology & Evolution* 25 (6): 345-53. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2010.01.007>.

Prades, José A. 1995. *L'éthique de l'environnement et du développement*. 1. éd. Que sais-je? 2967. Paris: Presses universitaires de France.

Prozzi, Jorge. 2001. « Modeling pavement performance by combining field and experimental data ». UC Berkeley. <http://www.uctc.net/research/diss066.pdf>.

Prozzi, Jorge A., et Samer M. Madanat. 2003. « Incremental Nonlinear Model for Predicting Pavement Serviceability ». *Journal of Transportation Engineering* 129 (6): 635-41. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(2003\)129:6\(635\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2003)129:6(635)).

Quinet, E, et al. 2013. « L'évaluation socioéconomique des investissements publics - Rapport final ». Tome 1.

Quirion, Philippe. 2013. « L'effet net sur l'emploi de la transition énergétique en France : une analyse input-output du scénario négaWatt ». Document de travail No 46-2013. CIRED. <http://www2.centre-cired.fr/IMG/pdf/CIREDWP-201346.pdf>.

Rainer, F. 2004. « NewExt : New Elements for the Assessment of External Costs from Energy Technologies ». Rapport final pour la commission européenne. Stuttgart.

Ramsey, F. P. 1928. « A Mathematical Theory of Saving ». *The Economic Journal* 38 (152): 543. <https://doi.org/10.2307/2224098>.

Rasutis, Daina. 2014. « Comparative Life Cycle Assessment of Conventional and Guayule Automobile Tires ». Master of Science Thesis Dissertation, Arizona State University. https://repository.asu.edu/attachments/135187/content/Rasutis_asu_0010N_14059.pdf.

Rawls, John. 1999. *A theory of justice*. Rev. ed. Cambridge, Mass: Belknap Press of Harvard University Press.

Rèche, M. 2004. « Effet des travaux d'entretien sur les lois d'évolution des dégradations de chaussées ». Clermont-Ferrand: Université Blaise Pascal.

Renault. 2011. « Fluence and Fluence Z.E. Life Cycle Assessment ». Renault. <https://group.renault.com/wp-content/uploads/2014/09/fluence-acv-2011.pdf>.

———. 2015. « Renault Twingo - 2015 - Life Cycle Assessment results - Renault LCA methodology ». Renault. https://group.renault.com/wp-content/uploads/2016/07/final_en_rapport-twingo.pdf.

Reyna, Janet L., Mikhail V. Chester, Soyoung Ahn, et Andrew M. Fraser. 2015. « Improving the Accuracy of Vehicle Emissions Profiles for Urban Transportation Greenhouse Gas and Air Pollution Inventories ». *Environmental Science & Technology* 49 (1): 369-76. <https://doi.org/10.1021/es5023575>.

Ridge, Lynne. 1998. « EUCAR - Automotive LCA Guidelines - Phase 2 ». In . <https://doi.org/10.4271/982185>.

RMA. 2006. « Scrap Tire Markets in the United States ». 2005 Edition. Rubber Manufacturers Association. <http://www.energyjustice.net/files/tires/files/rma2005.pdf>.

Robert, et Lafon. 2011. « Route - Matériaux, durabilité des chaussées ». <http://www-lmdc.insa-toulouse.fr/pres/mastergc/telechargement/pedagogie/COURS%20ROUTE%20UPS%20MASTER%202011%20II%20Impression.pdf>.

Röder, A. 2001. « Integration of life-cycle assessment and energy planning models for the evaluation of car powertrains and fuels ». Ph.D. dissertation, Zurich, Switzerland: ETH-14291, Swiss Federal Institute of Technology.

Rodrigue, Jean-Paul, Claude Comtois, et Brian Slack. 2013. *The geography of transport systems*. Third edition. Abingdon, Oxon: Routledge.

Rosenbaum, Ralph K., Till M. Bachmann, Lois Swirsky Gold, Mark A. J. Huijbregts, Olivier Jolliet, Ronnie Juraske, Annette Koehler, et al. 2008. « USEtox—the UNEP-SETAC Toxicity Model: Recommended Characterisation Factors for Human Toxicity and Freshwater Ecotoxicity in Life Cycle Impact Assessment ». *The International Journal of Life Cycle Assessment* 13 (7): 532-46. <https://doi.org/10.1007/s11367-008-0038-4>.

