



HAL
open science

Évaluation de l'impact sur les populations de la pollution atmosphérique et du bruit liés aux trafics et aux modifications des infrastructures de transport - Éléments

Michel Andre, Joël Lelong, Anne-Sophie Evrard

► **To cite this version:**

Michel Andre, Joël Lelong, Anne-Sophie Evrard. Évaluation de l'impact sur les populations de la pollution atmosphérique et du bruit liés aux trafics et aux modifications des infrastructures de transport - Éléments. [Rapport de recherche] IFSTTAR - Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux. 2015, 66 p. hal-01233503

HAL Id: hal-01233503

<https://hal.science/hal-01233503v1>

Submitted on 25 Nov 2015

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.



IFSTTAR

INSTITUT FRANÇAIS
DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES DES TRANSPORTS,
DE L'AMÉNAGEMENT ET DES RÉSEAUX

Évaluation de l'impact sur les populations de la pollution atmosphérique et du bruit liés aux trafics et aux modifications des infrastructures de transport - Éléments

Livrable COP - Axe 4 D3

Par :

Michel ANDRÉ, Joël LELONG, Anne-Sophie EVRARD

*Rapport Ifsttar, COP Axe4D3
Janvier 2015*



IFSTTAR

INSTITUT FRANÇAIS
DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES DES TRANSPORTS,
DE L'AMÉNAGEMENT ET DES RÉSEAUX

Auteurs :

Michel ANDRÉ

*Directeur de recherche
IFSTTAR
Département Aménagement - Mobilité - Environnement
Laboratoire Transports et Environnement*

Joël LELONG

*Chargé de recherche
IFSTTAR
Département Aménagement - Mobilité - Environnement
Laboratoire d'Acoustique Environnementale*

Anne-Sophie EVRARD

*Chargée de recherche
IFSTTAR
Département Transport, santé et sécurité
Unité mixte de recherche Épidémiologique
et de Surveillance Transport Travail Environnement*

Ce rapport s'appuie sur plusieurs projets de recherche auxquels l'Ifsttar a participé. Il utilise en conséquence les rapports et publications de ces travaux et en reprend certains résultats et conclusions en citant les références et sous la forme d'une revue bibliographique. On se reportera à ces rapports pour une connaissance approfondie des travaux qui ont été menés.

Fiche bibliographique

1 UR (1 ^{er} auteur) LTE, Laboratoire Transports et Environnement		2 Projet n°		3 Rapport INRETS n° Rapport Ifsttar, COP Axe4D3	
4 Titre Évaluation de l'impact sur les populations de la pollution atmosphérique et du bruit liés aux trafics et aux modifications des infrastructures de transport - Éléments					
5 Sous-titre				6 Langue F	
7 Auteur(s) Michel ANDRÉ, Joël LELONG, Anne-Sophie EVRARD				8 Rattachement ext.	
9 Nom adresse financeur, co-éditeur ANR				10 N° contrats, conv.	
				11 Date de publication Janvier 2015	
12 Remarques					
13 Résumé <p>Les transports contribuent à différentes atteintes à l'environnement (changements climatiques, air, eau et sols, bruit), et les fréquents dépassements des seuils réglementaires (pollution ou bruit), - imputables aux trafics routiers et observés dans les grandes agglomérations, contribuent à des impacts multiples sur la santé. Des actions - réglementaires, plan de protection, politiques de transports, aménagement - sont mises en œuvre et leur évaluation reste très difficile et controversée en raison de la complexité des contextes, et du manque d'approches scientifiquement robustes.</p> <p>L'IFSTTAR s'est impliqué dans des travaux conséquents sur la problématique de l'évaluation environnementale : recherche ANR Eval-PDU sur les plans de déplacements urbains, groupes de travail de l'ANSES sur les projets d'infrastructure routière et la pollution de l'air et sur les impacts sanitaires extra-auditifs du bruit environnemental, travaux sur l'évaluation des zones de restriction de la circulation pour la pollution atmosphérique. Trois thèses sur le couplage des outils, les méthodes d'évaluation environnementale et l'analyse du cycle de vie (ACV) des mobilités (coll. EDF), ainsi qu'une école d'été sur la modélisation urbaine (ENPC Paris-Tech) et les impacts environnementaux complètent cet ensemble de travaux. Cette implication se poursuit par le projet ANR Trafipollu (expérimentation pour consolider les modèles, du trafic aux impacts sur l'air, l'eau, les sols) et par le développement d'une méthodologie d'évaluation systémique de l'aménagement d'un quartier (Efficacity), considérant les mobilités, leurs impacts sociaux, économiques et environnementaux, et envisageant l'ACV et les approches complémentaires de cette évaluation.</p> <p>Les résultats scientifiques de ces travaux constituent la contribution essentielle de ce livrable de l'IFSTTAR. Les travaux réalisés composent par ailleurs un ensemble conséquent et très riche pour aborder de manière transversale une réflexion de fond sur la problématique de l'évaluation environnementale. Ce document propose une synthèse des travaux et tente d'en dégager les principaux enseignements pour une méthodologie environnementale. Les lacunes et limites des approches sont discutées afin d'orienter des travaux de recherche sur ces aspects.</p>					
14 Mots clés : <i>méthodologie ; évaluation environnementale ; modélisation ; pollution de l'air ; bruit ; trafic ; infrastructures routières ; aménagement ; plans de déplacements urbains</i>			15 Diffusion libre		
16 Nombre de pages 66 pages		17 Prix ----- €		18 Confidentiel jusqu'au	
				19 Bibliographie oui	

Publication data form

1 UR (1st author) Transport and Environment Laboratory		2 Project n°		3 INRETS report n° Rapport Ifsttar, COP Axe4D3	
4 Title Assessment of air pollution and noise due to traffic and road projects, and their impact on population - Elements					
5 Subtitle				6 Language F	
7 Author(s) Michel ANDRÉ, Joël LELONG, Anne-Sophie EVRARD				8 Affiliation	
9 Sponsor, co-editor, name and address				10 Contract, conv. n°	
				11 Publication date <i>Janvier 2015</i>	
12 Notes					
13 Summary <p>Transport systems cause damages to the environment (climate changes, air, water and soils pollution, noise) and pollutants concentrations and noise levels are frequently exceeded in cities, due to the road traffic and inducing various health impacts. Instruments - regulation, protection plans, transport policies, urban planning, - are implemented but their assessment is difficult or controversial due to the complexity of the phenomenon and contexts, and because the lack of scientifically based approaches.</p> <p>Last years, IFSTTAR was involved in several works regarding the environmental assessment: ANR Eval-PDU research on the Urban Mobility Plans, experts groups (ANSES) on the impacts from road projects on air pollution and on the health effects of environmental noise, experimental works conducted to develop methodologies for assessing Low Emission Zones. PhD theses were defended on the coupling of traffic and air pollution models, the environmental assessment methodologies, and the Life Cycle Analysis (LCA) applied to urban mobility. A Summer School was finally organized (ENPC Paris-Tech) dedicated to Urban modelling and environmental impacts.</p> <p>These works are going on with the ANR Trafipollu research to consolidate models, from traffic to air, water and soils impacts, and with the development of a systemic assessment method for urban neighbourhood development (Efficacity 3.1), considering mobility, social, economic and environmental impacts, through LCA and complementary approaches.</p> <p>The scientific results of these works are the main contribution to this deliverable, which furthermore constitute an important basis to address the problematic of the overall environmental assessment. This document proposes a synthesis of these works and attempts to draw essential lessons for an environmental methodology. Lacks and limits of the approaches are also discussed to orientate research works.</p>					
Key-words: <i>environment, air pollution, noise, assessment, method, modeling, urban mobility plan, urban planning, road infrastructure</i>				15 Distribution statement free	
16 Nb of pages 66 pages		17 Price — — — — €		18 Declassification date	
				19 Bibliography yes	

Table des matières

Introduction	9
1. Synthèse des travaux menés par l'Ifsttar	11
1.1. Le projet ANR Eval-PDU, méthodologie d'évaluation des plans de déplacements urbains	13
1.1.1. Résumé du projet	13
1.1.2. Analyse critique et méthodologie d'évaluation des mesures de gestion des déplacements et du trafic	15
1.2. Travaux d'expertise autour de l'évaluation des impacts du trafic sur le bruit et la pollution de l'air	17
1.2.1. Expertise collective sur l'évaluation des impacts sanitaires extra-auditifs du bruit environnemental	17
1.2.2. Expertise collective sur la sélection des polluants à prendre en compte dans les évaluations des risques sanitaires réalisées dans le cadre des études d'impact des infrastructures routières	19
1.3. Contribution à l'évaluation des zones de restriction de circulation (pollution de l'air), projets Primequal ZaParC et Prequalif	22
1.3.1. Apports du projet Prequalif	22
1.3.2. Parcs automobiles en circulation et efficacité de zones de restriction d'accès aux véhicules polluants (projet Za-ParC)	23
1.4. Modélisation et couplage d'outils, projets Ville Numérique et Trafipollu	26
1.4.1. Le projet Ville Numérique	26
1.4.2. Modélisation de la pollution atmosphérique liée à la circulation automobile en zone urbaine : problématique du couplage d'outils	26
1.4.3. Évaluation dynamique des nuisances sonores liées au trafic en milieu urbain	28
1.4.4. Modélisation multi-échelles de la pollution due au trafic dans un environnement urbain, projet ANR Trafipollu	28
1.5. L'analyse du cycle de vie comme approche de l'évaluation	30
1.5.1. ACV et mobilité urbaine	30
1.5.2. Efficacité 3.1 : ACV urbaine	31
1.6. Conclusions	32
2. Bruit et pollution de l'air dus au trafic : phénomènes et outils	33
2.1. Pollution atmosphérique liée au trafic - état de l'art des phénomènes et outils	33
2.1.1. Les émissions de polluants atmosphériques du trafic routier	33
2.1.2. De l'émission de polluants (par le trafic) aux impacts sanitaires	34
2.1.3. Méthodes, outils d'évaluation de la pollution de l'air	35
2.2. Bruit environnemental, phénomènes et outils d'évaluation	39
2.2.1. Les multiples dimensions du bruit	39
2.2.2. Bruit lié aux transports	39
2.2.3. Des sources de bruit aux effets extra-auditifs et sanitaires	40
2.2.4. Outils / méthodes d'évaluation	41
3. Méthodologies d'évaluation, éléments	43
3.1. Modélisation des impacts des déplacements et trafics	43
3.1.1. Approche par scénarios	44
3.1.2. Déplacements et trafic	46
3.1.3. Autres aspects : états initiaux, échelles, données	49
3.2. Evaluation de la pollution de l'air due au trafic	49
3.2.1. Problématique	49
3.2.2. Polluants, voies d'exposition	50
3.2.3. Émissions de polluants	51
3.2.4. Impact sur la qualité de l'air	52
3.2.5. Impacts sur la santé	53
3.2.6. Conclusions	54
3.3. Evaluation des nuisances sonores	55
3.3.1. Cartographies sonores à échelle d'agglomération	55
3.3.2. Modélisation dynamique du bruit urbain	56
3.3.3. Méthodologie d'évaluation des impacts sanitaires extra-auditifs du bruit environnemental	57

Évaluation de l'impact sur les populations de la pollution atmosphérique et du bruit liés aux trafics et aux modifications des infrastructures de transport - Éléments

3.4. Méthodologies d'évaluation environnementale	59
3.4.1. Evaluation intégrée multicritère	59
3.4.2. Vers une modélisation et évaluation « systémique » des mobilités et de l'aménagement	61
4. Conclusions, perspectives	63
Références	65

Introduction

Les transports et les trafics contribuent de manière significative à différentes atteintes à l'environnement (réchauffement climatique, pollutions de l'air, de l'eau et des sols, bruit, etc.). Dans les grandes agglomérations, on observe de fréquents dépassements des seuils réglementaires (ou recommandés) de pollution atmosphérique (concentrations de particules et de NO₂, pollution par l'ozone en extension géographique) et des valeurs limites d'exposition au bruit, et ces dépassements qui contribuent à des impacts multiples sur la santé (maladies respiratoires, cardio-vasculaires, cancers, stress) sont majoritairement imputables aux trafics routiers.

Face à ces problématiques, les États renforcent les réglementations (niveaux d'émissions des véhicules, qualité de l'air, valeurs limites d'exposition, nécessité d'études d'impacts), et avec les collectivités mettent en œuvre des mesures multiples et variées visant à maîtriser les impacts des transports : développement et incitation à l'émergence de technologies moins polluantes, restriction et organisation du trafic, gestion de l'offre de transports et en particulier accroissement de l'offre de transports collectifs, gestion de la demande de transports par la planification, l'urbanisme, etc. Les Plans de Déplacements Urbains (PDU) des grandes agglomérations ainsi que les différents plans de prévention du bruit dans l'environnement (PPBE), de protection de l'atmosphère (PPA), etc., s'inscrivent dans cette démarche et se déclinent en différentes actions d'observation, d'évaluation et par la mise en œuvre de mesures de limitation ou réduction des nuisances - notamment celles liées au trafic -, et de résorption des zones à forte exposition.

Que ce soit pour l'évolution réglementaire ou pour la mise en œuvre des différents plans et mesures de l'action publique en faveur de l'environnement, l'évaluation est indispensable. Cette évaluation - a priori ou a posteriori - est en effet nécessaire pour connaître l'état de l'environnement (diagnostic), l'évolution des nuisances (approche prospective) et les effets (observés ou attendus) liés à la mise en œuvre de mesures en faveur de l'environnement. Elle doit notamment permettre d'anticiper a priori les effets probables de différentes actions lors de leur élaboration, d'optimiser les moyens à mettre en œuvre selon les impacts attendus, et de disposer d'éléments fiables quant au potentiel de ces actions (retour d'expérience a posteriori).

Cependant, la complexité des phénomènes liant bruit ou pollution atmosphérique et impacts sanitaires (émission et sa nature, propagation, exposition, réactions aux niveaux d'exposition, multi exposition, etc.) et la faiblesse des connaissances associées sont telles que le diagnostic même de ces nuisances est difficile et souvent incertain, particulièrement en milieu urbanisé.

De même la multiplicité des actions de limitation de nuisances liées au trafic, leur nature différente (technologies, gestion du trafic, politiques de transports, aménagements), leurs implications et interactions complexes voire antagonistes dans un contexte en évolution (démographie, développement des zones urbaines, etc.), et leurs effets souvent faibles, dilués (présence d'autres sources, interactions de phénomènes) et en tous cas difficile à mesurer, rendent l'évaluation de ces mesures très hasardeuse.

On notera finalement que - face à cette complexité des phénomènes, aux lacunes éventuelles de connaissances sur certains maillons des chaînes de causalité entre sources de nuisance et impacts, à la multitude des « objets » et contextes à évaluer -, les approches et méthodologies d'évaluation sont elles-mêmes multiples et complexes, et leur mise en œuvre, dans des contextes souvent peu transparents, peut se révéler assez peu rationnelle ou manquant de fondements scientifiques.

Des travaux conséquents auxquels a participé l'IFSTTAR ont été menés ces dernières années sur cette problématique de l'évaluation des impacts du trafic et des transports sur la pollution de l'air, le bruit, ou plus généralement l'environnement. Des travaux de recherche et d'expertise ont ainsi concerné les méthodologies d'évaluation des projets d'infrastructure routière et de plans de déplacements urbains (bruit et pollution), de zones à circulation restreinte pour améliorer la qualité de l'air, et se poursuivent actuellement sur les méthodes d'évaluation multicritères de projets d'aménagement urbain.

Ces travaux ont contribué à dresser des états de l'art sectoriels ou partiels mais relativement exhaustifs des phénomènes, méthodologies, outils, retours d'expérience et difficultés liées à l'évaluation.

Ce rapport présente une synthèse s'appuyant sur ces différents travaux, tente d'explicitier les bases d'une méthodologie d'évaluation, et propose des recommandations de travaux d'approfondissements.

1. Synthèse des travaux menés par l'Ifsttar

Au cours des dernières années, l'IFSTTAR a été impliqué dans des travaux conséquents sur la problématique de l'évaluation des impacts environnementaux (bruit et pollution), notamment dans le cadre des travaux suivants :

- projet de recherche ANR Eval-PDU sur l'évaluation environnementale (et socio-économique) des plans de déplacements urbains (cas d'application Nantes, Mestayer et al. 2012, 2014),
- groupes de travail de l'ANSES sur les polluants atmosphériques à prendre en compte dans l'évaluation des projets d'infrastructure routière (Seigneur et al. 2012) et sur l'évaluation des impacts sanitaires extra-auditifs du bruit environnemental (Muzet et al. 2012),
- travaux sur l'évaluation des zones de restriction de la circulation pour la pollution atmosphérique, avec notamment des travaux sur la composition des parcs automobiles et leur incidence sur l'efficacité de telles zones dans le cadre du projet Primequal Za-ParC (Carteret et al. 2015), et d'autre part un programme de recherche sur la qualité de l'air en Île de France Primequal Prequalif (Sciare et al. 2014), avec le déploiement d'un réseau de mesure et d'expérimentation in situ, et l'amélioration et mise en œuvre de modèles de qualité de l'air et de méthodes d'évaluation des impacts sanitaires .

Trois thèses ont été menées en lien et soutenues sur :

- le couplage des outils de modélisation (Fallah, 2014), dans le cadre du projet VILLE NUMÉRIQUE (Soula, 2013),
- les méthodes d'évaluation environnementale (Brutti-Mairesse, 2013), qui s'est appuyée sur le cadre applicatif offert par le projet ANR Eval-PDU,
- et sur l'évaluation environnementale par l'analyse du cycle de vie des mobilités urbaines (collab. EDF, Le Féon, 2014).

Au titre de la valorisation et de cadre de réflexion élargie, nous pouvons encore citer le montage d'une école d'été sur la modélisation urbaine avec l'école des Ponts Paris-Tech et impliquant différents intervenants sur les impacts environnementaux et les approches d'évaluation par la modélisation.

Ces travaux se poursuivent dans le cadre du projet ANR Trafipollu (sur la modélisation des phénomènes physiques à différentes échelles et leur validation par une expérimentation d'envergure) et de l'Institut pour la Transition Énergétique Efficacy sur l'ACV systémique d'un aménagement urbain - considérant ses multiples fonctionnalités dont les transports - et

les méthodes complémentaires en vue de décrire certains impacts environnementaux locaux dont la pollution de l'air).

L'ensemble de ces travaux constitue un corpus considérable, posant et quelquefois répondant à de nombreuses questions autour de l'évaluation de la pollution de l'air et des nuisances sonores liées au trafic, et de l'évaluation des mesures de réduction de ces nuisances. Dans ce chapitre, nous récapitulons ces travaux, en se restreignant cependant principalement aux problématiques air et bruit. Pour plus de détails, on se reportera aux rapports ou écrits spécifiques associés.

Les principaux enseignements méthodologiques et retours d'expérience seront repris au Chapitre 3.

1.1. Le projet ANR Eval-PDU, méthodologie d'évaluation des plans de déplacements urbains

1.1.1. Résumé du projet

Le programme ANR-Eval-PDU découle d'une proposition par Nantes Métropole d'une recherche méthodologique sur l'évaluation des impacts environnementaux du PDU nantais. Une équipe pluridisciplinaire regroupant des compétences de l'IRSTV (Institut de Recherche sur les Sciences et Techniques de la Ville) élargies de quelques laboratoires de l'IFSTTAR a proposé et mené une étude pluridisciplinaire et méthodologique centrée sur la modélisation de la qualité de l'air et du bruit et leurs conséquences socio-économiques (Mestayer et al. 2012).

Les étapes de modélisation considèrent les déplacements et les flux de trafic (modèle multi-modal Visem – Visum), les consommations et émissions de polluants des véhicules (Circul'Air/CopCETE – méthodologie européenne Copert IV), les concentrations de polluants atmosphériques (ADMS Urban), l'émission de bruit du trafic et les indices de nuisance sonore (NMPB 2008 intégrés dans OrbisGIS) et les impacts sanitaires des émissions de polluants (développement d'un indicateur d'impact sanitaire à partir des émissions de polluants IISCEP). Le dispositif est doté d'une infrastructure de données spatiales (Cartopolis) s'appuyant sur un SIG commun (OrbisGIS). Il est alimenté en données réelles pour les années de référence et en données virtuelles pour différents scénarios alternatifs du PDU, réalisés ou envisageables.

Simulation réalisées dans le cadre Eval-PDU : impacts de la mise en service d'une ligne forte de transports en commun (Busway) (diminutions en vert, augmentations en rouge)

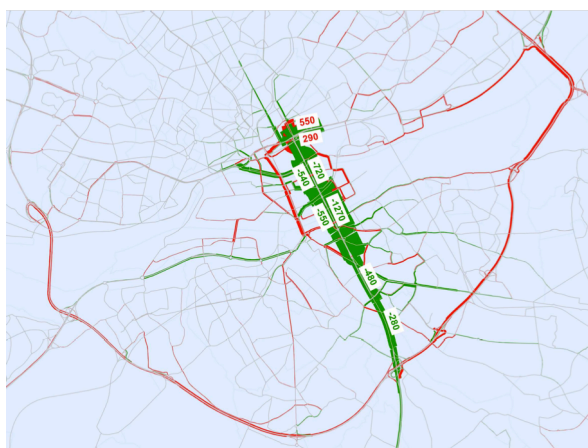


Figure 1. Variation des trafics d'heure pleine du matin

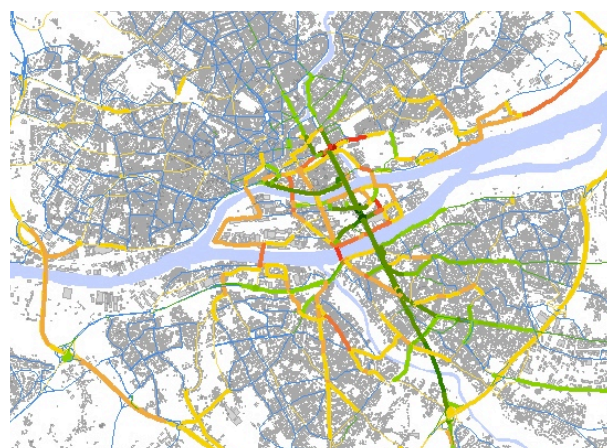


Figure 2. Évolution de l'émission de NOx (réf. 2008)

Au-delà de cette approche très physique et centrée sur trafic, air et bruit, les conséquences sur le bien-être des populations ont été estimées au travers d'un modèle de prix hédoniques des transactions immobilières, et par une enquête de satisfaction déclarée des habitants. Des travaux complémentaires ont porté également sur (1) l'impact de l'environnementalisation

dans les domaines sociologique, politique et juridique, (2) l'adaptation des comportements individuels sur la base d'une enquête d'usagers du Busway (ligne forte de bus et action phare du PDU nantais), (3) des méthodes simplifiées de calcul des conséquences des actions du PDU sur le trafic automobile, (4) un retour d'expérience prospectif.

L'ensemble des modèles a été testé sur le PDU nantais, pour 2 années de référence et 10 scénarios portant soit sur des analyses de sensibilité, soit sur des PDU alternatifs ou des actions majeures localisées. Les impacts environnementaux sont généralement faibles en termes de populations impactées, mais ils restent quantifiables par cette méthode, souvent assez localisés. Certains scénarios forts donnent lieu à des reports d'itinéraires qui en diluent les effets bénéfiques et/ou en déportent les impacts.

Le retour d'expérience ouvre des pistes intéressantes de valorisation des méthodes développées, notamment pour l'évaluation environnementale *in itinere* des PDU.

L'IFSTTAR a été associé au pilotage de ce programme de recherche, et le Laboratoire d'Acoustique Environnementale a assumé les travaux de modélisation des sources sonores en milieu urbain¹. Le Laboratoire Transports et Environnement a été en charge d'un questionnement des calculs d'émissions de polluants du trafic² (identification des enjeux, tests de sensibilités, articulation avec les simulations du trafic) en appui d'Air-Pays-de-Loire qui réalisait les simulations d'émissions et concentrations, et du questionnement de la prise en compte du trafic dans ces évaluations³. Le LTE a par ailleurs apporté une contribution de fond sur les indicateurs environnementaux⁴ et - avec l'UMRESTTE (Unité Mixte de recherche épidémiologique et de surveillance travail, transports, environnement) a développé et mis en œuvre un indicateur d'impact sanitaire reposant sur les émissions de polluants du trafic et quelques grandeurs caractéristiques de l'urbanisme et de l'exposition des populations⁵.

L'IFSTTAR a enfin été associé à la réflexion méthodologique de fond autour de l'évaluation des PDU, de la prise en compte des mobilités et trafics, et de la dimension pluridisciplinaire de cette démarche, et de la valorisation des travaux (contribution à

¹ Rapport final Tâche T4 - Développement d'une méthode simplifiée sous SIG pour la production de cartes de bruit de grandes agglomérations - J. Picaut, N. Fortin, E. Bocher, G. Dutilleux - 25 p.

² Livrable L3.4b Évaluation des PDU - problématique du calcul des émissions de polluants du trafic - M. André, M. Fallah, C. Berger, A. Montanon, E. Brutti-Mairesse - 105 p.

³ Livrable L1.3 Évaluation des PDU - problématique d'évaluation du trafic en vue du calcul des émissions de polluants - E. Brutti-Mairesse, S. Teillac, C. Berger, M. André - 163 p.

⁴ Livrable L7.1 Indicators of environmental sustainability in transport: an interdisciplinary approach to methods - Joumard & Gudmundsson (edits.) - 422 p.

⁵ Livrable L7.3 Mise au point d'un indicateur d'impact sanitaire chronique des émissions de polluants - V. Lépicié, M. Chiron, R. Joumard - 224 p.

l'organisation d'un séminaire final, et à la publication d'une synthèse dans la revue *Pollution atmosphérique* et dans la revue *Recherche Transports Sécurité*).

1.1.2. Analyse critique et méthodologie d'évaluation des mesures de gestion des déplacements et du trafic

Dans un contexte d'augmentation des enjeux environnementaux liés aux transports, une large palette de mesures de gestion des déplacements et du trafic (plan de déplacement urbains, transports en commun, modes doux, Low emission zones, péages urbains, voiture partagée, renouvellement des parcs,...) est mise en œuvre ou envisagée comme moyen de réduction des impacts. Les effets réels de ces mesures sur les émissions de polluants et la pollution de l'air, à court ou long terme sont cependant difficilement évaluables, par manque de méthodes rationnelles et bien établies.

Cette thèse (Brutti-Mairesse, 2013) a permis de mener une réflexion scientifique sur l'évaluation environnementale de différentes mesures - focalisée cependant sur la modélisation des déplacements et du trafic et de l'émission de polluants -, à travers une importante analyse bibliographique de ces mesures et de leur évaluation notamment dans le cadre des PDU, l'analyse détaillée des outils (trafic, émissions) et l'esquisse d'un cadre d'évaluation basé sur l'analyse des mécanismes d'action des différentes mesures (action sur les déplacements et le trafic, action sur l'émission).

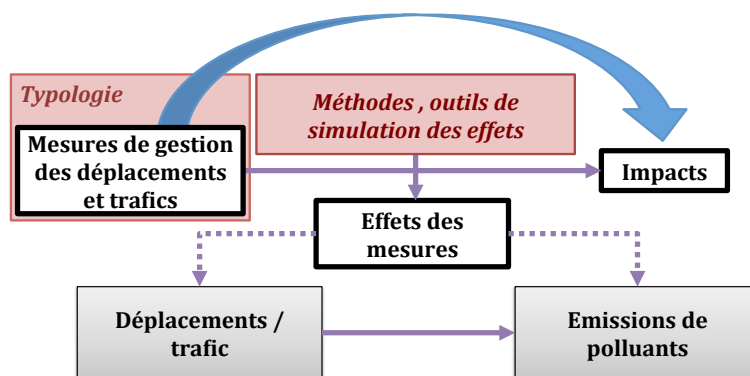


Figure 3. Cadre d'analyse de l'évaluation des mesures de gestion / organisation des déplacements et trafics (au sein d'un PDU par exemple) : typologie des mesures, analyse de leurs effets sur les déplacements et sur les émissions de polluants et représentation de ces effets dans les outils

Les travaux proposent tout d'abord la mise à plat de nombreuses mesures et la caractérisation de leur mise en œuvre (échelles spatiales et temporelles), de leurs mécanismes (leviers d'action et cibles, moyens de transport concernés), et de leurs effets au travers des retours d'expérience. Une classification des mesures suivant ces paramètres permet de faire émerger différentes problématiques comme l'évaluation des différents effets d'une mesure, ou la représentation des différentes échelles temporelles et spatiales, et laisse envisager des méthodes appropriées pour différentes classes de mesures.

L'analyse des méthodes et outils en montre les limites et difficultés : multiplicité des mesures, des phénomènes (trafic, émissions, etc.) et de leurs interactions, difficulté d'identification de l'impact propre d'une mesure dans un contexte en évolution, difficulté liée à l'échelle de l'évaluation (impacts faibles au niveau de l'agglomération de mesures à portée locale). Aucune méthode n'est totalement pertinente pour l'ensemble des mesures et de leurs effets. La modélisation peut constituer un cadre approprié à la représentation du trafic et des émissions selon les échelles. Ainsi les approches classiques utilisant des modèles statiques de déplacements et des modèles d'émissions de polluants sont adaptées aux larges échelles et permettent de prendre en compte les localisations d'activités (habitats, emplois, etc.) et leur évolution. Elles sont en conséquence appropriées pour évaluer des mesures et effets au niveau de l'agglomération, mais insuffisantes pour rendre compte de phénomènes locaux.

On propose ensuite de « représenter » les effets des différentes mesures sur les déplacements et trafic d'une part, et les émissions d'autre part. Sont ainsi considérés les mécanismes d'action sur la demande de déplacement, la répartition modale, le trafic et les vitesses, la répartition spatiale des déplacements et trafics, les émissions spécifiques de véhicules, etc., et les limites de représentation de ces effets dans les modèles (lacunes de connaissance ou de prise en compte du trafic de transit, de la congestion, de technologies récentes, des modes doux, etc.).

Cette approche permet *in fine* d'esquisser un cadre d'évaluation reposant sur une représentation générique de différents mécanismes d'action des mesures et selon leur localisation. Ainsi un grand nombre de mesures peut être caractérisé par des effets élémentaires en terme de demande en déplacements, de capacité de la voirie, et de composition du parc automobile. Leurs effets peuvent donc être étudiés sous différents scénarios et en terme de réponse à des variations de demandes, capacité, localisation, etc.

1.2. Travaux d'expertise autour de l'évaluation des impacts du trafic sur le bruit et la pollution de l'air

L'IFSTTAR a contribué à deux groupes d'experts de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (ANSES) autour de questions liées aux impacts sanitaires liés au bruit environnemental d'une part, à la pollution de l'air d'autre part, focalisées notamment sur les questions de trafic et de projets d'infrastructures de transports. Dans les deux cas les travaux ont débouché sur des considérations méthodologiques liées à l'évaluation, contribuant ainsi à la réflexion menée ici. Nous rappelons ici les grandes lignes de ces travaux. Les retours méthodologiques seront discutés dans les chapitres suivants.

1.2.1. Expertise collective sur l'évaluation des impacts sanitaires extra-auditifs du bruit environnemental

L'objectif initial était d'élaborer des indicateurs opérationnels permettant de prendre en compte les effets sanitaires du bruit dans le cadre des études d'impacts sanitaires des projets d'infrastructures de transports et industriels (Muzet et al. 2012). Les travaux étaient envisagés en trois étapes :

- . revue des connaissances disponibles en matière d'indicateurs des effets sanitaires des bruits des transports ;
- . la proposition d'indicateurs et valeurs de référence, adaptés au bruit des transports terrestres, activités et bruits événementiels, et déterminant les niveaux en deçà desquels des effets sanitaires mesurables sont écartés,
- . la proposition de valeurs de gestion pour ces indicateurs, notamment pour le volet « bruit » des études d'impact sanitaire des projets routiers, et tenant compte d'éléments de contexte comme le fond de pollution sonore, les niveaux de bruit habituels, les gains en termes de santé du passage en deçà des seuils proposés.

La revue des connaissances a porté sur les caractéristiques physiques, physiologiques et psychosociologiques du bruit, les caractéristiques des sources de bruit considérées (transports terrestres et aériens, activités industrielles et de loisir) et les niveaux d'émission associés, les niveaux d'exposition de la population, les effets extra-auditifs du bruit (physiologiques et psychosociologiques) et les différents outils réglementaires de gestion du bruit.

Cette revue a montré l'insuffisance des indicateurs pour tenir compte du bruit de type événementiel et a conduit à réorienter les objectifs vers l'élaboration d'une méthode d'évaluation des impacts sanitaires extra-auditifs du bruit environnemental permettant notamment d'intégrer les effets des courts événements sonores.

Les travaux du groupe se sont en conséquence focalisés sur 5 aspects à prendre en compte :

- l'identification des effets sanitaires à considérer ;

- la synthèse des relations dose-effet utilisées dans l'analyse quantitative des impacts sanitaires extra-auditifs ;
- la détermination des indices acoustiques (notamment événementiels) à utiliser pour qualifier les expositions ;
- la détermination des paramètres modificateurs complémentaires à considérer ;
- la détermination des populations cibles selon les lieux et périodes d'émission.

La méthodologie proposée sur ces bases repose sur la description des états sanitaires initial et final pour un projet d'aménagement donné, sur une zone donnée, et la caractérisation de l'évolution d'un état sanitaire *via* l'évolution d'un ensemble de paramètres clés de nature acoustique, contextuelle ou individuelle, identifiés comme modificateurs de cet état. Cette méthodologie - qui pourra évoluer avec l'état des connaissances - a été ensuite illustrée par l'exemple.

On notera ici que, malgré des niveaux de connaissance très avancés sur le bruit et ses effets sanitaires, les attentes en terme d'études d'impact et d'indicateurs de « gestion » ne peuvent être satisfaites compte tenu de la nature particulière de certains phénomènes sonores. Les travaux du groupe ont par contre débouché sur l'élaboration d'une méthodologie d'évaluation, croisant les multiples compétences ce qui constitue une avancée tout à fait significative.

1.2.2. Expertise collective sur la sélection des polluants à prendre en compte dans les évaluations des risques sanitaires réalisées dans le cadre des études d'impact des infrastructures routières

La question concerne ici la prise en compte des effets sur la santé de la pollution de l'air dans les études d'impact des infrastructures routières, et notamment l'identification des polluants émis directement ou non par le trafic routier et pouvant présenter un danger pour la santé, et la sélection de ceux qui, au regard des émissions, concentrations atmosphériques et données toxicologiques, doivent être retenus dans les études d'impact (Seigneur et al. 2012).

Les travaux ont été organisés autour des aspects principaux suivants : 1- les approches d'autres pays européens et le retour d'expérience de l'actuelle méthodologie d'évaluation ; 2- l'identification systématique de toutes les substances émises (y compris infrastructure, entretien, etc.), et la documentation de données d'émission associées lorsqu'elles existent ou peuvent être évaluées ; 3- l'identification des valeurs de références et autres données d'effet sur la santé des substances à considérer et selon les différentes voies d'ingestion (respiratoire ou orale) et pour les modes d'exposition aiguë (courtes durées de moins de 14 jours) et chroniques (durées de plus d'une année) ; 4- l'élaboration d'une méthode de hiérarchisation des polluants - s'appuyant sur données d'émissions et valeurs toxicologiques ; 5- la sélection des polluants les plus pertinents pour une étude d'impact et une analyse des limites de l'approche de hiérarchisation et des connaissances actuelles en vue de travaux ultérieurs.

Plus de 320 polluants avaient déjà été recensés en 2004, en lien avec les infrastructures routières et le trafic. Les travaux ont permis d'identifier 67 nouvelles substances liées à l'évolution des technologies (climatisation) et à de nouvelles connaissances (entretien des voiries, etc.), portant le nombre total à plus de 380 substances.

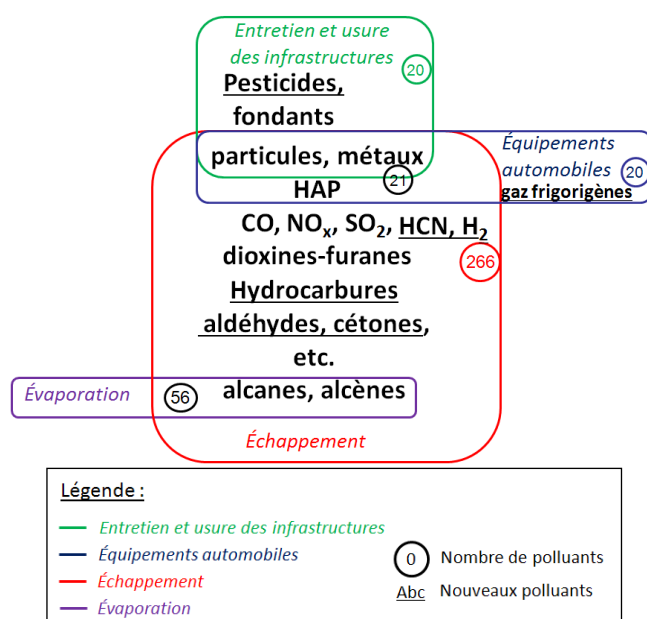


Figure 4. Répartition des 383 polluants en lien avec les infrastructures routières en fonction de leurs origines (source Anses, Seigneur et al 2012)

La hiérarchisation des substances vise à identifier celles qui représentent les plus grands enjeux de santé publique et qui doivent en conséquence être pris en compte dans les études d'impact. Cette hiérarchisation est envisagée en croisant les données de « production » (émission par le trafic, l'infrastructure, l'entretien), et les informations sur leur toxicité (valeurs toxicologiques de référence ou valeurs guides) en considérant les différents modes et voies d'exposition. On considérera également les niveaux d'exposition observés en proximité d'infrastructure afin de valider les résultats de la hiérarchisation. Afin de documenter les émissions, on procède par scénarios (voies urbaine, rurale, autoroute, en différentes conditions de circulations congestionnée ou fluide), ne retenant que les situations les plus critiques.