Rosenbaum, Ralph K., Mark A. J. Huijbregts, Andrew D. Henderson, Manuele Margni, Thomas E. McKone, Dik van de Meent, Michael Z. Hauschild, et al. 2011. « USEtox Human Exposure and Toxicity Factors for Comparative Assessment of Toxic Emissions in Life Cycle Analysis: Sensitivity to Key Chemical Properties ». *The International Journal of Life Cycle Assessment* 16 (8): 710-27. <https://doi.org/10.1007/s11367-011-0316-4>.

Rosnay, Joël de. 1975. *Le macroscope: vers une vision globale*. Paris: Éd. Points.

Royannez, Gil-ian. 2015. « Compréhension et prise en compte de la notion de bonheur, quel impact dans la réflexion économique ? (Le bonheur, un concept difficile à mesurer) ». *Kairos* n°1 (avril).

Sachs, Jeffrey. 2007. « Climate change refugees ». *Scientific American*, n° 296.6: p43.

Saintillan, Christophe. 2013. « Refonte de la politique d'entretien en France ». présenté à conférence-débat du Conseil, Rome (Italie), novembre 7. <http://www.piarc.org/fr/2013-11-07,20756.htm>.

Sala, Serenella, et Jessica Andreasson. 2018. « Improving Interpretation, Presentation and Visualisation of LCA Studies for Decision Making Support ». In *Designing Sustainable Technologies, Products and Policies*, édité par Enrico Benetto, Kilian Gericke, et Mélanie Guiton, 337-42. Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-66981-6_37.

Sandberg, U, et G Descornet. 1980. « Road surface influence on tire/road noise. Part I ». In , 261-72. Miami.

Sandberg, Ulf. 1990. « Road Macro- and Megatexture Influence on Fuel Consumption ». In *Surface characteristics of roadways*. Meyer/Reichert editors. http://books.google.fr/books?hl=fr&lr=&id=hGoJxlkTrckC&oi=fnd&pg=PA460&dq=Sandberg,+Ulf+S.+I.+Ro+ad+Macro+and+Megatexture+Influence+on+Fuel+Consumption.+ASTM+STP+1031+page+460-479,+USA+1990&ots=cLlqI_xoFP&sig=I5C19usl6E655ak-WS0NVF9DfzA&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false.

SANEF. 2017. « Dossier de presse - Résultats de l'Observatoire Sanef des comportements ». 6eme édition. <http://www.sanefgroupe.com/var/sanef/storage/media/presse/DP-observatoire-des-comportements/files/docs/all.pdf>.

Santero, Nicholas J., Eric Masanet, et Arpad Horvath. 2011a. « Life-Cycle Assessment of Pavements. Part I: Critical Review ». *Resources, Conservation and Recycling* 55 (9-10): 801-9. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.03.010>.

———. 2011b. « Life-Cycle Assessment of Pavements Part II: Filling the Research Gaps ». *Resources, Conservation and Recycling* 55 (9-10): 810-18. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.03.009>.

Santos, Joao. 2015. « A comprehensive life cycle approach for managing pavement systems ». Portugal: Universidade de Coimbra. <https://estudogeral.sib.uc.pt/bitstream/10316/30093/1/A%20Comprehensive%20Life%20Cycle%20A%20pproach%20for%20Managing%20Pavement%20Systems.pdf>.

Sassi, F. 2006. « Calculating QALYs, Comparing QALY and DALY Calculations ». *Health Policy and Planning* 21 (5): 402-8. <https://doi.org/10.1093/heapol/czl018>.

Saur, K., M. Schuckert, J. Gediga, H. Florin, et J. Hesselbach. 1997. « LCA Study on Tires With Reduced Roll Resistance ». In . <https://doi.org/10.4271/971159>.