Pour les particules et dioxyde d'azote NO₂, on ne dispose cependant pas de valeurs toxicologiques, et ces 2 polluants ne peuvent en conséquence pas être hiérarchisés selon l'approche retenue. Mais compte tenu de l'enjeu de santé publique qu'ils représentent (enjeu avéré, important et mis en évidence par plusieurs études épidémiologiques) ces 2 polluants sont retenus d'office pour les études d'impact.

Finalement, ce sont bien 3 voies d'exposition qui sont retenues (expositions respiratoires aiguë et chronique, orale chronique). Les polluants à prendre en compte sont les particules (PM₁₀ et PM_{2,5}), dioxyde d'azote (NO₂), 12 autres substances et 2 familles de polluants (HAP et dioxines et furannes).

Le groupe proposera également des recommandations de mise en œuvre des études d'impact, notamment l'étude quantitative des risques sanitaires (EQRS) :

- approche par « équivalence toxique » pour les HAP (chacun disposant d'un indice de toxicité) et de même pour les dioxines et furanes.
- Pour les PM et NO₂ qui ne disposent pas (encore) de valeurs seuils réglementaires, approche par comparaison des niveaux de concentrations initiaux et prévus, et limite de la contribution de l'infrastructure à un pourcentage des valeurs guides (1 à 3% en Autriche)

Le groupe de travail conclura par ailleurs à l'insuffisance des connaissances pour plusieurs des substances retenues (notamment à l'émission et parce que ces substances ne sont pas réglementées) et recommandera des travaux de recherche et de caractérisation de ces émissions.

Cette expertise s'est située dans la continuité de travaux réalisés en 2004 avec des approches relativement similaires (identification de substances, documentation, hiérarchisation croisant VTR et émissions, etc.). Les principaux résultats de ces nouveaux travaux résident dans un recensement élargi des polluants (nouvelles préoccupations, nouvelles connaissances) et très documenté sous forme d'état de l'art systématique, une méthodologie de hiérarchisation enrichie et améliorée, l'identification de substances nouvelles

à prendre en compte, et des recommandations de mise en œuvre et de travaux d'amélioration des connaissances.

On notera que la problématique d'évaluation des effets sanitaires liés à la pollution de l'air (notamment des transports) est particulièrement complexe, en raison de la nécessaire prise en compte de différentes voies et modes d'exposition, et du grand nombre potentiel de polluants, la plupart étant insuffisamment connus même à l'émission.

Ces travaux auront permis d'en identifier une quinzaine qui représentent - de manière quasi-certaine - de réels enjeux de santé publique (au moins en l'état actuel des connaissances). Cette identification est un point méthodologique fondamental pour l'évaluation. Le croisement des connaissances concernant les émissions du trafic et des infrastructures d'une part et les impacts sanitaires associés aux très nombreuses substances constitue également une richesse de ces travaux.

1.3. Contribution à l'évaluation des zones de restriction de circulation (pollution de l'air), projets Primequal ZaParC et Prequalif

De nombreuses agglomérations souffrent de la pollution atmosphérique et les mesures de restriction sélective de la circulation (Low Emission Zones LEZ), - n'autorisant que les véhicules les moins polluants à circuler dans certaines zones - sont régulièrement envisagées comme moyen de remédiation.

En France, le dispositif de Zones d'Action Prioritaire pour l'Air ZAPA (équivalent des LEZ) a été d'abord envisagé sous forme « d'expérimentation » il y a quelques années avant d'être abandonné ou repoussé début 2014. Cette démarche « expérimentale » a conduit plusieurs agglomérations françaises à réaliser des études de faisabilité (choix de scénarios de ZAPA et analyse des impacts notamment sur la qualité de l'air). A l'issue de ces études, certains de ces scénarios auraient dû être sélectionnés et mis en œuvre pour une durée limitée cependant. En parallèle, l'Ademe et le MEDDE ont programmé des travaux de recherche en vue du développement de méthodes et métrologies d'évaluation et monitoring de telles mesures, considérant également leur acceptabilité.

Deux projets de recherche ont ainsi été proposés sur l'aspect pollution de l'air :

- le projet Prequalif (programme pluridisciplinaire de recherche sur la qualité de l'air en Île de France) avait trois grands objectifs :
 1. le développement et la mise en œuvre de différentes techniques expérimentales de mesure et caractérisation des émissions de particules liées au trafic en Île de France (réseau de Black Carbon, polluant spécifique du trafic, expérimentation en tunnel, contributions régionales, etc.),
 2. l'amélioration des techniques de modélisation pour spatialiser et quantifier la pollution due au trafic et notamment l'apport des ZAPA,
 3. le développement et la mise en œuvre de méthodologies d'évaluation des bénéfices sanitaires et économiques.
- le projet de recherche Za-ParC visait à développer des méthodes de caractérisation des parcs automobiles locaux en circulation, qui sont l'une des composantes essentielles de l'émission du trafic et de l'efficacité de zones d'action prioritaire pour l'air (restrictions selon les catégories et âges des véhicules). Ce projet a été mené en lien avec le projet Prequalif sur le territoire Île de France.

Un autre projet AZAP a été proposé sur l'acceptabilité des ZAPA (en cours).

1.3.1. Apports du projet Prequalif

Pour une description complète de ce projet (non encore totalement finalisé) on se reportera à (Sciare et al. 2014), mais on peut d'ores et déjà souligner certains apports très significatifs du projet, quant à l'approche d'évaluation de la pollution de l'air due au trafic et à l'évaluation de mesures de type LEZ/ZAPA.

Par exemple, les techniques de modélisation et assimilation des données mesurées montrent que la majorité des populations est exposée à des teneurs en PM10 (autour de 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) plus élevées que celles prédites par le modèle ADMS-Urban sans assimilation (entre 18 et 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). De même les plages de concentrations en dioxyde d'azote sont beaucoup plus larges (entre 35 et 60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) que celles données par ADMS-Urban seul (40 à 45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

Par ailleurs, un travail bibliographique très conséquent a été mené sur les approches d'évaluation des impacts sanitaires de mesures de réduction de la pollution. Sur cette base, une réflexion spécifique à la pollution de l'air liée au trafic a été menée, considérant la pollution de proximité du trafic et des indicateurs et fonctions d'exposition spécifiques à la situation. Une simulation d'un scénario ZAPA sur l'Île de France montre qu'une baisse des émissions routières de PM2.5 d'environ 30% se traduirait par des baisses des concentrations atmosphériques faibles sur la région, de l'ordre de 1-2% sur Paris, et des effets sanitaires de quelques pourcents. Par contre les estimations basées sur les concentrations et effets du Black Carbon seraient beaucoup plus significatives (bénéfices plus importants). Par ailleurs la quasi-totalité des gains sanitaires concerne les zones d'habitations à proximité du trafic routier (moins de 100m) et les zones denses.

Des apports importants sont donc attendus de ces travaux, à la fois en terme de techniques de mesure (réseau Black Carbon, expérimentations *in situ*), de modélisation de la qualité de l'air, d'évaluation des expositions des personnes, de connaissance des liens entre pollution due au trafic et impacts sanitaires, et *in fine* d'approche méthodologique de l'évaluation.

1.3.2. Parcs automobiles en circulation et efficacité de zones de restriction d'accès aux véhicules polluants (projet Za-ParC)

Le projet de recherche Za-ParC s'est donné comme objectif principal le développement de méthodes de caractérisation des parcs automobiles locaux en circulation, à partir de l'observation vidéo *in situ* d'une part, et à partir des enquêtes de mobilité d'autre part (Carteret et al. 2014).

La composition du parc automobile (selon les catégories de véhicules, motorisations essence / Diesel ou alternatives, réglementations pollution, etc.) est en effet un élément prépondérant de l'émission du trafic. Par ailleurs une LEZ agit directement sur cette composition (exclusion de véhicules anciens, ou de certaines motorisations), et son efficacité est donc directement liée à la composition initiale du parc et à la restriction appliquée.

Une expérimentation *in situ* d'observation vidéo des véhicules a donc été menée en Île de France en différents lieux et périodes, permettant un échantillonnage très satisfaisant des parcs et l'analyse des caractéristiques techniques de véhicules selon les territoires. Une analyse similaire a été menée à partir de l'enquête de mobilité de l'Île de France (EGT2010).

Les deux approches montrent des disparités importantes selon les territoires, en proportions de véhicules Diesel et de véhicules récents peu polluants. Avec un parc plus jeune, moins polluant, et moins Diésélisé, les territoires « aisés » seraient ainsi favorisés en terme d'émissions (à trafic égal) et peu touchés par une mesure de restriction.



*Figure 5. Caractérisation des parcs automobiles par observation vidéo :
Trois caméras en surplomb du boulevard périphérique parisien*

La simulation des émissions du trafic routier sur l'Île de France démontre la forte sensibilité des émissions aux données de parc, et l'importance du démarrage à froid (40 à 50% de l'émission totale de CO et COV), des véhicules lourds (40% des NOx et particules pour 7% du trafic) et du trafic hors A86 (75% des émissions) tandis que Paris ne représente que 11 à 14% de l'émission.

En comparaison avec le parc national, le parc observé conduit à des majorations d'émissions de CO₂ (de 11 à 12%), de NOx (+5-6%), et de CO et COV (+60 à 90%), et à des distorsions de répartition spatiale des émissions. Les particules ne sont globalement pas affectées.

A l'issue de ces travaux, une réflexion bibliographique et méthodologique a été menée sur l'évaluation de mesures de restriction (LEZ) et de renouvellement du parc automobile quant à leurs impacts sur la pollution de l'air et la contribution du trafic à cette pollution.

Du trafic aux impacts, les phénomènes sont multiples et complexes, qu'il s'agisse des phénomènes physico-chimiques gouvernant la pollution, des trafics et conditions de circulation, ou encore des comportements face à des mesures de restriction. La fragilité des estimations tient à la difficulté de la prise en compte de ces phénomènes au travers de modélisations qui nécessitent d'importantes quantités de données de validation, à certaines insuffisances actuelles des modèles, et aux nombreuses approximations ou incertitudes sur les hypothèses intrinsèques et sur les données d'entrée des simulations pour un cas d'étude.

Différents aspects de l'évaluation ont été discutés qui doivent permettre d'améliorer les méthodes d'évaluation, en prenant en compte au mieux des lacunes, en construisant les hypothèses les plus pertinentes, et par une meilleure prise en compte des retours d'expérience

selon les configurations des LEZ et les effets observés.

On note enfin la nécessité d'inscrire l'évaluation d'une LEZ dans une dynamique temporelle : en effet, le parc automobile subit une évolution par renouvellement « naturel » ou au fil de l'eau des véhicules, et une mesure forçant l'exclusion des véhicules anciens devrait interférer avec cette évolution.

Outre la mise en évidence de l'importance de la connaissance des parcs automobiles dans l'évaluation des mesures de réduction de la pollution de l'air due au trafic, ces travaux auront *in fine* permis de démontrer la faisabilité d'approches de caractérisation des parcs, tant par les enquêtes que par des expérimentations *in situ* relativement aisées d'une part, et de poser les bases d'une réflexion sur la question complexe de l'évaluation de mesures de restriction sélective par rapport à la pollution de l'air.

1.4. Modélisation et couplage d'outils, projets Ville Numérique et Trafipollu

1.4.1. Le projet Ville Numérique

Initié par le Ministère de l'Ecologie, du Développement durable et de l'Energie (MEDDE), et piloté par le Centre scientifique et technique du Bâtiment (CSTB), le projet « Ville Numérique » a réuni 12 équipes de recherche du CSTB, de l'École des Ponts ParisTech (ENPC), de l'Institut National de l'information Géographique et forestière (IGN), de l'IFSTTAR et de Météo France (Soula, 2013).

Le projet « Ville numérique » avait pour but d'étudier et développer différents éléments constitutifs d'une plateforme de simulation intégrée de la ville, fédérant une diversité d'expertises, en vue de l'évaluation environnementale multicritère de projets d'aménagements urbains. Il s'agissait notamment de développer des indicateurs environnementaux à partir de l'étude de phénomènes physiques de la ville tels que les mobilités, le trafic, l'acoustique, l'hydrologie, la pollution de l'air, etc.

Au final, le projet aura permis d'aborder les différentes problématiques de cet exercice, et notamment de mettre en avant les enjeux considérables du couplage des modèles entre eux, ceux-ci étant à des degrés de maturité divers, opérant à des échelles spatiales et temporelles le plus souvent différentes, avec des données d'entrée et en sortie très variées et non standardisées.

Ces difficultés ont freiné l'ambition de construction d'une plateforme logicielle durant le projet, mais ont permis une réflexion transversale sur les caractéristiques des modèles numériques pour leur interconnexion dans une plateforme commune, et l'émergence de recommandations sous la forme d'une charte « Ville Numérique ».

Au-delà de ces travaux sur l'intégration globale des modèles, différents états de l'art ont été réalisés sur les phénomènes physiques, et plusieurs couplages ont pu être réalisés (trafic / bruit, trafic / pollution atmosphérique, hydrologie / énergie urbaine, météorologie / climat / énergie, etc.). On se reportera au rapport de synthèse et aux différents livrables sur ces aspects.

1.4.2. Modélisation de la pollution atmosphérique liée à la circulation automobile en zone urbaine : problématique du couplage d'outils

Dans le cadre du projet Ville Numérique, l'une des tâches (et thèse co-encadrée par 3 des partenaires) s'est intéressée à la « définition de chaînes de modélisation pour l'estimation des émissions de polluants et de gaz à effet de serre du trafic à différentes échelles urbaines », considérant pour cela la faisabilité et pertinence des chaînes associant les modèles de trafic, d'émission de polluants atmosphériques, de dispersion et transport de ces derniers dans l'atmosphère, et de leur éventuel transfert dans les bassins versants par dépôt et ruissellement

(Fallah et al., 2013, Fallah 2014). Les questions principales concernent la pertinence des modèles aux différentes échelles, la cohérence de leur couplage et interfaçage (données entrantes et sortantes), la réalisation opérationnelle des couplages, et la validation sur des terrains d'applications.

Les travaux ont débuté par un état de l'art détaillé des outils de modélisation des différents phénomènes : trafic, émissions, transferts atmosphériques (qualité de l'air) et hydrauliques (qualité de l'eau). Cet état de l'art complexe et pluridisciplinaire a mis en exergue la difficulté de l'intégration cohérente des modèles, en raison de problématiques spécifiques (l'eau s'intéresse aux métaux, HAP, particules grossières, etc. qui sont méconnus ou ignorés des modèles d'émissions et de pollution atmosphériques), de difficultés liées aux échelles (le trafic peut être modélisé finement tandis que les phénomènes atmosphériques et hydrauliques sont approchés avec des échelles spatio-temporelles plus larges), et de limites, lacunes et incertitudes des différents modèles.

Cet état de l'art a permis, en connaissance de causes, de configurer deux chaînes de modélisation, la première considérant une approche statique et horaire, la seconde envisageant une approche dynamique complétée cependant par quelques calculs agrégés lorsque les modèles instantanés sont insuffisants.

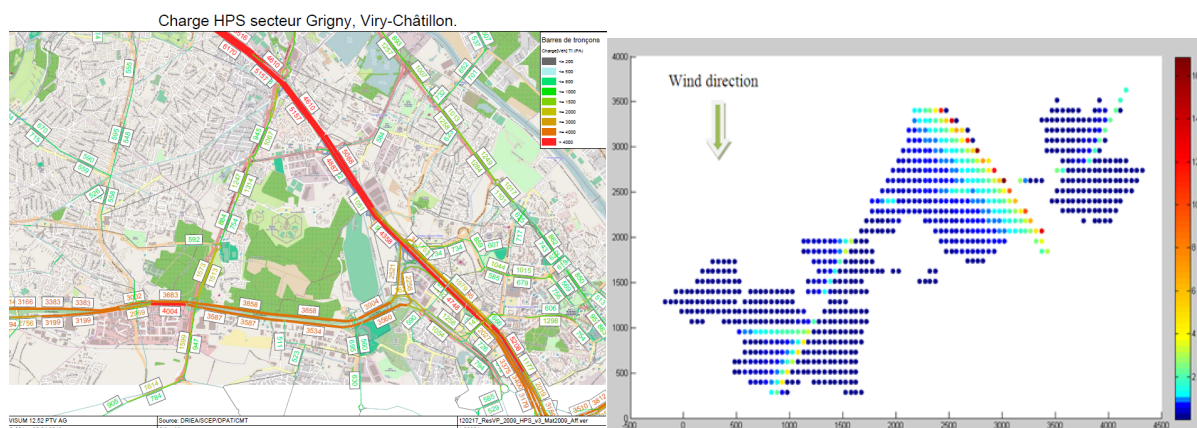


Figure 6 - Configuration de simulation du trafic, et de la pollution atmosphérique (CopCete, Polyphemus) et des eaux (SWMMM) en métaux Cd, Zn, et Pb, sur la zone expérimentale de Grigny. A droite, concentrations de zinc (ng/m^3) dues au trafic.

Compte tenu de l'hétérogénéité des outils, il n'a pas été possible de réaliser leur intégration, mais des outils d'interfaçage ont été développés. Ces chaînes de modèles ont été testées pour validation sur des configurations partielles avec les couplages suivants :

- 1- Trafic dynamique (Symuvia) / émissions instantanées (Phem + Copert) sur une avenue;
- 2- Émission (horaire) / qualité de l'air et dépôt sur autoroute,
- 3- Dépôt / propagation des pollutions dans l'eau sur zone expérimentale de Grigny,
- 4- Trafic / émission / qualité de l'air, sur une rocade pour validation émissions / air

5- Trafic / émission / qualité de l'air et de l'eau sur zone expérimentale de Grigny.

Au global, ce projet aura mis en avant de nombreuses limites et précautions nécessaires au couplage des outils et à la réalisation de ces chaînes, ainsi que la nécessité de données expérimentales robustes pour la validation de l'ensemble.

1.4.3. Évaluation dynamique des nuisances sonores liées au trafic en milieu urbain

Le projet Ville Numérique s'est également intéressé aux nuisances sonores, envisageant le couplage du modèle Symuvia (modèle de trafic macroscopique à résolution microscopique développé par le LICIT, IFSTTAR), et un modèle de propagation sonore du CSTB, au sein du logiciel eveCity du CSTB (maquette numérique urbaine), en vue d'une évaluation dynamique des nuisances sonores liées au trafic par l'utilisation de restitutions sonores directes ou de cartes de couleur.

Les difficultés théoriques et techniques ont été nombreuses, mais un démonstrateur a été réalisé permettant de simuler l'impact sur les nuisances sonores de variations du trafic (flux, proportion de véhicules lourds) selon différentes configurations (voie en déblais/remblais, murs anti-bruit), avec différents modes de restitution (sonore, cartes de bruit)

Cette tâche aura permis l'intégration de plusieurs modèles permettant le calcul des nuisances sonores dues au trafic, démontrant ainsi la faisabilité du concept de plateforme logicielle intégrée, avec cependant des limites, précautions et la nécessité de données expérimentales robustes pour la validation.