Sayagh, Shahinaz, Anne Ventura, Tung Hoang, Denis François, et Agnès Jullien. 2010. « Sensitivity of the LCA Allocation Procedure for BFS Recycled into Pavement Structures ». *Resources, Conservation and Recycling* 54 (6): 348-58. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2009.08.011>.

Sayers, Michael, et Steven Karamihas. 1998. « The little book of profiling - basic information about measuring and interpreting road profiles ». The Regent of the University of Michigan. <http://www.umtri.umich.edu/content/LittleBook98R.pdf>.

Schwartz, Peter, et Doug Randall. 2006. *Rapport secret du Pentagone sur le changement climatique*. Paris: Éditions Allia.

Schwarz, Norbert, et Fritz Strack. 1999. « Reports of Subjective Well-Being: Judgmental Processes and Their Methodological Implications ». In *Well-being: The foundations of hedonic psychology*. Edition: 1. Russel Sage Foundation.

Schweimer, Georg, et Marcel Levin. 2000. « Life Cycle Inventory for the Golf A4 ». Versmold: Volkswagen AG. <http://www.wz.uw.edu.pl/pracownicyFiles/id10927-volkswagen-life-cycle-inventory.pdf>.

Scitovsky, Tibor. 1992. *The joyless economy: the psychology of human satisfaction*. Rev. ed. New York: Oxford University Press.

Sebaaly, Peter E., et Nader Tabatabaee. 1992. « Effect of Tire Parameters on Pavement Damage and Load-Equivalency Factors ». *Journal of Transportation Engineering* 118 (6): 805-19. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(1992\)118:6\(805\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(1992)118:6(805)).

Seiler, A. 2001. « Ecological Effects of Roads, A review ». Swedish University of Agricultural Sciences - Department of Conservation.

Sen, Amartya. 1985. *Commodities and capabilities*. Professor Dr. P. Hennisman lectures in economics, v. 7. Amsterdam ; New York : New York, N.Y., U.S.A: North-Holland ; Sole distributors for the U.S.A. and Canada, Elsevier Science Pub. Co.

Serres, Michel. 2009. *Le contrat naturel*. Paris: Flammarion.

Setra. 1998. « aménagement des carrefours interurbains sur les routes principales - carrefours plans ».

Sétra. 2000a. « Instruction sur les Conditions Techniques d'Aménagement des Autoroutes de Liaison ».

———. 2000b. « Instruction sur les Conditions Techniques d'Aménagement des Routes Nationales ».

———. 2009a. « Emissions routières de polluants atmosphériques - Courbes et facteurs d'influence ». 92. Note d'information Sétra.

———. 2009b. « Guide méthodologique - Préviation du bruit routier - Tome 2 - Méthode de calcul de propagation du bruit incluant les effets météorologiques ». LRS 2009-76-021.

———. 2009c. « Préviation du bruit routier 1 - Calcul des émissions sonores dues au trafic routier ». Sétra. <https://www.cerema.fr/fr/centre-ressources/boutique/prevision-du-bruit-routier-calcul-emissions-sonores-dues-au>.

———. 2009d. « Sondage de circulation 2004-2005 - Document de synthèse ». Les rapports. http://www.setra.equipement.gouv.fr/IMG/pdf/0942w_Sondage_de_circulation_2004-2005.pdf.

———. 2010. « Calage et validation des modèles de trafic - Techniques appliquées à l'affectation routière interurbaine ».

———. 2011. « L'impact des fondants routiers sur l'environnement - Etat des connaissances et pistes d'actions ». Note d'information 94. Economie Environnement Conception. http://www.infra-transport-materiaux.cerema.fr/IMG/pdf/1109w_NI_EEC_94.pdf.

Sétra - Observatoire des Techniques de Chaussées. 1997. « Béton Bitumineux Très Minces et Ultra-Minces ». 94. <http://portail.documentation.equipement.gouv.fr/dtrf/pdf/pj/Dtrf/0000/Dtrf-0000609/DT609.pdf>.

SFA. 2010. « Chapitre 1 ». In *Le livre blanc de l'acoustique en France 2010 - L'acoustique dans les grands secteurs d'activité - Automobile*, 16-18. <https://www.sfa.asso.fr/fr/documentation/livre-blanc/page16.pdf>.