1.4.4. Modélisation multi-échelles de la pollution due au trafic dans un environnement urbain, projet ANR Trafipollu

Le projet ANR Trafipollu (Trafipollu, 2012) s'inscrit dans la suite logique du programme Ville Numérique. Il a pour objectif principal le développement d'outils de modélisation permettant de déterminer dynamiquement la localisation des polluants générés par le trafic routier dans un environnement urbain, à différentes résolutions. Il s'agit en conséquence de mettre en œuvre aux échelles urbaines (rue, quartier et ville) des chaînes de modélisation permettant de simuler (i) le trafic, (ii) les émissions de polluants associées, (iii) leur dispersion dans l'atmosphère, (iv) leur dépôt et (v) transfert dans l'eau et dans les sols. Il s'agira également de proposer des méthodes permettant d'affiner les résultats à large échelle à partir des résultats produits par les modèles à plus haute résolution et de mettre en œuvre les modèles fins à partir des données simulés aux échelles supérieures. Compte tenu de l'importance de disposer de données expérimentales et de la validation des chaînes, une expérimentation d'envergure a été planifiée et réalisée, associant les différents phénomènes physiques en jeu et permettant le suivi dans l'espace et dans le temps des polluants considérés

(NO_x, CO_x, HAP, particules et métaux).

Ce projet est en cours et permettra sans doute de répondre à de nombreuses limites et questions évoquées dans les travaux précédents, pour la modélisation, et l'élaboration ou amélioration des méthodologies d'évaluation des impacts du trafic sur la pollution de l'air (et au delà des eaux et sols).

1.5.L'analyse du cycle de vie comme approche de l'évaluation

L'analyse du cycle de vie constitue un cadre intéressant de l'évaluation avec cependant des limites importantes quand il s'agit d'exprimer des impacts locaux ou sanitaires. On citera ici deux cadres de travaux (passé et en cours) d'approche des impacts du trafic ou des mobilités par l'analyse du cycle de vie d'une part, et d'évaluation systémique d'un aménagement urbain d'autre part.

D'autres travaux menés par l'IFSTTAR concernent l'impact des infrastructures et des chantiers de construction et s'appuient également sur l'ACV (éco-comparateur ECORCE, cf. <http://ecorce2.ifsttar.fr>).

1.5.1. ACV et mobilité urbaine

Cette thèse (Le Féon, 2014) menée à EDF avec un comité de pilotage associant l'IFSTTAR pour la compétence transport et pollution, considère les mobilités dans leur diversité et dans une approche cycle de vie, c'est à dire en tenant compte des impacts environnementaux des phases amont (construction, etc.), aval (recyclages, etc.) et d'usage (déplacements).

La mobilité des personnes et marchandises au sein d'une agglomération peut être analysée en besoins élémentaires de déplacements (trajets domicile-travail, etc.), lesquels seront considérés comme des « unités fonctionnelles ». Cette approche a été développée et testée en se focalisant sur les émissions de GES d'une agglomération (Saint-Etienne Métropole), en considérant les mobilités au travers des enquêtes, les différents modes de transport, la composition du parc automobile, etc. La disponibilité des données est la principale difficulté, mais l'approche met en avant des impacts hors usage de l'ordre de 17% des GES, et des grandes disparités d'émission selon les motifs de déplacement.

Une classification des aires urbaines a été ensuite proposée selon des paramètres influençant la mobilité. On identifie ainsi des aires urbaines types (Bordeaux, Toulon et Valenciennes) qui sont ensuite étudiées à partir des données de mobilité tirées des Enquêtes Ménages Déplacements (EMD) et en appliquant l'approche ACV par besoin ou motif de déplacement.

Les bilans environnementaux par habitant diffèrent principalement du fait des distances annuelles totales parcourues, mais aussi des répartitions modales, de la répartition essence / Diesel, etc. La discrétisation par motif permet d'en identifier certains pour lesquels des disparités importantes sont observées entre les villes (trajets vers l'université, vers la garde d'enfant ou encore la recherche d'emploi), notamment selon les modes de transports et véhicules utilisés.

Cette approche d'évaluation par l'ACV, relativement agrégée, ne permet certes pas

d'appréhender des impacts locaux (pollution de l'air locale, nuisances sonores), mais elle offre des perspectives en terme d'aide à la décision en permettant de cibler *a priori* des besoins de mobilité ou plus largement des enjeux de consommation, pollution et les possibilités de réduction qui peuvent être envisagées. La principale originalité de ces travaux s'appuyant sur la méthode ACV réside dans l'approche des mobilités au niveau d'une agglomération, et en en considérant les différents motifs ou besoins.

1.5.2. Efficacy 3.1 : ACV urbaine

Dans un contexte de transition énergétique, la ville représente un enjeu majeur mais aussi complexe en raison de son caractère systémique avec de nombreuses fonctionnalités, des objets technologiques multiples et des acteurs nombreux. Afin d'explorer / expérimenter de nouvelles voies et méthodes pour accélérer notre transition énergétique, avec une expertise scientifique et technique large permettant d'appréhender cette complexité du « système ville », le consortium Efficacy a été créé (sous forme d'un Institut pour la Transition Énergétique dans le cadre du Programme d'investissements d'avenir), regroupant plusieurs opérateurs et industriels ainsi que plusieurs laboratoires de recherche. Efficacy a décliné son action sous forme de projets.

Le projet Efficacy 3.1 est focalisé sur le développement et l'application de méthodes d'évaluation des impacts des projets d'aménagement urbain (échelle du quartier), en tenant compte des différentes fonctionnalités (énergie, eau, bâtiment, déchets, mobilités/transports, impacts locaux dont la pollution de l'air). Il doit permettre de disposer d'un outil d'aide à la décision pour les acteurs de l'urbain que sont les collectivités, les aménageurs, les promoteurs, etc., qui ont la responsabilité de concevoir et réaliser des projets à l'échelle des quartiers, voire des villes. L'objectif est de mettre au point une méthodologie et des outils permettant de mesurer sur une base scientifique robuste l'ensemble des impacts d'un projet sur le fonctionnement du territoire étudié, à savoir ses impacts environnementaux, économiques et sociaux. De tels outils ont été développés au cours des dernières années à l'échelle des bâtiments, notamment les outils d'analyse de cycle de vie. Il convient aujourd'hui de développer de nouveaux outils à une échelle plus large et prenant en compte l'évolution prévisible du fonctionnement du territoire.

Il s'agit dans un premier temps de réaliser un état de l'art des phénomènes, outils et méthodes permettant d'appréhender les différents impacts énergétiques et environnementaux d'un aménagement urbain, en tenant compte de toutes ses fonctionnalités en particulier les mobilités. L'ACV est envisagée comme approche de base de l'évaluation, mais plusieurs aspects et impacts nécessiteront des approches spécifiques hors ACV. En parallèle, les outils recensés seront progressivement mis en œuvre sur plusieurs études de cas, et enrichis.

L'IFSTTAR est impliqué dans ce projet au travers de plusieurs laboratoires. Le LVMT développe toute la compétence autour des mobilités, de leur organisation et gouvernance, et de leurs impacts sociaux, économiques et environnementaux. Le LTE intervient

Évaluation de l'impact sur les populations de la pollution atmosphérique et du bruit liés aux trafics et aux modifications des infrastructures de transport - Éléments

spécifiquement sur la modélisation des émissions et de la pollution de l'air liée aux transports. L'appréhension des impacts locaux (pollution de l'air) nécessitera cependant de considérer les autres sources d'émission, et le devenir des polluants selon les configurations de l'aménagement, de même que les impacts sanitaires de cette pollution.

1.6. Conclusions

Ce chapitre a permis de rendre compte de l'importance et de la diversité des travaux menés et qui portent d'une manière ou d'une autre sur l'évaluation environnementale et les effets du trafic sur les nuisances sonores et la pollution de l'air en particulier.

Ces travaux constituent un large ensemble, un corpus considérable qu'il était utile de remettre en perspective afin d'en tirer le meilleur parti.

Plusieurs cadres se sont focalisés sur la modélisation des phénomènes physiques, du trafic à la qualité de l'air et aux environnements sonores, voire aux impacts sanitaires, envisageant les difficultés spécifiques de couplages d'outils, de validation des chaînes de modèles et de disponibilité des données.

D'autres cadres apportent des éclairages spécifiques mais tout aussi intéressants, sur l'approche de l'évaluation, la multiplicité et complexité d'évaluation des mesures de gestion des mobilités et du trafic, le cadre particulier de l'analyse du cycle de vie, ou encore les indicateurs et polluants à considérer dans les analyses.

2. Bruit et pollution de l'air dus au trafic : phénomènes et outils

L'évaluation objective des impacts sur les populations de la pollution atmosphérique et du bruit liés au trafic nécessite une bonne compréhension et explicitation des phénomènes inhérents à ces impacts, ainsi que leur prise en compte dans les outils d'évaluation. Nous proposons dans ce chapitre un bref état de l'art des phénomènes et outils concernant d'une part la pollution de l'air des trafics, et d'autre part le bruit environnemental.

2.1. Pollution atmosphérique liée au trafic - état de l'art des phénomènes et outils

2.1.1. Les émissions de polluants atmosphériques du trafic routier

Le trafic automobile contribue à la pollution atmosphérique par l'émission directe de polluants liée à l'utilisation des véhicules et par les polluants dérivés ou secondaires formés *a posteriori* dans l'atmosphère (comme l'ozone ou les particules secondaires). Les polluants, particulaires ou gazeux, contribuent à l'effet de serre (CO_2 , CH_4 , N_2O , certains COV, particules), à la pollution photochimique (COV, NO_x , CO), à l'acidification de l'eau et des pluies (SO_2 , NO_x), aux impacts sur la santé des populations (PM, SO_2 , CO, COV, HAP, dioxines et furanes, métaux), sur la faune (*idem* santé) et la flore (NO_x , NH_3), etc. (Goger, 2006).

Les polluants du trafic routier sont connus de manière très inégale, et (EMEP/EEA, 2009) propose ainsi une classification selon le niveau de leur connaissance. Les polluants ou « agrégats de substances » du groupe 1 : CO, NO_x (regroupant NO et NO_2), HC ou COV (totaux, sans distinction des espèces individuelles) ont été l'objet de nombreuses mesures sur banc d'essai et leurs émissions sont établies sous forme de fonction des vitesses des véhicules et de paramètres du moteur. Les polluants du groupe 2 (métaux des carburants, lubrifiants ou issus de l'usure du moteur, SO_2 , CO_2), sont estimées sous forme d'un contenu du carburant et par la littérature. Les polluants des groupes 3 et 4 (HAP et COV déclinés sous forme de substances individuelles, particules selon leur taille et nature, etc.) sont dérivés de quelques spéciations expérimentales, par grande famille de véhicules ou de carburants. On notera que les polluants les moins bien connus sont ceux associés aux enjeux sanitaires ou environnementaux actuels (NO_2 , $\text{PM}_{1.0}$, certains HAP et COV, métaux).

Le trafic (routier) contribue directement à la pollution de l'air par différents phénomènes. À l'échappement, les émissions de polluants sont principalement liées à la combustion et varient avec les technologies, motorisations, dispositifs de dépollution, et conditions de circulation. Des surémissions sont liées à la mise en température du moteur et des systèmes de dépollution après le démarrage, et peuvent être prédominantes pour certains polluants. On

trouve aussi à l'échappement des métaux lourds issus des carburants et lubrifiants, ou produits par usure du moteur et du catalyseur. Au niveau du réservoir ou des différents organes du moteur, des COV (hydrocarbures les plus volatils) peuvent être émis par évaporation de carburant. Par usure et abrasion sont émis des particules et métaux lourds liés aux équipements automobiles (freins, pneumatiques, etc.) et à la voirie. La remise en suspension de particules (préalablement déposées sur le sol sous forme de poussières) représente finalement une bonne part des émissions de particules du trafic routier. Abrasion, usure et remise en suspension sont relativement mal connues et souvent omises dans les évaluations.

2.1.2. De l'émission de polluants (par le trafic) aux impacts sanitaires

De l'émission de polluants du trafic aux impacts sanitaires, les phénomènes sont relativement complexes. L'émission d'une source ne contribue d'abord que partiellement à l'ensemble de la pollution locale (autres sources, contributions régionales et pollution de fond). Les impacts dus aux transports s'inscrivent donc en complément d'un contexte ou état initial. Les polluants émis sont de plus l'objet de dispersion et de transport dans l'atmosphère selon les conditions atmosphériques, météorologiques et topographiques (configuration des rues par exemple), voire selon la turbulence locale liée au trafic. Certains polluants sont également l'objet de transformations physico-chimiques dans l'atmosphère, qui peuvent dépendre des conditions climatiques (ensoleillement), de la composition chimique de l'atmosphère (réactions impliquant plusieurs polluants, etc.) et de propriétés spécifiques à chaque polluant.

On passe ainsi d'une distribution spatiale et temporelle de sources d'émissions (et de pollution de fond) à une distribution de concentrations des différents polluants dans l'atmosphère selon des mécanismes extrêmement complexes et qui peuvent être spécifiques à certains polluants.

Entre ces champs de concentrations en différents polluants et variables selon le temps, et les impacts sanitaires effectifs sur les populations, interviennent des mécanismes compliqués, croisant la localisation, les activités et l'exposition des individus d'une part, la toxicité des différents polluants voire leurs interactions, et finalement la sensibilité de certaines populations à ces substances toxiques et selon différentes conditions d'exposition (chronique, aiguë, cumulée) et autres facteurs individuels.

De manière schématique, on peut dire que les effets sanitaires de la pollution de l'air sont liés :

- à la toxicité des différentes substances polluantes, et aux risques associés (facteur d'exposition au risque) de contracter différentes affections, ces risques variant selon les personnes (selon l'âge, personnes déjà atteintes d'autres affections, femmes enceintes, enfants, facteurs de risques individuels tels que le tabac, facteurs socioéconomiques, etc.),

- aux niveaux de concentrations de ces substances dans l'atmosphère, et à l'interaction éventuelle (synergie ou antagonisme) entre certaines de ces substances. On considère généralement qu'il n'y a pas de seuils de concentration en dessous desquels il n'y aurait pas de toxicité ou d'effet sanitaire, les concentrations faibles affectant moins gravement et/ou une moindre proportion des populations exposées.
- à l'exposition des populations à ces concentrations de polluants, en durée et selon les niveaux, etc. Ces expositions devraient même être envisagées selon les activités (pratique du sport, sommeil, etc.) et leur distribution spatiale et temporelle (exposition au domicile, dans les transports, sur le lieu de travail, etc.), et enfin « tout au long de la vie » (cumul d'exposition et d'effets),

il est par ailleurs vraisemblable que d'autres caractéristiques du cadre de vie (exposition au bruit, au trafic, qualité de vie du quartier, etc.) puissent influencer les effets sanitaires liés à la pollution.

2.1.3. Méthodes, outils d'évaluation de la pollution de l'air

L'évaluation de la pollution de l'air liée au trafic ne repose d'abord et souvent que sur le calcul des émissions de polluants des véhicules et du trafic. Cependant le seul calcul des émissions polluantes ne permet d'envisager que très partiellement la problématique des impacts (notamment sanitaires) liés à la pollution de l'air. Une démarche plus exhaustive doit considérer la dispersion des polluants et leurs concentrations selon les lieux d'activités ou de présence des populations, l'exposition et la sensibilité des personnes (selon groupes et caractéristiques individuelles) aux différentes substances et pour différents types d'affections.

2.1.3.1. Les outils de calcul des émissions de polluants

Il existe une large palette d'outils de calcul des émissions de polluants atmosphériques du trafic routier (André et al. 2012). Les plus utilisés reposent sur des principes relativement simples couplant des facteurs ou fonctions d'émissions spécifiques à des quantités d'activité (distance parcourue par un véhicule, durée de parking, nombre de démarrages), et sommant les émissions pour une grande variété de véhicules. En Europe, ils sont le plus souvent dérivés de la méthode COPERT⁶ qui permet de calculer pour 242 types de véhicules (selon catégories et technologies détaillées, carburant, taille du moteur ou poids du véhicule, réglementations émissions), l'émission d'un grand nombre de polluants, et notamment :

- les émissions à chaud pour les véhicules légers (voitures, véhicules utilitaires légers, 2-roues) et lourds (camions, autobus et autocars) ; Les fonctions d'émissions à chaud varient avec la vitesse moyenne de circulation (Figure 7)
- les surémissions à froid pour les véhicules légers ;
- les surémissions liées à la pente et au chargement pour les véhicules lourds ;
- des corrections liées aux propriétés et améliorations des carburants ;
- des corrections liées au vieillissement des catalyseurs et à leur maintenance ;

⁶ Computer Programme to calculate Emissions from Road Transport, <http://www.emisia.com/copert/>

- les émissions par évaporation des véhicules légers (essence) ;
- l'émission non échappement (usure des freins et pneumatiques seulement).

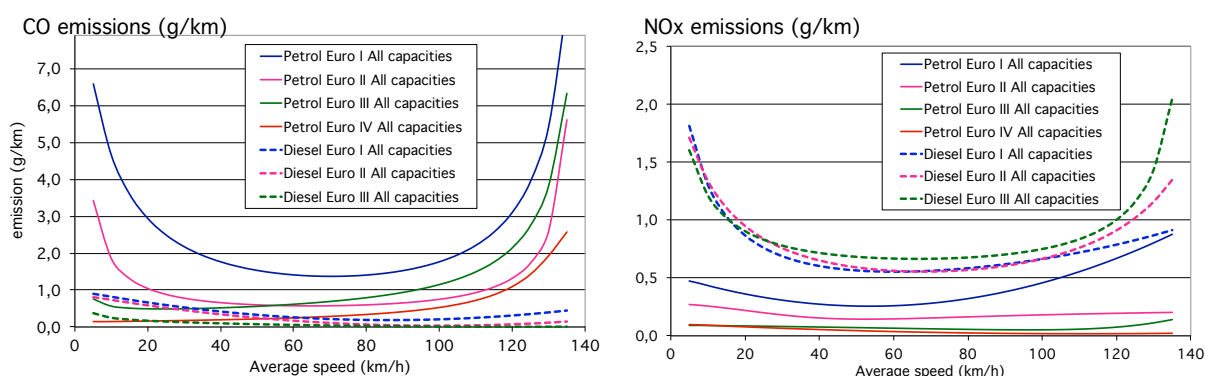


Figure 7 : Courbes d'émission types de la méthode Copert4 : CO et NOx (tous types de voitures essence et diesel)

Les émissions varient assez fortement avec la vitesse de circulation, mais c'est surtout les catégories de véhicules et notamment leur motorisation (Diesel, essence), technologie (catalyseur, filtre à particules, etc.) et appartenance réglementaire (en Europe, depuis EURO1 à 5 actuellement) qui conditionnent leurs niveaux d'émission. C'est pourquoi les modèles d'émission sont très structurés (grand nombre de catégories), avec des fonctions d'émission relativement simples (peu de véhicules testés dans chacune des catégories).

De fait, l'approche et l'outil COPERT sont principalement dédiés aux calculs d'inventaire d'émissions macroscopiques (région, pays, période annuelle), avec un cadre d'analyse en 3 milieux urbain / rural / autoroute sans spatialisation. Ce cadre est peu approprié pour l'analyse d'un réseau routier et l'évaluation d'une agglomération par exemple. Pour cette raison, de nombreux outils sont développés à partir de cette méthode pour des applications locales, et intégrant des hypothèses nationales (composition du parc automobile, etc.). Ces adaptations comportent cependant des risques (erreurs d'interprétations de la méthode, défaut ou retard des mises à jour).