Sibieude, Christophe, et Thierry Sibieude. 1993. « Industrie du ciment ». In *Les rouages économiques de l'environnement*, pp204-205. https://books.google.fr/books?id=RLDp9Tbx548C&pg=PA204&lpg=PA204&dq=consommation+%C3%A9nerg%C3%A9tique+cimenterie+france&source=bl&ots=qYLa5P-Tq9&sig=U4FLNOYxD1vsRmrXOCp_NvcCuel&hl=en&sa=X&ved=0ahUKEwjz2dq54tLYAhVC1xQKHYaTAzg4ChDoAQh2MAk#v=onepage&q=consommation%20%C3%A9nerg%C3%A9tique%20cimenterie%20france&f=false.

- Simons, Andrew. 2016. « Road Transport: New Life Cycle Inventories for Fossil-Fuelled Passenger Cars and Non-Exhaust Emissions in EcoInvent V3 ». *The International Journal of Life Cycle Assessment* 21 (9): 1299-1313. <https://doi.org/10.1007/s11367-013-0642-9>.
- Smith, Adam. 1776. « Livre V : Du revenu du souverain ou de la République ». In *Recherche sur la nature et les causes de la richesse des nations*.
- Solomon, Susan, Diane J. Ivy, Doug Kinnison, Michael J. Mills, Ryan R. Neely, et Anja Schmidt. 2016. « Emergence of Healing in the Antarctic Ozone Layer ». *Science* 353 (6296): 269-74. <https://doi.org/10.1126/science.aae0061>.
- Soratana, Kullapa, Daina Rasutis, Habib Azarabadi, Pragnya L. Eranki, et Amy E. Landis. 2017. « Guayule as an Alternative Source of Natural Rubber: A Comparative Life Cycle Assessment with Hevea and Synthetic Rubber ». *Journal of Cleaner Production* 159 (août): 271-80. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.05.070>.
- Spielmann, Michael, Christian Bauer, et Roberto Dones. 2007. « Transport services: EcoInvent report no. 14 ». 14. EcoInvent report. Dübendorf: Swiss Centre for Life Cycle Inventories.
- Stocker, T, et al. 2013. « Climate Change 2013 : The physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change ». IPCC. <http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>.
- Stripple, H. 2001. « Life cycle assessment of road. A Pilot Study for Inventory Analysis ». 2nd revised Edition. Report from the IVL Swedish Environmental Research Institute. <http://www.ivl.se/download/18.343dc99d14e8bb0f58b734e/1445515385608/B1210E.pdf>.
- Suh, Sangwon. 2009. « Developing the Sectoral Environmental Database for Input-Output Analysis: Comprehensive Environmental Data Archive of the U.S. » In *Handbook of Input-Output Economics in Industrial Ecology*, édité par Sangwon Suh, 23:689-712. Dordrecht: Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5737-3_32.
- Sun, Xin, Jingru Liu, Jinglan Hong, et Bin Lu. 2016. « Life Cycle Assessment of Chinese Radial Passenger Vehicle Tire ». *The International Journal of Life Cycle Assessment* 21 (12): 1749-58. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1139-0>.
- Sutter, Jürgen. 2007. « Life Cycle inventories of Petrochemical solvents - Data v2.0 (2007) ». EcoInvent Report n°22.
- Syrota, Jean, Étienne Beeker, Alan Bryden, Johanne Buba, Caroline Le Moign, et Felix Von Pechmann. 2011. « La voiture de demain: carburants et électricité ». *Conseil d'Analyse Stratégique, Paris, Rapports&Documents*, n° 40. https://www.strategie.gouv.fr/en/system/files/cas_rapp37_voiture_de_demain_web_0.pdf.
- Tang, Zhenzhong. 2007. « Polissage et adhérence des chaussées routières ». Ecole des Ponts ParisTech. <http://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00003623/>.
- Tardieu, Léa, Sébastien Roussel, et Jean-Michel Salles. 2013. « Assessing and Mapping Global Climate Regulation Service Loss Induced by Terrestrial Transport Infrastructure Construction ». *Ecosystem Services* 4 (juin): 73-81. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2013.02.007>.

Tatari, Omer, Munir Nazzal, et Murat Kucukvar. 2012. « Comparative Sustainability Assessment of Warm-Mix Asphalts: A Thermodynamic Based Hybrid Life Cycle Analysis ». *Resources, Conservation and Recycling* 58 (janvier): 18-24. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.07.005>.

Taub, Daniel R., Brian Miller, et Holly Allen. 2008. « Effects of Elevated CO₂ on the Protein Concentration of Food Crops: A Meta-Analysis ». *Global Change Biology* 14 (3): 565-75. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2007.01511.x>.

The International Institute of Synthetic Rubber Producers. 1998. « Eco-Profile of SBS ». The International Institute of Synthetic Rubber Producers.

Theakston, Frank, éd. 2011. *Burden of Disease from Environmental Noise: Quantification of Healthy Life Years Lost in Europe*. Copenhagen: World Health Organization, Regional Office for Europe.

Thenoux, Guillermo, Álvaro González, et Rafael Dowling. 2007. « Energy Consumption Comparison for Different Asphalt Pavements Rehabilitation Techniques Used in Chile ». *Resources, Conservation and Recycling* 49 (4): 325-39. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2006.02.005>.

Tourenq, et Fourmaintraux. 1971. « Propriétés des granulats et glissance routière ». 51. Bulletin de Liaison, Laboratoire des Ponts et Chaussées. LCPC. <http://www.geotech-fr.org/sites/default/files/revues/blpc/BLPC%2051%20pp%2061-69%20Tourenq.pdf>.

Trombulak, Stephen C., et Christopher A. Frissell. 2000. « Review of Ecological Effects of Roads on Terrestrial and Aquatic Communities ». *Conservation Biology* 14 (1): 18-30. <https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.2000.99084.x>.

Trupia, Laura, Tony Parry, Luis C. Neves, et Davide Lo Presti. 2017. « Rolling Resistance Contribution to a Road Pavement Life Cycle Carbon Footprint Analysis ». *The International Journal of Life Cycle Assessment* 22 (6): 972-85. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1203-9>.

Tseng, Ester. 2012. « Construction of Pavement Performance Models for Flexible Pavement Wheelpath Cracking and IRI for the California Department of Transportation New Pavement Management System ». Thèse de Master. California, USA: UC Davis. <https://search.proquest.com/openview/c0d1baa8afc851c4962b1399cc5d5b3b/1?pq-origsite=gscholar&cbl=18750&diss=y>.

UICN. 2014. *Indicateurs de biodiversité pour les collectivités territoriales: cadre de réflexion et d'analyse pour les territoires*. Paris: Comité français de l'UICN.

UNFCCC. 2016. « Rapport de la Conférence des Parties sur sa vingt et unième session, tenue à Paris du 30 novembre au 13 décembre 2015 ». <http://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/fre/10a01f.pdf>.

UNICEM, et UNPG. 2018. « L'industrie française des granulats - Edition 2017/2018 (données 2016) ». <http://www.unicem.fr/wp-content/uploads/depliant-unpg-chiffres-2016.pdf>.

UNPG. 2011a. « Module d'informations environnementales de la production de granulats issus de roches massives - données sous format FDES conforme à la norme NF 10-01010 ». Union Nationale des Producteurs de Granulats.

———. 2011b. « Module d'informations environnementales de la production de granulats issus de roches meubles - données sous format FDES conforme à la norme NF 10-01010 ». Union Nationale des Producteurs de Granulats.

———. 2011c. « Module d'informations environnementales de la production de granulats recyclés - données sous format FDES conforme à la norme NF 10-01010 ». Union Nationale des Producteurs de Granulats.

URF. 2016. « Faits & chiffres 2016 - Statistiques des transports en France et en Europe ». http://www.unionroutiere.fr/wp-content/uploads/2016/11/FAITS-CHIFFRES-2016_Basse-def.pdf.