2.1.3.2. Détermination des concentrations de polluants et expositions des individus

La quantification des émissions de polluants constitue un premier indicateur d'impact sur la pollution de l'air. Mais pour aller plus loin dans l'évaluation d'impacts locaux, il est nécessaire de déterminer les niveaux de concentrations selon les lieux, et l'exposition des personnes à ces concentrations en fonction de leurs activités.

La simulation des concentrations de polluants nécessite la connaissance des niveaux de pollution de fond et de la contribution de l'ensemble des sources d'émission influençant l'aire géographique considérée. On pourrait ainsi établir un état initial ou référentiel de la pollution ou qualité de l'air (extérieur) moyenne du lieu (intégrée dans l'espace et le temps).

La connaissance des concentrations très locales de polluants (selon la distance à un axe de fort trafic, ou même selon l'étage d'un bâtiment, etc.) nécessite une simulation beaucoup plus

précise, intégrant la configuration des bâtiments et des rues, le régime des vents, les turbulences, etc. Les outils de telles simulations existent, mais de nombreuses incertitudes pèsent sur la fiabilité des résultats.

On notera également qu'il n'existe pas (à notre connaissance) d'outil permettant de simuler les concentrations à l'intérieur des locaux. Celles-ci dépendent des phénomènes de transfert de la pollution extérieure vers l'intérieur (quelques taux de transferts selon les polluants sont disponibles dans la littérature) d'une part, et d'autre part des émissions liées aux activités intérieures habituelles (cuisson, etc.), voire même des émissions propres à certains matériaux.

L'exposition des personnes aux différents niveaux de pollution doit être établie à partir d'hypothèses sur leurs activités et localisations au cours de la journée.

Les outils permettant de modéliser les concentrations de polluants à partir des sources et émissions, des données météorologiques et de la topographie locale sont typiquement :

- ADMS-Urban, modèle de dispersion gaussien, commercialisé par la société Numtech (<http://www.numtech.fr/>) et développé par CERC (Cambridge Environmental Research Consultants, UK) ; ce modèle est adapté aux configurations urbaines vastes (ADMS-Roads permet de traiter des petits réseaux de routes), et permet d'analyser la pollution de l'air liée à un grand nombre de sources (trafic, industrie, commerces, domestiques, etc.) à différentes échelles (rue, quartier, agglomération). Il est interfacé avec les logiciels SIG et comporte de nombreuses données d'émissions. C'est sans doute le logiciel le plus utilisé.
- SIRANE, modèle de dispersion en milieu urbain à l'échelle de la rue (effet de chacun des bâtiments), puis du quartier et de l'agglomération. Il est développé par le LMFA (Lab. Mécanique des Fluides et Acoustique, de l'Ecole Centrale de Lyon).
- POLYPHEMUS, développé par le CEREAL (laboratoire mixte EDF - ENPC) est une plate-forme incluant différents outils : paramétrisation et prétraitement des données atmosphériques, pilotes de modèles, et modèles indépendants (gaussiens, chimie-transport, aérosols, etc.), post-traitements. Cette plate-forme semblerait moins adaptée à la simulation d'un quartier urbain.

La modélisation des expositions des personnes aux différentes conditions ambiantes nécessite une description des activités de ces personnes en différents lieux (habitat, transport, lieux d'activités). Par défaut, on considère souvent seulement l'exposition sur le lieu de résidence. On notera toutefois les travaux antérieurs ayant conduit à la mise au point d'un indicateur d'exposition ExTra (Travaux de C. Sacre, 1995⁷) selon la proximité aux voies de circulation.

⁷ Sacre C., Chiron M., and Flori J.P. Development of an exposure index of air pollution caused by motor vehicles for use in epidemiological studies. *Sci Total Environ* 1995; 169(1-3): 63-69.

2.1.3.3. *Evaluation et indicateurs d'impact sanitaire*

Dès lors que concentrations et expositions sont modélisées / estimées avec suffisamment de précision, il est possible de les traduire en impacts sanitaires potentiels, même si cette étape est elle-même sujette à de nombreuses incertitudes.

Les indicateurs d'effets sanitaires sont multiples : ce sont typiquement des nombres d'affections constatées par catégories (cardiovasculaire, respiratoire, etc.), des nombres de décès, décès prématurés, années de vie perdues, hospitalisations, consultations, etc. Certains indicateurs sont établis selon les nombres de personnes exposées à un seuil (réglementaire ou recommandé) de concentration pour un ou des polluants. Selon les cas, les limites réglementaires (ou recommandées) s'établissent par rapport au seuil moyen annuel, ou à un nombre de jours dépassant un seuil, etc. On notera que l'utilisation d'un indicateur s'appuyant sur un seuil réglementaire est peu satisfaisante pour la caractérisation des effets, car il induit une grande sensibilité des études d'impact autour de ce seuil, et aucune sensibilité dès qu'on s'en éloigne alors que - comme cela a été rappelé - il n'y aurait pas d'effet de seuil à la pollution de l'air, et que ce seuil réglementaire résulte par ailleurs d'un compromis « acceptable » à un moment donné, et susceptible d'évoluer selon le contexte.

La construction des indicateurs d'effets sanitaires repose généralement sur des lois dose-réponse, traduisant l'effet d'une substance polluante sur la santé (pour une affection donnée), selon le niveau de concentration et/ou exposition. De telles relations dose-réponse existent pour la plupart des substances polluantes. Le projet européen ExternE qui visait à définir une méthodologie d'évaluation des impacts (externalités) de la production d'énergie (méthodologie révisée en 2005), propose un état de l'art très exhaustif des impacts sanitaires et des fonctions dose-réponse pour la plupart des polluants et affections. Cette source de données pourra être complétée d'autres travaux réalisés plus récemment dans le cadre d'un groupe de travail piloté par l'ANSES (polluants à prendre en compte dans les études d'impacts des projets d'infrastructures routières). Un état des lieux de ces différentes sources devra être établi. Plutôt qu'une prise en compte large des substances polluantes, on pourra se focaliser sur certains enjeux actuels (pollution au NO₂, particules, certains COV) ou spécifiques au contexte d'aménagement (cf. par exemple les travaux du projet de recherche Prequalif en Île-de-France, par Vincent Nedellec, sur les bénéfices sanitaires d'une zone de restriction de circulation en territoire urbain).

Enfin, on peut mentionner le développement d'un indicateur d'impact sanitaire lié à la pollution de l'air IISCEP, construit à partir des informations de toxicité des différents polluants (automobiles) et tenant compte des configurations d'exposition (tissu urbain, topographie, etc.) au travers de quelques paramètres simples (Lépicier et al. 2013), déjà mentionné dans le cadre du projet Eval-PDU.

2.2. Bruit environnemental, phénomènes et outils d'évaluation

Les travaux de l'ANSES (Muzet et al. 2012) ont dressé un état de l'art très détaillé sur le bruit et ses conséquences sur la santé auquel on se reportera pour plus de détail. Nous ne reprenons ici que les principaux enseignements de ces travaux en lien avec la problématique de l'évaluation des effets du bruit lié au trafic et de l'évaluation de mesures de réduction.

2.2.1. Les multiples dimensions du bruit

Selon l'ANSES, le bruit est un phénomène complexe qui comporte des dimensions physique, physiologique et psychosociologique, voire territoriale.

Du point de vue physiologique, le bruit est une onde sonore qui fait vibrer le tympan. Cette vibration se propage à l'oreille interne où elle est transformée en signal nerveux qui est transmis au cortex où il sera interprété.

Afin d'évaluer quantitativement l'ensemble des phénomènes physiques liés à l'émission du bruit, divers indices peuvent être mesurés ou calculés, les plus utilisés dans la réglementation ou la littérature étant des indices énergétiques moyens. Mais ces indices permettent difficilement de rendre compte de la gêne occasionnée aux riverains des grandes infrastructures de transport, notamment lorsqu'il s'agit d'émergences sonores. Des indices évènementiels sembleraient pour cela mieux adaptés.

L'impact psychosociologique du bruit dépend à la fois des caractéristiques des personnes exposées (statut social, valeurs, *etc.*) et du sens qu'elles donnent au bruit. Un son devient bruit en conséquence d'appréciations individuelles, de jugements portés sur son origine, sur ses responsables supposés. Mais le fait que le bruit soit l'objet d'une construction psychosociale n'en amoindrit pas pour autant la réalité de son impact sur la qualité de vie et la santé.

La théorie du stress a été mise à profit pour caractériser la gêne, sa génération, son évolution. La gêne est ainsi une réaction globale (résultat d'appréciations cognitives) dépendant de facteurs acoustiques (dont le niveau sonore), mais aussi, de facteurs sociaux, de contexte et de facteurs individuels (sociodémographiques et d'attitude). Une approche territorialisée des phénomènes en cause permettrait de saisir cette réaction globale.

Concernant les mécanismes et déterminants de la gêne, les connaissances de la neuropsychoneuroendocrinologie du stress ont permis d'élaborer des bases de compréhension de l'évolution possible de la gêne, en fonction de l'aptitude de chaque individu à s'adapter ou faire face à l'agression qu'est le bruit.

2.2.2. Bruit lié aux transports

Alors que la pollution atmosphérique est principalement liée au trafic routier, le bruit concerne plus largement les différents modes de transport, et principalement à proximité des infrastructures.

Le bruit des transports terrestres est influencé à la fois par des paramètres liés aux matériels roulants (motorisation, cinématique, affectation des véhicules dans le cas des poids lourds, comportement de conduite, bruit aérodynamique dans le cas des trains à grande vitesse, *etc.*) et par des paramètres liés à l'infrastructure (nature du revêtement et aménagement de la voirie dans le cas du bruit routier, nature de la plate-forme, géométrie de la voie et état des rails dans le cas du bruit ferroviaire, *etc.*). La contribution de chacune de ces sources au bruit total engendré (*in fine* au niveau de bruit perçu) varie le plus souvent en fonction de la vitesse du véhicule.

S'agissant du transport aérien, le bruit perçu au sol dépend essentiellement de la nature de l'aéronef (aviation civile, militaire, de tourisme ou hélicoptère) et de la phase de roulage et de vol considérée (essentiellement décollage et atterrissage).

2.2.3. Des sources de bruit aux effets extra-auditifs et sanitaires

Les effets du bruit du trafic sur l'homme sont liés aux différentes sources d'émission, aux niveaux de bruits ambiants qui en découlent (et qui peuvent d'ailleurs dépendre d'autres sources non liées aux transports), et à l'exposition des populations à ces niveaux de bruit. En France, la proportion de la population exposée à des niveaux de bruit exprimés en Lden dépassant 55 dBA est d'environ 40 % dont 75 % au bruit du trafic routier, 18 % au bruit du trafic ferroviaire et 6 % au bruit du trafic aérien (ces derniers étant principalement localisés en région parisienne).

Les risques de pertes auditives (effets auditifs) ne se rencontrent que très rarement dans le cadre des expositions environnementales liées aux infrastructures de transport, qui induisent plutôt d'une part des effets physiologiques extra-auditifs, et d'autre part des effets psychosociaux.

Le principal effet extra-auditif du bruit est la perturbation du sommeil, même à des niveaux sonores bas (difficulté d'endormissement, réveils, altération de la qualité du sommeil), qui peut avoir des répercussions sur la santé, les performances cognitives, ou certaines fonctions végétatives. D'autres effets (cardiovasculaires, endocriniens, maladies mentales) ont été mis en évidence et dépendent du niveau et de la durée de l'exposition au bruit mais aussi des caractéristiques et de la sensibilité individuelles des personnes exposées.

Les effets psychosociologiques et comportementaux incluent l'inconfort ou à la gêne, qu'il est cependant difficile de lier uniquement aux niveaux d'exposition au bruit. Des relations « dose-réponse » ont cependant été établies entre niveaux d'exposition au bruit (notamment de transport) et gêne individuelle (European Commission 2002). D'autres effets ou perturbations sont cités, tels que les interférences avec la communication, les effets sur les attitudes et comportements (troubles du comportement), les performances (apprentissage scolaires) ou l'automédication (somnifères, anxiolytiques).

On notera enfin les effets socio-économiques du bruit sur les territoires (décotes

immobilières, déqualification territoriale, modification des choix résidentiels des ménages, etc.).

2.2.4. Outils / méthodes d'évaluation

Les outils et méthodes d'évaluation du bruit émis dans l'environnement disponibles à ce jour conduisent essentiellement à la production de cartes de bruit et satisfont à la réglementation en vigueur en France et en Europe, s'agissant dans ce dernier cas de l'application de la Directive n°2002/49/CE.

Concernant le **bruit routier**, cette dernière se subdivise en deux familles de texte : l'une relative aux nouvelles infrastructures ou faisant l'objet d'une modification, l'autre concernant les bâtiments à construire en bordure d'infrastructures existantes. Dans le premier cas, le principe d'antériorité s'applique : la contribution sonore en façade de bâtiments antérieurs au projet ne peut excéder des seuils déterminés pour chacune des deux périodes diurne (6h à 22h) et nocturne (22h à 6h) définie par la réglementation (avec obligation de résultat pour le maître d'ouvrage). Les indicateurs utilisés sont des niveaux sonores équivalents (L_{Aeq}) mesurés sur les périodes indiquées ci-dessus. Pour la protection des nouveaux bâtiments, la démarche s'effectue en deux étapes : un recensement des infrastructures de transports terrestres est effectué, suivi d'un classement en fonction des niveaux d'émission sonore qui déterminera l'isolement acoustique de façade minimal qui devra être appliqué.

S'agissant du **bruit ferroviaire**, la réglementation en vigueur issue de la loi « Bruit » de 1992 suit les mêmes principes celle relative aux infrastructures routières, aux nuances suivantes près :

- un indicateur spécifique au bruit ferroviaire est utilisé, incluant un terme correcteur afin de pouvoir établir des comparaisons avec les pays voisins (en particulier l'Allemagne) qui ont une réglementation en champ libre
- des exigences identiques aux infrastructures routières pour les lignes à grande vitesse
- un bonus ferroviaire de 3 dBA pour les lignes classiques.

Enfin, s'agissant du **transport aérien**, des cartes de bruit basées sur des courbes isophoniques sont tracées à l'aide du modèle Integrated Noise Model (INM) développé par la Federal Aviation Administration (FAA – équivalent américain de la DGAC). Ces cartes de bruit permettent :

- de maîtriser l'urbanisme autour des aéroports, notamment par l'établissement de plans d'exposition au bruit (PEB) basés sur l'indicateur composite L_{den}
- de déterminer les zones ouvrant droit à l'insonorisation des bâtiments autour des douze plus grands aéroports français. Trois zones (gêne très forte, forte et modérée) sont définies, basées également sur l'indicateur L_{den}
- d'évaluer annuellement l'évolution de l'impact sonore.

Le L_{den} (retenu par la Commission européenne pour traduire la gêne pour l'ensemble des modes de transport en Europe) est représentatif.

Il est à noter qu'un certain nombre d'aéroports nationaux ont mis en place des indicateurs complémentaires non réglementaires :

- le LA_{max} (niveau maximal mesuré lors d'un événement sonore),
- le nombre d'évènements dépassant un seuil acoustique (l'ACNUSA⁸ recommande d'utiliser cet indicateur avec une valeur seuil de 65 dBA pour 100 évènements ou une valeur de 62 dBA pour 200 évènements),
- le niveau d'exposition sonore SEL.
- La densité de survols : cet indicateur, directement compréhensible par le grand public, correspond au nombre moyen de survols.

La réglementation concernant les **activités bruyantes** (bruit de voisinage) met en avant un zonage de l'espace urbain ou rural, avec définition de seuils et de la notion d'émergence spectrale. Contrairement aux cas des infrastructures routières, la réglementation en matière de bruit de voisinage ne reconnaît pas la notion d'antériorité.

Enfin, concernant les **installations classées** pour la protection de l'environnement, la réglementation définit la notion de zone à émergence réglementée (ZER), avec des seuils de bruit admissibles en limite de propriété basés sur des niveaux équivalents diurne et nocturne.

Du point de vue de l'impact sanitaire du bruit, le constat est établi que les indicateurs acoustiques mentionnés ci-dessus sont insuffisants. En effet, les indicateurs acoustiques intégrés qui décrivent une exposition sonore moyenne ne permettent pas de décrire deux situations identiques (du point de vue du niveau sonore moyen) mais différentes du point de vue événementiel. Ce qui revient à dire que les indicateurs acoustiques intégrés ne traduisent pas la gêne ressentie ni les autres effets extra-auditifs du bruit. C'est ce constat qui a conduit l'ANSES à mener les travaux qui sont à l'origine de la méthodologie décrite ci-après (cf. section 3.3.3)

⁸ Autorité de Contrôle des Nuisances Aééroportuaires

3. Méthodologies d'évaluation, éléments

Dans ce chapitre, nous proposons de tirer parti des différents apports méthodologiques dérivés des travaux décrits précédemment, ainsi que des retours d'expérience de ces projets ou de la mise en œuvre des approches qu'ils ont permis de développer.

Ces apports sont considérables, et il conviendra d'en tenir compte dans une réflexion globale sur l'évaluation. Ce chapitre n'a pas l'ambition de clore cette réflexion, mais tente en tous cas de l'esquisser en récapitulant ces différents apports.

3.1. Modélisation des impacts des déplacements et trafics

L'évaluation la plus fiable est celle qui reposerait sur l'observation (enquêtes sur les comportements, mesures de trafic, mesures des concentrations de polluants, des niveaux de bruit). Cette évaluation par l'observation est nécessaire au suivi de la mise en œuvre des politiques de transports et diverses actions à évaluer, mais malheureusement elle ne peut intervenir qu'*a posteriori* (et en cours de mise en œuvre) et ne permet pas en conséquence d'anticiper les effets d'une mesure, ni d'optimiser différentes actions pour une plus grande efficacité.

La modélisation offre un cadre approprié d'évaluation a priori d'un système à étudier, et de production de divers indicateurs quantitatifs - notamment environnementaux -, pourvu que les différents phénomènes entrant en jeu dans le système puissent eux-mêmes être mis en équations ou décrits par des modèles élémentaires. Les enjeux de la modélisation résident donc autant dans le développement des modèles élémentaires que dans leur couplage et leur utilisation conjointe sous différentes hypothèses à tester, tout en s'assurant de rester dans les domaines de validité des différents modèles.

Dans le cas particulier de l'évaluation des impacts du trafic sur la pollution de l'air et le bruit, et de l'évaluation de mesures de réduction et politiques publiques telles que les PDU, un ensemble de modèles est nécessaire à appréhender et analyser les mobilités, déplacements et trafics dans l'agglomération selon la répartition des populations, lieux d'activité, réseaux et moyens de transport existants. C'est à partir de cette estimation des déplacements et du trafic automobile, que d'autres modèles sont mis en œuvre pour déterminer les émissions de polluants par les véhicules et suivre leur dispersion dans l'atmosphère et leur répartition dans l'agglomération, ou simuler le bruit généré par le trafic et sa diffusion dans la ville. La répartition des nuisances et conjointement la localisation des populations doivent permettre in fine d'évaluer les impacts sur les populations.

Ce dernier point - et le caractère éminemment local de certaines « pollutions » (bruit, ou pollutions très localisées à proximité des sources) - renvoie à une problématique forte de

spatialisation fine des résultats des modèles, - des déplacements aux impacts -, qui pourrait bien constituer l'un des enjeux majeurs de l'évaluation, car de nombreuses incertitudes affectent la répartition spatiale notamment des trafics.

L'empilement de ces modèles demeure actuellement assez empirique, et l'expérience a montré que la seule mise en œuvre des outils est susceptible d'améliorations significatives, par une documentation plus explicite des principes des modèles, de leurs hypothèses sous-jacentes ou implicites et données intrinsèques, et enfin des données d'entrée et de sortie qui constituent l'interface des différents outils.

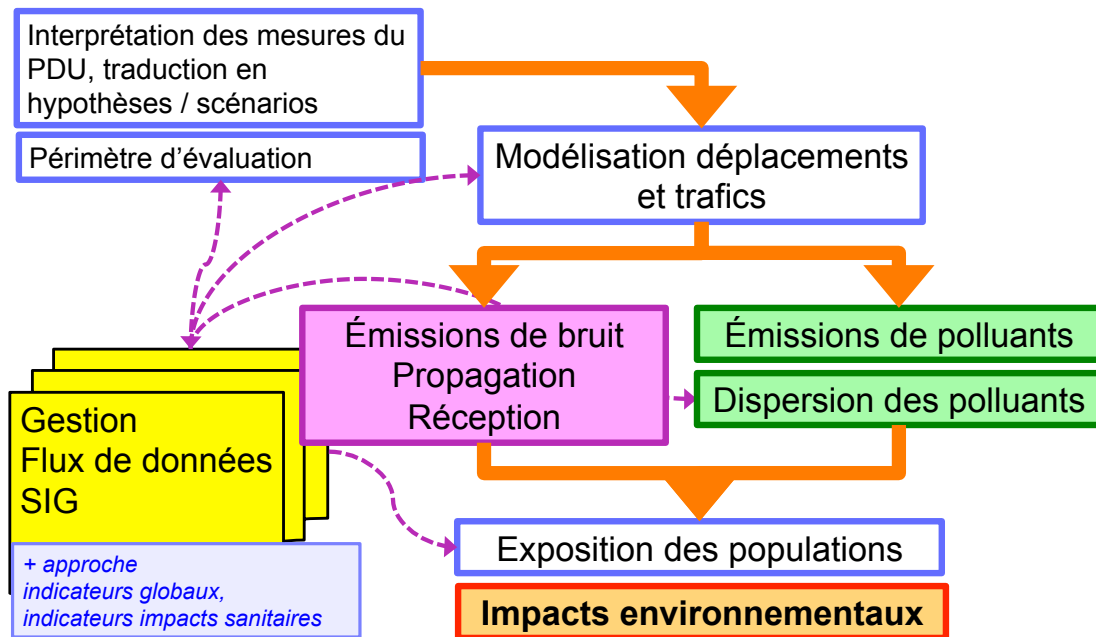


Figure 8 : Synoptique de l'approche d'évaluation par scénarios et modélisation des déplacements, trafics, pollution de l'air et bruit, développé et mis en œuvre dans le cadre du projet ANR Eval-PDU

3.1.1. Approche par scénarios

L'évaluation de mesures complexes à échelle d'agglomération procède généralement par scénarios qu'il convient d'explicitier correctement et en accord avec les objectifs visés. Cet aspect a été considéré avec attention dans le cadre du projet ANR Eval-PDU, et la méthodologie globale élaborée considère tout d'abord la formulation et les principes d'élaboration des scénarios pour l'évaluation de PDU par la modélisation (Livrable L1.1 du projet). Un état de l'art des méthodologies d'évaluation très complet conduit ainsi à l'élaboration d'une méthodologie générale d'élaboration de scénarios, structurée autour de trois composantes :

- des scénarios généraux, centrés sur les hypothèses fortes (choix des actions étudiées, évolutions structurantes des réseaux, etc.), basés sur des analyses amont (analyse de la logique d'intervention, etc.) et définis avec une concertation étroite entre le comité de pilotage (représentant les acteurs) et l'équipe d'évaluation (modélisateurs).

- des micro-scénarios, centrés sur la spécification des modélisations (sélection des paramètres, hypothèses sur leurs évolutions, etc.), basés principalement sur l'expertise de l'équipe d'évaluation mais intégrant aussi les analyses amont, et définis avec une concertation forte entre les partenaires de l'équipe d'évaluation.
- le couplage des deux par la sélection d'indicateurs clés (notamment pour la restitution des résultats) et un travail de traduction des actions étudiées en jeux de données et hypothèses des modélisations.

L'objectif principal des scénarios sera généralement de quantifier des impacts différentiels entre une action à tester et un scénario de référence. Dans le cadre du projet Eval-PDU, les scénarios ont été élaborés à partir des éléments clés du PDU (ou groupes d'actions, ou alternatives).

Le retour d'expérience de ces travaux a montré par contre que de nombreux scénarios peuvent être insatisfaisants par les limites des modèles à prendre en compte certains aspects : typiquement les modes doux, le covoiturage, l'autopartage, le e-commerce ne sont pas (ou mal) pris en compte dans les modèles classiques de déplacements alors qu'ils constituent des voies innovantes pour lesquels des éléments d'évaluation sont attendus ; de même les mesures complexes (ligne de transport en commun + parc-relais) ou de type Plan de déplacement d'entreprise (convergence de différentes actions) sont très difficiles à modéliser. De fait, les scénarios sont le plus souvent conçus en fonctions des capacités des modélisations, et certaines de ces actions ne pourront en conséquence pas être prises en compte, ou dans le meilleur des cas, elles le seront sous forme d'hypothèses simplificatrices (par exemple le covoiturage peut être approché par une évolution du taux de remplissage des véhicules).

L'élaboration des scénarios se heurte par ailleurs à certains points critiques :

- la clarification des objectifs (très souvent qualitatifs ou sous forme d'hypothèses grossières, par exemple « des gains en économie d'énergie de 20% par évolution des comportements »), du champ (la mobilité des résidents, ou l'ensemble des mobilités incluant le transit et les marchandises), du périmètre (l'agglomération s'étend), et horizon(s) temporel(s) de l'évaluation (une politique de type PDU se déploie d'ailleurs dans le temps et nécessite d'être évaluée en dynamique),
- on notera les difficultés particulières liées aux scénarios « prospectifs », à échéance de quelques dizaines d'années, pour lesquels l'évolution des contextes économique et social, énergétique, écologique, technologique, réglementaire, du périmètre urbain, des comportements de mobilités mais aussi écologiques, etc. sont autant d'hypothèses impactant fortement les scénarios et qu'il est malheureusement difficile voire impossible de poser. Le plus souvent les scénarios supposeront une constance de nombreux de ces paramètres, ce qui est sans doute très éloigné de la réalité.
- la définition d'un référentiel et des indicateurs,
- la nécessité d'intégrer l'évolution des comportements et des pratiques, notamment en regard de questions complexes comme le développement de l'intermodalité, de nouvelles politiques de stationnement, de nouvelles pratiques de mobilités (comme le covoiturage ou l'auto-partage), le management de la mobilité, etc.,

- la disponibilité de données et/ou de retours d'expérience qui permettent de spécifier les hypothèses des scénarios sur ces différents aspects, et notamment des données associées aux comportements de mobilité et à leur évolution.

Dans Eval-PDU, on a distingué des scénarios de référence (années 2002 et 2008), des scénarios alternatifs globaux (correspondant à différentes évolutions du PDU), et par ailleurs des tests de sensibilité des modèles à certains paramètres (coût carburant, etc.). Cette approche de sensibilité s'avère particulièrement utile pour mettre en évidence l'influence faible ou forte de certains paramètres des scénarios, et pour sonder rapidement (sans scénarios robustes) la plausibilité ou l'enjeu de certaines actions.

3.1.2. Déplacements et trafic

La modélisation des déplacements et du trafic routier est première et alimente les calculs d'émissions de polluants, GES et de bruit et de leurs impacts. Elle doit faire face à différentes exigences :

- fournir des données conformes aux modèles « aval », (nature et de finesse) ;
- traiter correctement les paramètres impactant les nuisances (quantités de déplacements, répartition selon les modes de transport, détermination des itinéraires, spatialisation des trafics, vitesses de circulation, etc.) ;
- le calage des paramètres doit permettre une sensibilité réaliste du modèle (par exemple l'incidence du coût du carburant sur les choix de destinations, des itinéraires, des modes de transport, l'incidence d'une vitesse limite sur les vitesses réelles, etc.);
- disposer de données observées suffisantes pour tenir compte de la complexité des phénomènes, notamment les comportements individuels (compromis entre une sophistication de la modélisation et sa validité par l'observation), et de leur évolution dans une approche prospective.

3.1.2.1. Modélisation à échelle d'agglomération

Dans le cadre Eval-PDU, c'est une approche classique par modélisation macroscopique (trafics horaires, réseau simplifié en tronçons de voies) à échelle d'agglomération qui a été mise en œuvre. Dans ce type d'approche, le territoire est modélisé en zones (zones IRIS dans le périmètre d'étude et communes dans le reste du département), représentant les points d'origine et de destination des trajets. La demande de déplacements, selon 4 périodes horaires d'un jour ouvrable (pointes, jour, nuit), s'exprime sous forme de flux de personnes entre ces zones, estimés à partir des données démographiques et économiques (INSEE), des enquêtes ménages-déplacements (mobilité des résidents), et de l'offre de transport qui conditionne aussi la structuration de la demande.

La population a été découpée en 18 segments (actifs motorisés, non motorisés, inactifs, étudiants, etc.) et les déplacements sont analysés selon 8 motifs (domicile, travail, commerce, loisir, etc.) et groupés en chaînes de 2 à 20 déplacements et boucles au domicile.

Un algorithme de type gravitaire s'appuyant sur des coûts généralisés (temps + coûts)

transforme la demande de déplacements en flux (tous modes) de zone à zone (des flux élevés étant observés entre une zone à forte émission pour un motif et une zone à fort potentiel d'attraction pour ce motif). Le modèle doit être calé sur une situation de référence (56 paramètres sur les parts modales d'une enquête ménages-déplacements).

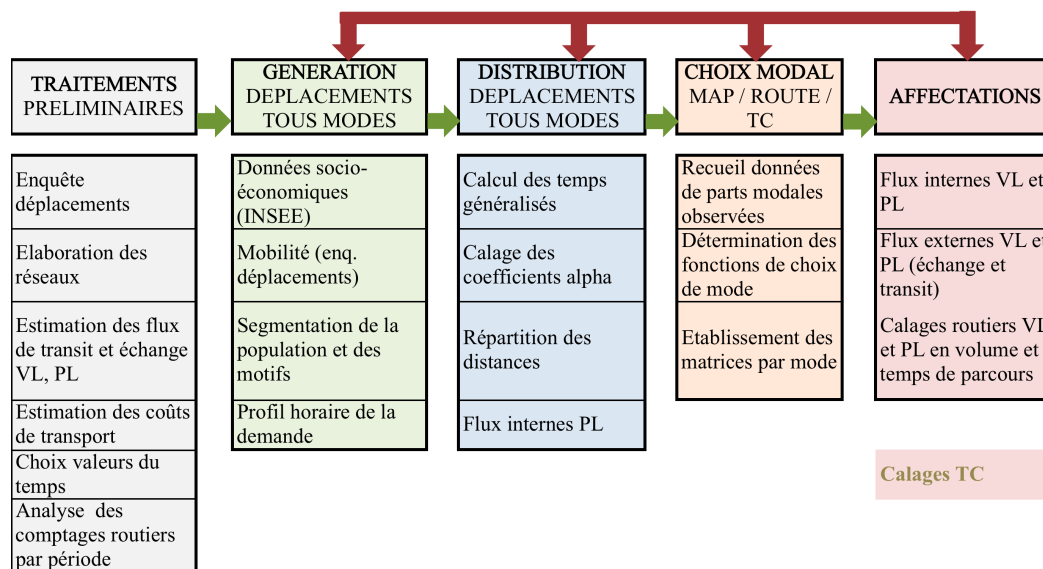


Figure 9 : Approche de la modélisation des déplacements et trafics (modèle VISEM - VISUM), utilisée dans le projet ANR Eval-PDU

Un modèle multimodal a été mis en œuvre sur le réseau routier structurant et les dessertes en transports en commun. Un modèle statique à contrainte de capacité prend en compte les phénomènes de congestion routière et les problématiques d'itinéraires. Le trafic local (réseau non modélisé) est établi forfaitairement.

Après séparation des trafics de transit, des trafics d'échanges entre zones, détermination de la demande PL, prise en compte de l'intermodalité TER et P+R (parcs relais) et des trafics locaux, la confrontation finale de l'offre (réseaux) et de la demande (40 matrices routières par situation) se traduit par les choix de modes de transport et d'itinéraires.

La dernière étape (calage) consiste rapprocher les trafics estimés et les mesures des points de comptage, pour chacune des périodes de simulation, les PL et les VL, et les sections les plus saturées (grande sensibilité à la demande). Un ajustement des paramètres de génération et de distribution peut être nécessaire si les écarts sont trop importants.

L'intérêt d'une telle approche réside dans sa capacité d'analyse sur un large territoire d'une demande de mobilité en regard d'une offre de transports (incluant routier, ferroviaire et circulation de transit), sur des réseaux complexes, et sous contrainte de scénarios multiples (pourvu qu'ils ne soient pas rupture avec les principes et hypothèses sous-tendues par les modèles). Elle permet la simulation de l'effet d'un aménagement, d'une réponse multimodale (piétons, VP, TC : train, bus, tram), la prise en compte des comportements de mobilité et

choix modaux (par le biais des informations tirées des enquêtes de mobilité), des temps et coûts de transport, la simulation des trafics aux heures de pointe / heures creuses, jour moyen, sur chaque section de voie (ainsi qu'une estimation des flux intrazonaux), et produit des volumes de trafic, vitesses de circulation, etc.

Le retour d'expérience du projet Eval-PDU a permis cependant d'identifier certaines difficultés et points critiques :

- Liés aux modèles : Modélisation partielle du réseau, absence de rétroaction de l'offre de transport sur la demande (mobilité et trafic induits, représentation insuffisante de la congestion, du stationnement, insuffisance de représentation de l'intermodalité,
- Liés à la disponibilité des données :
 - o la prise en compte imparfaite des trafics des non-résidents, d'échange et de transit, et de ceux liés aux transports de marchandises en ville,
 - o la non-représentation dans les simulations des déplacements en vélos, du covoiturage et de l'accompagnement, la description temporelle limitée (Heures pointe / creuse, jour moyen),
 - o des données comportementales fragiles et sensibles (mobilité, valeurs du temps, choix modaux) et leur évolution sous différents contextes (intermodalité, P+R, politiques de stationnement, sensibilisation, etc.)
- Une validation très partielle de la chaîne de modèles et de sa calibration, par des distributions de trafic en certains points et des temps de parcours sur quelques itinéraires.

3.1.2.2. Modélisation plus fine des trafic

La modélisation macroscopique statique horaire ne permet pas de rendre compte de phénomènes locaux (congestion, interactions entre véhicules, etc.) et l'estimation des nuisances à échelle fine et locale serait en conséquence assez peu pertinente sauf si elle est peu ou pas sensible à ces phénomènes.

Les travaux menés dans les cadres Ville Numérique ont montré la faisabilité d'articulation de modèles dynamiques de simulation du trafic à échelle microscopique avec des modèles d'émission et propagation acoustiques ou d'émissions de polluants.

Cependant, concernant la pollution atmosphérique, les modèles d'émissions et au-delà de dispersion / transport de polluants ne sont clairement pas appropriés ni validés à ces échelles fines, et l'utilisation de chaînes de modèles pour des analyses très locales doit être entourée de prudence en particulier pour l'interprétation des résultats. Les travaux en cours du projet ANR Trafipollu permettront de faire progresser ces modèles et leur articulation avec les modèles de trafic à différentes échelles.

Ces modélisations fines ne répondent bien sûr pas aux mêmes objectifs que les modélisations macroscopiques évoquées précédemment. Elles doivent être plutôt réservées à la simulation de scénarios très locaux (aménagement local d'une intersection, baisse d'une

vitesse limite) plutôt que de mesures structurant les déplacements et le trafic à échelle d'agglomération (ligne de tramway, etc.).

3.1.3. Autres aspects : états initiaux, échelles, données

Comme cela a été observé précédemment et dans les travaux récapitulés au Chapitre 1, l'évaluation nécessite de définir une situation de référence (état initial) qui permet de quantifier les gains ou l'évolution sous un scénario donné, ces gains étant quelquefois exprimés en valeur absolue ou en relatif, mais par rapport à cette situation de référence.

Pour l'évaluation des impacts sanitaires de la pollution de l'air - cette connaissance de l'état initial entre directement dans la quantification des effets : ainsi les concentrations de fond déterminent un niveau de pollution ou de nuisances qui peut déjà excéder des niveaux réglementaires ou être cause d'effets sanitaires. Il peut s'agir dans ces cas de nuisances liées à d'autres sources d'émission que le trafic (industrie, chauffage, etc.), de sources hors le territoire considéré, ou même d'apports régionaux ou continentaux. Cette pollution initiale peut par ailleurs être liée au contexte (topographie, climat). Les gains potentiels liés à une mesure de réduction de la pollution du trafic dépendront de plus de cet état initial (au-dessus ou en dessous de certains seuils, des réductions d'émissions pourront ainsi être quasiment sans effets notables sur l'impact sanitaire). L'état initial est alors plus un diagnostic qui nécessite d'être évalué précisément et dans l'absolu.

Comme cela a été illustré au cas de la modélisation des déplacements, la question de l'échelle d'évaluation est également importante, et les modèles et chaînes de modèles doivent être appropriés aux échelles d'analyse. Ainsi il a été démontré dans le projet Eval-PDU que des scénarios à forte portée (hausse de la demande de 20%) pouvaient se traduire par des effets quantifiables à l'échelle de l'agglomération, mais à l'inverse, des opérations même aussi significatives que la mise en service d'une voie forte de transports en commun en site réservé se traduit par des effets locaux significatifs (induits par la suppression d'une voie, l'offre de TC, etc.), mais que ces effets restent insignifiants à l'échelle de l'agglomération. Le choix de l'échelle d'évaluation est donc primordial.

Enfin, la disponibilité de données notamment comportementales est un point critique de la modélisation, que ce soit au niveau des mobilités, comme au niveau des expositions et impacts.

3.2. Evaluation de la pollution de l'air due au trafic

3.2.1. Problématique

En pratique, l'évaluation de la pollution de l'air et des impacts sanitaires liés au trafic, ou l'évaluation de mesures visant à en limiter les effets, requièrent *in fine* la connaissance des concentrations de polluants et des populations exposées à ces concentrations, ainsi que les relations entre exposition et risques sanitaires (relations dose-réponse par exemple). Cela

implique en particulier la localisation et répartition temporelle des populations et de leurs activités, mais également la localisation et répartition des sources d'émissions et notamment des trafics. On notera que l'évaluation des impacts climatiques est moins exigeante en première approche, puisqu'elle repose sur le seul cumul d'émissions de gaz à effet de serre, sans préoccupation de répartition spatio-temporelle.