US Department of Energy. 2013. « Fuel economy : where the energy goes ». US Department of Energy, septembre 2013. <http://www.fueleconomy.gov/FEG/atv.shtml>.

US DOE. 2011. « Critical materials strategy ». https://www.energy.gov/sites/prod/files/DOE_CMS2011_FINAL_Full.pdf.

US EPA. 2004. « AP-42: compilation of air pollutant emission factors ». Volume 1: Stationary point and area sources, Chapter 11: Mineral products industry, 11.1. United States Environmental Protection Agency. <http://www.epa.gov/ttn/chief/ap42/ch11/index.html>.

———. 2015. « TIRES ». WARM Version 13. <https://www3.epa.gov/warm/pdfs/Tires.pdf>.

USAMP/LCA. 1998. « Life Cycle Inventory of a generic U.S. family Sedan - overview of results USCAR AMP Project ». 339. Society of Automotive Engineers, Inc.

USIRF. 2012. « Enquête USIRF / ADF sur la Convention d'Engagement Volontaire », . Routes de France, , n° 85.

———. 2014. « Bilan environnemental 2013 ». USIRF. http://www.usirf.com/wp-content/uploads/BILAN_ENVIRONNEMENTAL_2013_v06052014.pdf.

———. 2015. « La dépense de gestion, d'entretien et d'investissement routier en France : Quelles réalités derrière les chiffres globaux et leurs évolutions pour les Travaux Publics ? - Etude sur neuf départements tests ». <http://www.usirf.com/wp-content/uploads/USIRF-Rapport-d%C3%A9tude-sur-la-d%C3%A9pense-de-gestion-d'entretien-et-d'investissement-routier-en-France-30.10.2015.pdf>.

———. 2016a. « Bilan environnemental 2015 ». <http://www.usirf.com/wp-content/uploads/BILAN-ENVIRONNEMENTAL-2015-valid%C3%A9.pdf>.

———. 2016b. « Déclaration environnementale produit - Production d'enrobé bitumineux à chaud représentatif du marché français ». USIRF. http://www.usirf.com/wp-content/uploads/FDES-USIRF_Chauss%C3%A9e-en-enrob%C3%A9-bitumineux.pdf.

———. 2016c. « Fiche de déclaration environnementale et sanitaire - Chaussée en enrobé bitumineux à chaud représentative du marché français ». USIRF. http://www.usirf.com/wp-content/uploads/FDES-USIRF_Chauss%C3%A9e-en-enrob%C3%A9-bitumineux.pdf.

———. 2016d. « Rapport de projet FDES - Analyse de cycle de vie de l'enrobé bitumineux à chaud représentatif français et d'une chaussée en enrobé bitumineux (Document confidentiel) ». Bio by Deloitte - USIRF.

———. 2017. « L'état de la route 2016 ». USIRF. http://www.usirf.com/wp-content/uploads/USIRF_EDLR2016_BD.pdf.

Vaillancourt, Michel, Daniel Perraton, Pierre Dorchies, et Guy Doré. 2003. « Décomposition Du Pseudo-Profil et Analyse de l'indice de Rugosité International (IRI) ». *Canadian Journal of Civil Engineering* 30 (5): 923-33. <https://doi.org/10.1139/I03-070>.

Van Mierlo, Joeri, Gaston Maggetto, E. Van de Burgwal, et R. Gense. 2004. « Driving style and traffic measures-influence on vehicle emissions and fuel consumption ». *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering* 218 (1): 43–50.

Védie, Henri-Louis. 2011. *Macroéconomie*. Paris: Dunod.

Veenhoven, Ruut. 1999. « Quality of life in individualistic society ». *Social Indicators Research* 48: pp.157-186.

———. 2000. « Wellbeing in the welfare state: Level not higher, distribution not more equitable ». *Journal of Comparative Policy Analysis* 2: 91-125.

———. 2009. « World database of happiness - Tool for dealing with the “data-deluge” ». *Psychological Topics (special issue on Positive Psychology)*, n° n°18: 221-46.