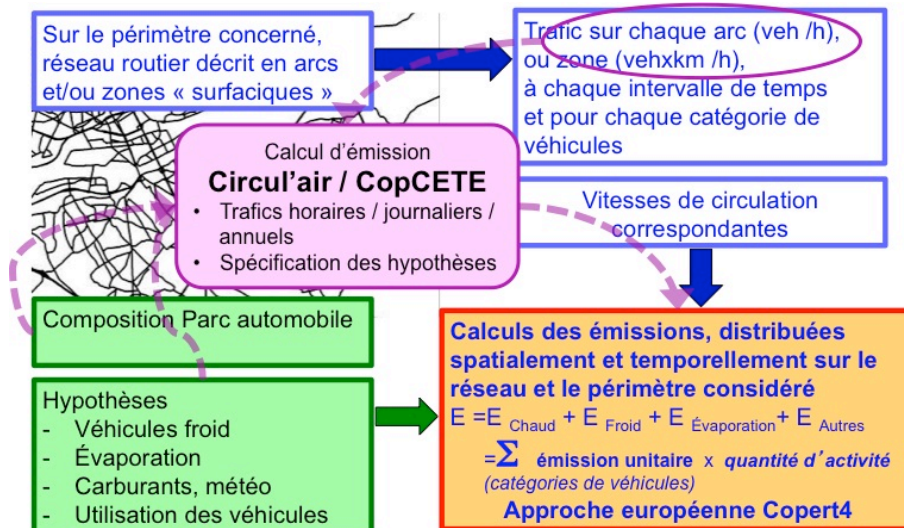


Figure 10 : Étape de calcul des émissions de polluants à partir de la modélisation des déplacements et trafics sur le réseau routier modélisé (projet ANR Eval-PDU)

Plus précisément, l'évaluation devrait consister en la quantification (dénombrement) et localisation de personnes exposées à concentrations accrues ou excessives. On notera qu'il y aurait lieu d'exprimer ces impacts relativement à une population (en évolution), voire à un service rendu de transport ou un niveau d'accessibilité donné (ceux-ci étant également éventuellement impactés par des mesures de limitation de la pollution de l'air du trafic). On ne devrait en tous cas pas exprimer ces impacts selon le seul volume de trafic (véhicules x km, passagers ou tonnes x km) qui ne constitue pas une fin en soit, mais plutôt la conséquence de politiques d'aménagement et de transports.

A défaut d'approche suffisante des expositions et activités des populations, on considère souvent les lieux d'habitats et les concentrations de polluants qui affectent théoriquement leurs résidents. Des évaluations encore plus frustrées n'envisagent que les quantités d'émissions (liées au trafic), voire les quantités de trafic et leur répartition modale (voiture, modes doux, transports collectifs), comme indicateurs d'une politique environnementale.

3.2.2. Polluants, voies d'exposition

Alors qu'on dénombre plusieurs centaines de substances polluantes liées au trafic, et différentes voies d'exposition (respiratoire, orale, cutanée, aigüe ou chronique), les travaux de l'ANSES ont permis d'identifier les polluants d'intérêt et les voies d'exposition à considérer, par leur enjeu sanitaire avéré et hiérarchisé. Au-delà de cette identification, c'est une

approche qui est proposée et qui permettra le cas échéant de questionner cette sélection, compte tenu de l'évolution des technologies et des connaissances.

Ce travail préliminaire est fondamental et doit être considéré en amont de la mise en œuvre des outils. Cependant il faut constater que les polluants identifiés sont ceux pour lesquels les connaissances sont les plus fragiles. Il y a en conséquence une nécessité d'améliorer les connaissances et les outils en se focalisant sur ces enjeux.

3.2.3. Émissions de polluants

Globalement la problématique d'estimation des émissions de polluants du trafic (dans le cas de politiques de déplacements par exemple) peut se décliner en différentes questions :

- Questions liées à la détermination des émissions de polluants : le calcul d'émission nécessite la connaissance détaillée du parc automobile en circulation, des vitesses de circulation et de leur variabilité (en chaque période et lieu du réseau et selon les catégories de véhicule), et diverses hypothèses (propriétés carburants, chargement des poids-lourds). Plusieurs limites sont associées aux phénomènes d'émission mal appréhendés, aux incertitudes (connaissances inégales) affectant les différents polluants et phénomènes, au recours à des données par défaut nationales (à défaut de données locales) risquant d'affecter les analyses.
- Questions liées à la simulation des déplacements et du trafic : elles sont principalement de quantification et répartition spatiale et temporelle suffisamment précises pour appréhender ultérieurement des impacts sanitaires localisés (répartition des pollutions et des populations), de prise en compte des trafics locaux, de transit, des véhicules légers dans leur diversité, des camions et autobus (et des modes non routiers comme le tramway, le métro, etc.), de simulation précise des conditions de circulation (vitesses) en accord avec ce qui est attendu par les calculs d'émission,
- Questions liées au couplage des modèles (trafic, émission, concentrations) en terme d'échelles et d'interface et de domaine de validité, et en lien avec les objectifs, les indicateurs et l'échelle de l'évaluation (globale ou locale),
- Questions relatives au cas à évaluer : et notamment la capacité de l'approche à traduire des mesures de réduction de la pollution de l'air apparemment simples (par exemple passage de bus au gaz, voie piétonne ou cyclable, etc.) ou complexes (par exemple ligne de bus et parking relais, fiscalité, incitation, restriction d'accès, etc.), à la transcription de ces mesures en scénarios (traduction des hypothèses, contextes, termes),
- Questions liées à l'évaluation a priori ou prospective : et notamment la prise en compte de l'évolution du parc automobile (renouvellement, évolution technologique), de l'évolution du contexte (démographie, urbanisation et extension de l'agglomération, trafic induit par l'offre de transports ou d'infrastructures, aménagements locaux ne s'inscrivant pas dans les scénarios) et surtout la difficile appréhension des changements de comportements (mobilité, achats, conscience écologique).

L'état de l'art et des études de sensibilité réalisées dans les différents projets (Eval-PDU, Za-ParC) ont permis d'identifier plusieurs faiblesses :

- les phénomènes de remise en suspension de particules par le trafic, abrasion, etc. ne sont pas pris en compte, alors que leur influence pourrait être significative,
- la qualité de la modélisation est très inégale selon les phénomènes et selon les polluants (ceux à enjeu sanitaire n'étant pas les mieux connus), et la forte variabilité des émissions selon les véhicules suggère que l'incertitude des calculs peut être élevée.

L'application des calculs à l'échelle d'une agglomération pose également quelques difficultés :

- les émissions sont très sensibles à la composition du parc automobile et cependant on ne dispose pas de connaissance précise des parcs locaux,
- les vitesses de circulation au pas horaire dérivées des modèles statiques minimisent la variabilité des vitesses et sous-estiment la congestion et les émissions en conséquence,
- l'affectation spatiale des émissions est également problématique (approximation liée au modèle gravitaire, à la composition des parcs, et à l'affectation très approximative des émissions de démarrage et par évaporation de carburant).

Les calculs d'émissions (méthodologie européenne COPERT4 COmputer Program to calculate Emissions from Road Transport, mise en œuvre dans les outils logiciels Circul'Air27 et CopCETE) montrent que le centre-ville, l'heure de pointe ou encore les voitures particulières ne représentent pas l'essentiel des quantités d'émission. Les véhicules utilitaires légers et camions et bus, relativement mal appréhendés par les modèles constituent un enjeu, de même que les surémissions de démarrage à froid. Une grande part d'incertitude affecte les émissions de particules.

En conclusion, des progrès sont nécessaires et attendus au niveau des modèles d'émission, de leur articulation avec les modèles de simulation des déplacements et trafics, et de leur utilisation en vue de la quantification des impacts sanitaires.

3.2.4. Impact sur la qualité de l'air

Le modèle gaussien ADMS Urban testé dans le cadre Eval-PDU a démontré sa capacité à reproduire les niveaux en dioxyde d'azote, particules et benzène, en milieu urbain, à des échelles allant de la rue à l'agglomération et de l'heure à l'année, et en intégrant les émissions des différentes sources routières, industrielles et domestiques, les paramètres météorologiques et la pollution de fond. Cet outil permet l'analyse de situations particulières telles que rues ouvertes et bordées de bâtiments, rues canyon (module OSPM), et intègre quelques transformations physico-chimiques (module GRS).

Un maillage régulier d'une résolution de 250 m a été considéré sur l'ensemble du domaine, pour rendre compte des concentrations de polluants dans les zones éloignées des principaux émetteurs tout en limitant le nombre de points de calculs (environ 10 000). Un maillage

irrégulier est ajouté pour tenir compte des axes routiers (transect en quatre points à une distance de 0.45 et 2 fois la largeur de la voie, espacement entre transects de 70 m environ et adapté aux particularités du réseau). Environ 50 000 points sont ainsi ajoutés (densité de 112 points / km² en moyenne, 200 dans le centre-ville). L'interpolation cartographique est réalisée par triangulation.

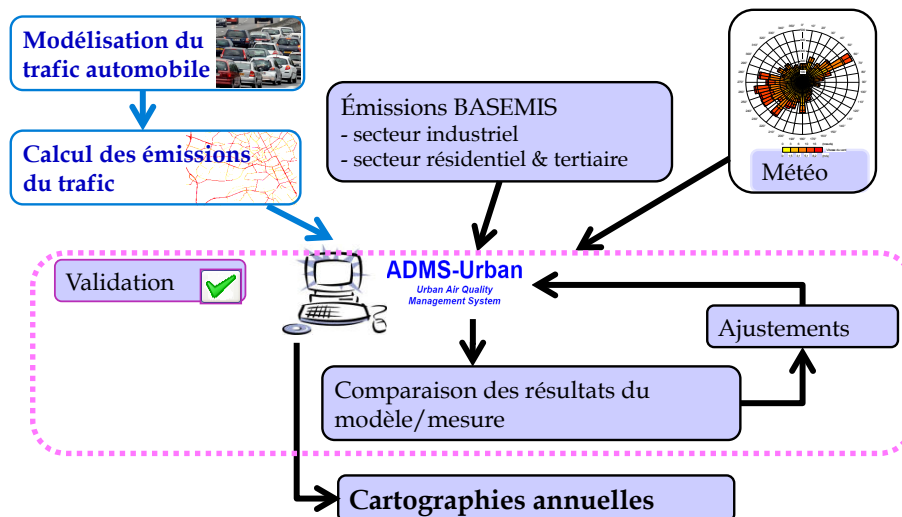


Figure 11 : Du trafic aux concentrations de polluants, avec prise en compte des autres sources, de la météo, et avec ajustements aux observations des stations de mesure de la qualité de l'air (projet ANR Eval-PDU)

Globalement, ce type de modèle permet une modélisation fine de proximité routière et autorise des comparaisons entre scénarios à l'échelle de la rue. La répartition spatiale des concentrations donne une première approche de l'exposition de la population (habitat).

On notera quelques limites : la non-prise en compte des phénomènes micro-météo et la simplification du milieu urbain, la qualité limitée des données d'émission et de leur variation temporelle, un calage effectué avec un nombre limité de sites de mesures, ou encore des limites propres aux outils de traiter un grand nombre de données, qui peuvent conduire à des simplifications de la description spatiale.

Les travaux du projet Prequalif ont par ailleurs montré le potentiel d'amélioration forte des estimations par les techniques d'assimilation des données.

3.2.5. Impacts sur la santé

L'évaluation des impacts sur la santé - dernier maillon de la chaîne d'évaluation - est aussi celui qui est le plus souvent omis : en raison de la complexité qu'il ajoute à la démarche d'évaluation, de compétences à mobiliser, et sans doute aussi parce que les résultats sont fragiles et difficiles à interpréter.

Les travaux de l'ANSES (Seigneur et al. 2012) d'une part et du projet Prequalif (Sciare et al 2014) d'autre part auront permis d'établir un état de l'art très exhaustif de cette question, qui constitue une base de connaissance très appréciable pour l'aborder dans l'évaluation.

Par ailleurs, une démarche originale a été menée dans le cadre du projet Eval-PDU, qui a consisté à élaborer un indicateur des impacts sanitaires de la pollution atmosphérique liée au trafic, basé sur les émissions des véhicules et à l'appliquer au PDU de Nantes (livrables L7.2 et L7.3 du projet, Lépicié et al 2013). Une revue bibliographique a d'abord permis d'analyser les approches et indicateurs actuels des risques sanitaires liés à la pollution atmosphérique, considérant d'une part les méthodes d'évaluation (évaluation des risques sanitaires, évaluation des impacts sanitaires de la pollution atmosphérique urbaine, analyse du cycle de vie...), et d'autre part des méthodes d'agrégation des impacts sanitaires (masse équivalente de substance, années de vie ajustées sur les incapacités...). Considérant la pollution atmosphérique liée au trafic, un Indicateur des Impacts Sanitaires Chroniques des Émissions de Polluants (IISCEP) est élaboré, reposant sur les émissions des polluants pondérées par un facteur de toxicité propre à chaque substance et par un facteur prenant en compte la dispersion et l'exposition des personnes. Cet indicateur se limite aux effets sanitaires directs chroniques par inhalation, et tient compte 35 substances pour lesquelles l'émission peut généralement être calculée.

Cet indicateur est applicable à une zone géographique quelconque, caractérisée par un trafic polluant, une surface, une densité d'habitat, une hauteur moyenne d'immeuble, une rugosité et une population. Il est construit pour être proportionnel à l'impact sanitaire des polluants émis sur la zone mais pour une utilisation en relatif, et satisfait les qualités attendues d'un indicateur.

Son application au cas de Nantes montre sa capacité à rendre compte d'émissions évoluant de manière hétérogène et de l'effet différencié des normes d'émission et motorisations essence/Diesel sur la santé. Dans une étude de sensibilité, les paramètres-clés de l'IISCEP sont les émissions, les facteurs de toxicité des polluants, la population de la zone, et enfin la dispersion dans la zone.

Au-delà de ces travaux préliminaires, la question de l'évaluation des expositions et des impacts sanitaires liés à la pollution de l'air des transports, et plus encore celles de l'évaluation de mesures de réductions restent à explorer afin de produire des approches d'estimation validées et opérationnelles.

3.2.6. Conclusions

L'évaluation de la pollution de l'air reste souvent partielle (hors impacts sanitaires). Elle est sensible aux parcs automobiles, de nombreux phénomènes et polluants demeurent insuffisamment connus ou pris en compte dans les évaluations. Les outils sont complexes, hétérogènes, et leur couplage entre eux avec les modèles de trafic est source de nombreuses difficultés. Ces différents aspects ont été abordés lors des travaux précédents notamment (Fallah, 2013) et seront l'objet d'investigations complémentaires dans le cadre du projet Trafipollu.

Les enjeux de pollution du trafic ne sont pas forcément là où ils étaient attendus : ainsi l'heure de pointe ou le centre-ville, la congestion ne contribuent que très partiellement à la pollution, tandis que les camions, véhicules utilitaires légers, heures creuses, périphéries, démarrage à froid pèsent lourdement dans le bilan d'émission.

3.3. Evaluation des nuisances sonores

L'évaluation des nuisances sonores liées au trafic dispose maintenant d'outils performants et qui peuvent être couplés à des modèles de trafic à différentes échelles. Le projet Eval-PDU a permis la réalisation d'outils de production de cartographies sonores à échelles d'agglomération, tandis des simulations microscopiques ont été développées dans le cadre Ville Numérique. Les travaux de l'ANSES ont finalement posé les bases d'une méthodologie d'évaluation des impacts sanitaires extra-auditifs du bruit environnemental.

3.3.1. Cartographies sonores à échelle d'agglomération

Dans ce cadre du projet Eval-PDU, une méthode alternative pour la réalisation de cartographies sonores pour l'évaluation de mesures (de type PDU) à échelle d'agglomération a été développée, basée sur une approche simplifiée de prévision acoustique, et intégrée directement à un logiciel de SIG développé par l'IRSTV, OrbisGIS. Cette méthode s'appuie sur deux études bibliographiques - états de l'art - réalisés au préalable (livrables L4.1 et L4.2 du projet).

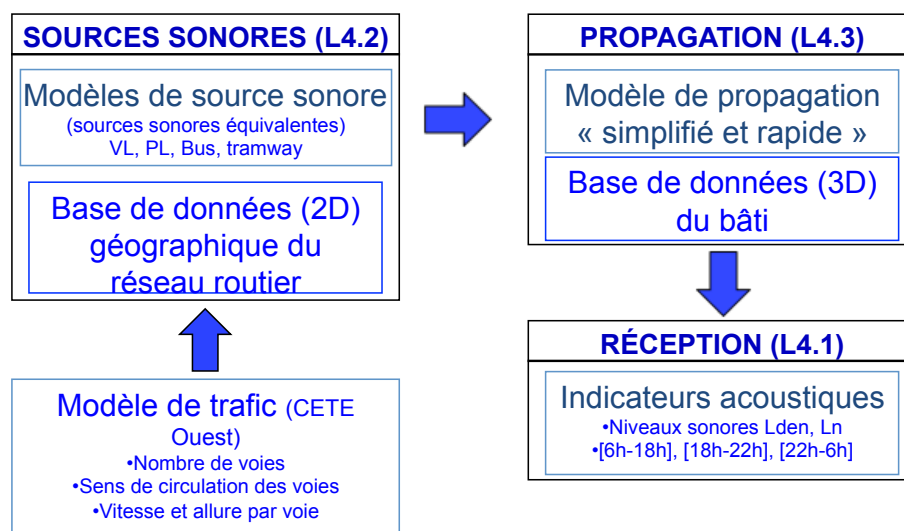


Figure 12 : Démarche générale de simulation des niveaux de bruits à partir de la modélisation des déplacements et trafics sur le réseau routier modélisé (projet ANR Eval-PDU)

La démarche consiste à simplifier l'approche réglementaire française et à optimiser les algorithmes de calcul en utilisant les outils disponibles dans OrbisGIS (module "NoiseMap") afin de réduire les temps de calcul et manipulations de données.

L'agglomération est d'abord décomposée en sous-domaines, donnant lieu à un maillage fin et adaptatif pour construire le réseau de points de calcul (points récepteurs), tout en assurant la continuité entre les sous-domaines et un raffinement à proximité des voies de circulation.

Un "cadastre" d'émission sonore est ensuite construit pour chaque point de calcul, sous la forme d'un réseau de sources ponctuelles, obtenues par décomposition des lignes sources / flux de trafic en points sources, et dont les caractéristiques sont définies à partir des données du modèle de trafic, avec quelques simplifications concernant les revêtements de chaussées, les tronçons de redémarrage, l'allure des véhicules, et la répartition entre trafics de VL et PL sur les différentes périodes horaires.