Ventura, Anne, Pierre Monéron, et Agnès Jullien. 2008. « Environmental Impact of a Binding Course Pavement Section, with Asphalt Recycled at Varying Rates: Use of Life Cycle Methodology ». *Road Materials and Pavement Design* 9 (sup1): 319-38. <https://doi.org/10.1080/14680629.2008.9690172>.

Vidal, Rosario, Enrique Moliner, Germán Martínez, et M. Carmen Rubio. 2013. « Life Cycle Assessment of Hot Mix Asphalt and Zeolite-Based Warm Mix Asphalt with Reclaimed Asphalt Pavement ». *Resources, Conservation and Recycling* 74 (mai): 101-14. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.02.018>.

Visse, Pierre-Edouard. 2013. « Évolution du budget automobile des ménages français depuis 1990 ». 14. DGCCRF éco. DGCCRF. http://www.economie.gouv.fr/files/directions_services/dgccrf/documentation/dgccrf_eco/dgccrf_eco14.pdf.

Volkswagen AG. 2008a. « The Golf – Environmental commendation – Background report ». Wolfsburg, Germany: Volkswagen AG.

———. 2008b. « The Passat– Environmental commendation – Background report ». Wolfsburg, Germany: Volkswagen AG. file:///C:/Users/anne.de-bortoli/Downloads/Volkswagen_Passat_livsl_psananlyse.pdf.

Wang, Ting, John Harvey, et Alissa Kendall. 2013. « Network-Level Life-Cycle Energy Consumption and Greenhouse Gas from CAPM Treatments ». Research Report UCPRC-RR-2014-05. University of California Pavement Research Center UC Davis, UC Berkeley.

———. 2014a. « Supplementary material for “Reducing greenhouse gas emissions through strategic management of highway pavement roughness” ». UC Davis.

———. 2014b. « Reducing greenhouse gas emissions through strategic management of highway pavement roughness ». *Environmental Research Letters* 9 (3): 034007. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/3/034007>.

Wang, Ting, In-Sung Lee, Alissa Kendall, John Harvey, Eul-Bum Lee, et Changmo Kim. 2012. « Life Cycle Energy Consumption and GHG Emission from Pavement Rehabilitation with Different Rolling Resistance ». *Journal of Cleaner Production* 33: 86-96. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.05.001>.

Wang, Ting, I-S Lee, John Harvey, Alissa Kendall, E.B Lee, et C. Kim. 2012. « UCPRC Life Cycle Assessment Methodology and Initial Case Studies on Energy Consumption and GHG Emissions for Pavement Preservation Treatments with Different Rolling Resistance ». UCPRC-RR-2012-02. California, USA:

University of California Pavement Research Center UC Davis, UC Berkeley.
<http://www.ucprc.ucdavis.edu/PDF/UCPRC-RR-2012-02.pdf>.

Wang, X C, et L Sanders. 2012. « Energy Consumption and Carbon Footprint of High-Speed Rail Projects: Using CAHSR and FHSR as Examples ». *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit* 226 (1): 26-35. <https://doi.org/10.1177/0954409711404641>.

Wang, Yuhong. 2016. « The Effects of Using Reclaimed Asphalt Pavements (RAP) on the Long-Term Performance of Asphalt Concrete Overlays ». *Construction and Building Materials* 120 (septembre): 335-48. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.115>.

Watanatada, Harral, Paterson, Dhareshwar, Bhandari, et Tsunokawa. 1987. *The HDM standards model – Description of the HDM-III Model*. Vol. 1. The highway design and maintenance standards series 9951. The Johns Hopkins University Press. http://www.worldbank.org/transport/roads/rd_tools/hdm-iii%20_vol-1.pdf.

Weiland, Craig, et Stephen Muench. 2010. « Life-Cycle Assessment of Reconstruction Options for Interstate Highway Pavement in Seattle, Washington ». *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2170 (décembre): 18-27. <https://doi.org/10.3141/2170-03>.

Weisser, Daniel. 2007. « A Guide to Life-Cycle Greenhouse Gas (GHG) Emissions from Electric Supply Technologies ». *Energy* 32 (9): 1543-59. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2007.01.008>.

White, A. 2007. « A Global Projection of Subjective Well-being: A Challenge to Positive Psychology? » *Psychtalk*, n° n° 56,: 17-20.

Wilde, W. J, S Waalkes, et R Harrison. 2001. « Life cycle cost analysis of portland cement concrete pavement ». Austin, Texas: Univ. of Texas at Austin.

Willway, Teresa, S Reeves, et Layla Baldachin. 2008. *Maintaining Pavements in a Changing Climate*. London: TSO. <http://www.ukroadsliasongroup.org/download.cfm/docid/77CBE77B-93A4-4D1D-B9782B47987990C1>.

Wilson, Scott, et Paul Keddy. 1988. « Species Richness, Survivorship, and Biomass Accumulation along an Environmental Gradient ». *Oikos* Vol. 53 (No. 3 (Nov., 1988)): 375-80.

Wubneh, M. 2008. « US Highway 17 and its impact on the economy of eastern North Carolina ». Urban & Regional Planning Program Department of Geography East Carolina University.

Yang, Rebekah. 2014. « Development of a pavement life cycle assessment tool utilizing regional data and introducing an asphalt binder model ». Urbana, Illinois: University of Illinois at Urbana-Champaign. https://www.ideals.illinois.edu/bitstream/handle/2142/50651/Rebekah_Yang.pdf?sequence=1.

Yang, Rebekah, Seunggu Kang, Hasan Ozer, et Imad L. Al-Qadi. 2015. « Environmental and Economic Analyses of Recycled Asphalt Concrete Mixtures Based on Material Production and Potential Performance ». *Resources, Conservation and Recycling* 104 (novembre): 141-51. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.08.014>.

Young, Cristobal, et Chaeyoon Lim. 2014. « Time as a Network Good: Evidence from Unemployment and the Standard Workweek ». *Sociological Science*, 10-27. <https://doi.org/10.15195/v1.a2>.

Yu, Bin, et Qing Lu. 2012. « Life Cycle Assessment of Pavement: Methodology and Case Study ». *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 17 (5): 380-88. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2012.03.004>.

———. 2014. « Empirical Model of Roughness Effect on Vehicle Speed ». *International Journal of Pavement Engineering* 15 (4): 345-51. <https://doi.org/10.1080/10298436.2013.792931>.

Zaabar, Imen, et Karim Chatti. 2010. « Calibration of HDM-4 Models for Estimating the Effect of Pavement Roughness on Fuel Consumption for U. S. Conditions ». *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2155 (1): 105-16. <https://doi.org/10.3141/2155-12>.

———. 2012. « Impact of road roughness features on damage to transported goods ». In . Stockholm, Sweden. <https://trid.trb.org/view.aspx?id=1366970>.

Zaniewski, J.P, B.C Butler, G Cunningham, G.E Elkins, M.S Paggi, et R Machemehl. 1982. « Vehicle Operating Costs, Fuel Consumption, and Pavement Type and Condition Factors ». FHWA-PL-82-001. Texas Research and Development Foundation. <https://ntl.bts.gov/lib/42000/42200/42239/FHWA-PL-82-001.pdf>.

Zeng, Hongbo, éd. 2013. *Polymer adhesion, friction, and lubrication*. Hoboken, New Jersey: Wiley. <http://books.google.fr/books?id=kakXzMJfy9kC&pg=PA1&lpg=PA1&dq=zeng+Polymer+Adhesion,+Friction,+and+Lubrication&source=bl&ots=INZGTgB-uY&sig=LgyiiQheoHK-9Bi4sPFAbhDsfZk&hl=fr&sa=X&ei=BwuWUrCQB8LQ7Aa13ICYDw&ved=0CI0BEOgBMAk#v=onepage&q=zeng%20Polymer%20Adhesion%2C%20Friction%2C%20and%20Lubrication&f=false>.

Zhang, Han, Gregory A. Keoleian, Michael D. Lepech, et Alissa Kendall. 2010. « Life-Cycle Optimization of Pavement Overlay Systems ». *Journal of Infrastructure Systems* 16 (4): 310-22. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IS.1943-555X.0000042](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000042).