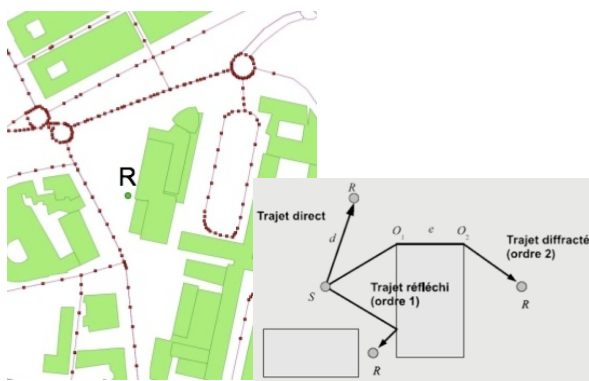


Figure 13 : Décomposition du trafic en points sources acoustiquement homogènes et propagations directes, réfléchies, diffractées

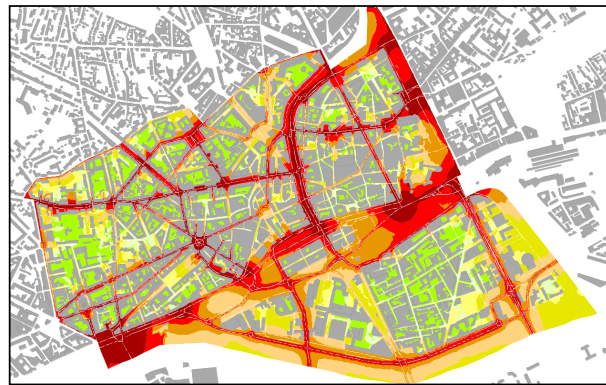


Figure 14 : Modélisation simplifiée 2D et production de carte de bruit dans OrbisGIS

On calcule ensuite la propagation acoustique de chaque point source vers un point d'observation donné, le champ sonore total en ce point étant la somme des contributions des champs sonores directs, réfléchis sur les façades, et diffractés. La propagation est simplifiée en deux dimensions (2D), sources et récepteurs dans le même plan horizontal proche du sol, Chaque trajet (direct, réfléchi et diffracté) est affecté d'une énergie acoustique propre selon la distance, l'absorption acoustique des façades, la fréquence de l'onde sonore... On obtient ainsi un niveau sonore pour chaque point d'observation, pour un jeu de données de trafic correspondant à un intervalle horaire. Les cartographies sonores des sous-domaines sont recomposées pour construire la cartographie à l'échelle de l'agglomération.

3.3.2. Modélisation dynamique du bruit urbain

A échelle locale, les travaux du projet Ville Numérique (déjà évoqués en section 1.4.3) ont permis le couplage d'un modèle de trafic microscopique (modèle Symuvia) avec un modèle de propagation sonore du CSTB, au sein du logiciel eveCity du CSTB (maquette numérique urbaine), en vue d'une évaluation dynamique des nuisances sonores liées au trafic.

3.3.3. Méthodologie d'évaluation des impacts sanitaires extra-auditifs du bruit environnemental

Les travaux menés par l'ANSES sur les effets extra-auditifs du bruit répondaient à une saisine de l'Agence par la DGPR et la DGS visant à élaborer un ou plusieurs indicateurs permettant de prendre en compte les effets sanitaires associés aux événements sonores ponctuels, en vue de leur utilisation dans le cadre du volet « bruit » des études d'impacts sanitaires des projets d'infrastructures de transports et industriels. La méthode proposée par l'ANSES utilise un grille-support permettant une évaluation des risques. Cette évaluation cible la zone concernée par le projet d'infrastructure et comporte les quatre étapes suivantes :

1. Collecte des données nécessaires à l'évaluation des impacts sanitaires en termes de description de la zone étudiée, de l'état sonore existant et du projet d'infrastructure. Il s'agit ici de localiser géographiquement la source sonore, de délimiter le champ géographique à étudier, de recenser les établissements de santé et d'enseignement. Les lieux de travail doivent être identifiés et caractérisés, de même que l'habitat de la zone géographique traitée. Il est enfin recommandé d'effectuer une étude socio-économique des populations résidentes.
La description de l'état initial doit prendre en compte l'ensemble des nuisances sonores mais également les éventuelles situations de co-exposition à d'autres facteurs environnementaux polluants.
La description du projet d'infrastructure doit prendre en compte l'ensemble des nuisances sonores nouvellement introduites, ce qui implique de parfaitement caractériser les nouvelles émissions sonores.
2. Caractérisation des expositions et détermination géographique des zones exposées à des niveaux excédant ceux pour lesquels l'OMS estime que les effets sont négligeables. Il est nécessaire pour cela de connaître la nature des sources de bruit (fixes ou mobiles), l'intensité et la nature du bruit ainsi que la nature de l'exposition.
3. Caractérisation qualitative des impacts sanitaires possibles en tenant compte de paramètres individuels, sociaux et territoriaux : la méthode de caractérisation des impacts proposée dans cette méthodologie consiste, pour chacun des effets sanitaires identifiés, à réaliser dans un premier temps une évaluation quantitative des impacts à l'aide d'une relation exposition-risque sélectionnée puis, dans un second temps, de compléter cette évaluation à l'aide d'éléments qualitatifs pour lesquels il n'existe pas encore de relations de nature quantitative avec l'effet considéré.
4. Identification et discussion des incertitudes reposant sur l'évaluation des risques sanitaires : cette étape, essentielle dans le processus global, permet de rendre les informations générées exploitables par le gestionnaire des risques auquel elles sont destinées. Idéalement, ces incertitudes doivent être déterminées pour chaque étape de l'évaluation des impacts sanitaires en distinguant :
 - a. Les incertitudes conduisant à une surestimation des impacts sanitaires
 - b. Les incertitudes conduisant à une sous-estimation de ceux-ci

- c. Les incertitudes dont les effets sur les impacts sanitaires obtenus ne sont pas connus.

La méthodologie proposée par l'ANSES permet d'évaluer des situations homogènes et représentatives d'une activité moyenne. Elle n'est pas applicable pour des situations « transitoires », comme par exemple la période de chantier accompagnant l'aménagement de l'infrastructure, pour laquelle les indices sonores ne sont pas adaptés. Il est important d'insister sur l'importance de bien identifier les sources sonores relatives au projet à évaluer, et de correctement quantifier leur émission avec les outils de prévision disponibles.

L'applicabilité de cette méthodologie a été évaluée par le Cerema (Direction Territoriale du Centre-Est) sur deux projets d'infrastructure (la liaison A45 Lyon – Saint Etienne et le tramway de Tours). Ce travail a consisté à reprendre le canevas établi par l'Anses et à analyser les pratiques métiers concernant les différents critères de la grille. Les premiers éléments d'analyse font apparaître les caractéristiques suivantes :

- Concernant le préalable au processus d'évaluation des impacts sanitaires, les éléments requis sont dans l'ensemble accessibles, sauf ceux relevant de l'étude socio-économique, pas toujours renseignés
- La détermination des expositions est accessible par le biais des cartographies.
- La caractérisation des impacts sanitaires est à ce jour problématique, l'évaluation quantitative des impacts sanitaires à l'aide des relations doses/réponses n'étant pas effectuée à ce jour.
- Enfin, si les incertitudes liées à l'évaluation des expositions sont généralement estimées, il n'en est pas de même de celles liées à l'évaluation des impacts sanitaires eux-mêmes.

3.4. Méthodologies d'évaluation environnementale

(Mestayer et al 2012) souligne l'évolution actuelle des politiques de transports tournées davantage vers la réduction des distances de déplacement et le report vers les mobilités douces, que sur l'offre d'infrastructures et de transports. Il s'agit d'orienter vers des changements de comportements de mobilité par l'intermédiaire d'une organisation plus favorable de l'espace et par des actions incitatives variées et des contraintes plus fortes sur l'usage de la voiture individuelle. Cette évolution doit maintenir des objectifs ambitieux à moyen terme compte tenu des enjeux environnementaux ou climatiques, et cependant l'efficacité de ces actions est incertaine. Une contribution essentielle est encore attendue de l'évolution des parcs de véhicules, sous l'effet des réglementations. Cette évolution organisationnelle et comportementale n'en est que plus difficile à évaluer, compte tenu de facteurs de complexité liés aux comportements et à l'aspect systémique.

3.4.1. Evaluation intégrée multicritère

Les chaînes de modèles développées et perfectionnées (notamment dans le projet Eval-PDU) ont démontré leur aptitude à analyser les impacts environnementaux d'actions sur la mobilité et les transports urbains. Elles permettent de documenter des indicateurs globaux mais aussi une information spatialisée sous forme de cartes répondant aux objectifs d'évaluation. Des indicateurs intermédiaires à chaque étape de la modélisation (trafic, émission, impact, etc.) sont particulièrement intéressants pour mieux appréhender les mécanismes de la chaîne de causalité depuis les déterminants de la mobilité jusqu'aux impacts environnementaux.

L'intégration des modèles et données dans une infrastructure de données spatiales (ou sous forme de maquette numérique) renforce le potentiel d'application de tels outils, notamment à destination des collectivités.

De fait, de telles chaînes de modèles sont d'abord tributaires :

- de la disponibilité et richesse des données amont, notamment la description des comportements de mobilité au travers d'enquêtes), et données caractérisant l'état initial (trafics, pollutions, etc.),
- des validations et calibrations des modèles,
- d'une capacité d'expertise pour la mise en œuvre de modèles et données multiples et relevant de compétences variées, et pour la spécification d'hypothèses relevant souvent d'un certain empirisme.

L'utilisation de ces modèles est également limitée par leurs domaines de validité, à l'intérieur desquels les résultats peuvent être considérés comme fiables. L'évaluation prospective conduit cependant à envisager des évolutions qui sortent de ces limites et qui conduiraient à des mécanismes différents de ceux modélisés. Des scénarios extrêmes ou à long terme seraient donc mal pris en compte, ou avec des incertitudes fortes.

(Mestayer 2012) souligne enfin une dimension particulière de l'évaluation, celle de son appropriation et de sa transparence. La complexité des modèles, de leur articulation, la nécessité de nombreuses hypothèses, la pluralité des compétences, l'expertise nécessaire à leur mise en œuvre rendent l'explicitation de la démarche d'évaluation et de ses résultats très difficile, générant une certaine opacité des études, et une difficulté d'appropriation par les acteurs de terrains ou les élus. Cette difficulté, associée à la nécessité de collecte régulière de données, incitent à inscrire l'évaluation dans le temps, dans une logique d'intégration des outils, données et résultats, et d'accompagnement des politiques de mobilité et urbaines.

Pour conclure ce volet, il nous semble utile de récapituler les principales difficultés ou lacunes identifiées lors de la mise en œuvre de chaînes de modélisation à échelle d'agglomération. Celles-ci s'expriment en termes :

- de « couverture », répartition spatiale et horaire, et résolution :
 - o non prise en compte de certains trafics (non-résidents, transit régional, transports de marchandises en ville), de phénomènes d'émission significatifs (remise en suspension) et polluants mal connus
 - o spatialisation imprécise des déplacements et trafics, des trafics de camions, 2-roues, de sur-émissions (démarrage à froid, évaporation en lieux, périodes)
 - o représentation faible de la congestion et de la variabilité des conditions de circulation dans une approche horaire
 - o Connaissance insuffisante des parcs automobiles et des spécificités et comportements locaux
- de difficultés de prise en compte et de modélisation de certaines actions :
 - o Des modes et services / usages non représentés (vélo, modes doux, covoiturage, auto-partage, E-commerce) ; il est en conséquence difficile d'évaluer l'impact de pistes cyclables, du covoiturage, de campagnes de sensibilisation, d'autant qu'elles dépendent fortement de l'évolution des comportements
 - o Des mesures complexes voire impossible à modéliser : Ligne de TC + Parc-relais, PDE/PDA/PDES, ou encore les Low Emission Zones pour lesquelles: les déplacements / itinéraires vers certaines zones seraient conditionnés par le type de véhicule, avec une incidence sur le choix modal et les comportements d'achat / renouvellement des véhicules
- de contexte en évolution : territoire en extension, aménagements non prévus, évolution des comportements (mobilité, choix modaux) sous différents contextes, etc.

On doit noter également certains aspects complexifiant les phénomènes à évaluer :

- les reports d'itinéraires concomitants à certaines actions et la répartition temporelle du trafic peuvent augmenter les quantités d'émissions tout en lissant les niveaux de concentration,
- des effets (locaux) significatifs au niveau des trafics et émissions peuvent être insignifiants en concentrations de polluants, compte-tenu des apports (régionaux et

autres secteurs), de la pollution de fond, de la formation de polluants secondaires, et par ailleurs certaines pollutions migrent loin des lieux de trafic/émission (PM, O₃).

On notera enfin que les « nuisances globales » (trafic, énergie, gaz à effet de serre) et les scénarios ou actions à large portée peuvent être évalués à l'échelle d'un territoire ou d'un PDU. A l'inverse, les nuisances locales (congestion, bruit, concentration de polluants à impact sanitaire) ne sont souvent pas quantifiables à échelle des territoires (compensation, imprécision) et n'ont de sens que spatialisées. De même, les actions à portée relativement locale (vitesse limite, ligne TC) doivent également être évaluées à échelle de leur portée (impacts insignifiants à échelle du territoire).

3.4.2. Vers une modélisation et évaluation « systémique » des mobilités et de l'aménagement

Au-delà d'approches intégrées multi-physiques telles qu'évoquées précédemment, on peut envisager une approche plus systémique des mobilités et de l'aménagement (Efficacity 3.1, 2014).

(Leurent et al. 2015) propose ainsi une analyse systémique de la mobilité dans un espace urbain, considérant acteurs et systèmes techniques, notamment en vue de l'évaluation intégrée et multicritère de projets d'aménagements, à échelle de quartier ou d'îlots. La demande de mobilité émane d'une population d'individus, en vue d'activités dans différents lieux, établissements, etc. Les déplacements sont réalisés selon des itinéraires et utilisant des services et moyens de transport. Le trafic résulte de ces déplacements et engendre différentes nuisances et coûts.

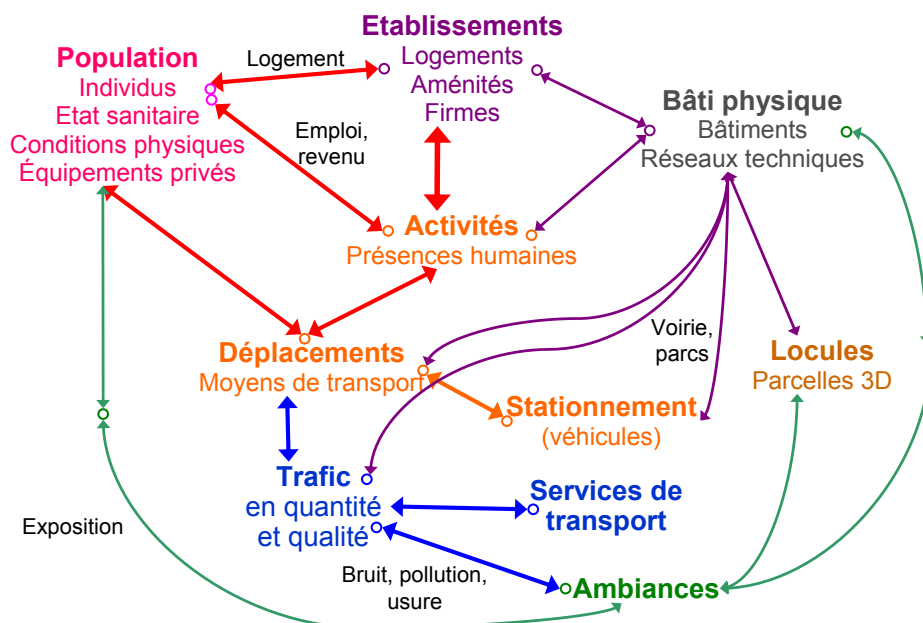


Figure 15 : Vers une évaluation systémique Aménagement - mobilité : Physiologie du système de mobilité (Leurent, 2014)

Globalement, le système de mobilité est considéré comme un système sociotechnique, l'ensemble des systèmes de transport, véhicules, gestion du trafic de même que les

infrastructures, stationnement, bâtiment, espace urbain constituant des éléments techniques, tandis l'ensemble des usages et usagers (au sens large) sont des composantes d'ordre social. Les usagers ont une capacité de choix (localisation, véhicules, modes de transport, déplacement) et donc d'interaction avec le système de mobilité. L'évolution du système de mobilité et de l'espace urbain relève à la fois des décisions des collectivités locales, opérateurs, gestionnaires et décideurs politiques, mais aussi des micro-décisions des acteurs élémentaires que sont les usagers et entreprises.

La mobilité peut être vue comme un ensemble d'entités mobiles (personnes, colis, véhicules) en relation avec des entités fixes (bâtiments, rues, réseaux, quartier, aire urbaine, etc.), chacune de ces entités ayant une certaine persistance ou durée de vie. Le système urbain global est par ailleurs en relation avec le monde extérieur. Les « phénomènes » qui régissent ou découlent des mobilités s'inscrivent dans différentes temporalités (journée, année, etc.), induisant de fortes variabilités temporelles de fonctionnement du système.

Les auteurs proposent en conséquence une « analyse physique statistique du fonctionnement courant » du système de mobilité (et urbain) se déclinant en différents processus pour les différentes entités mobiles ou fixes. Ainsi le trafic est assimilé à un processus de passage et d'écoulement de flux sur un réseau, le stationnement à un processus de stockage, les entités mobiles peuvent être vues comme un enchaînement de présences (et activités) en des lieux et de mouvements entre ces lieux. Les individus (ou classes d'individus) pourront être décrites par des programmes d'activités / déplacements et se différencient fortement selon leurs caractéristiques démographiques, familiales, sociales et professionnelles. Différentes entités pourront être associées par des relations (membres d'une famille, lieu de travail), ou être en interactions spatiales (agrégat d'établissements dans un quartier) réalisant éventuellement différentes fonctions locales complémentaires.

Les auteurs proposent ensuite un état de l'art très documenté sur les outils de simulation nécessaires pour l'évaluation d'un système de mobilité en déclinant : les modèles de mobilité et trafic, les modèles « aval » pour la quantification des impacts environnementaux, sociaux, économiques, les modèles « amont » pour simuler la population d'un territoire (les individus étant à la fois auteurs des déplacements et bénéficiaires du transport de fret et en ce sens responsables des impacts du transport, mais également riverains ou passants et à ce titre victimes de ces impacts). La mise en perspective des objectifs de ces différents outils, de leur contexte d'application et des limites actuelles de leur utilisation, constitue une base extrêmement intéressante en vue de leur amélioration éventuelle, et d'une intégration « éclairée » dans des méthodologies d'évaluation.

Pour l'essentiel des autres fonctions urbaines, l'analyse du cycle de vie conséquentielle est mise en avant comme approche de l'évaluation permettant d'intégrer la plupart des impacts (hormis les impacts éminemment locaux comme le bruit ou les impacts de la pollution de l'air sur la santé, que ne permet pas cette approche).

4. Conclusions, perspectives

Ce rapport a permis de faire un état des lieux des travaux conséquents auxquels a participé l'IFSTTAR ces dernières années en lien avec la problématique de l'évaluation des impacts du trafic et des transports sur la pollution de l'air, le bruit, ou plus généralement l'environnement. Ces travaux de recherche et d'expertise ont ainsi concerné les méthodologies d'évaluation des projets d'infrastructure routière et de plans de déplacements urbains (bruit et pollution), de zones à circulation restreinte pour améliorer la qualité de l'air, et se poursuivent actuellement sur les méthodes d'évaluation multicritères de projets d'aménagement urbain. Ils constituent des états de l'art sectoriels ou partiels mais relativement exhaustifs des phénomènes, méthodologies, outils, retours d'expérience et difficultés liées à l'évaluation.

Plusieurs projets ont concerné la modélisation des phénomènes, du trafic à la qualité de l'air et aux environnements sonores, voire aux impacts sanitaires. Des difficultés spécifiques concernent le couplage des outils, la validation des chaînes de modèles et la disponibilité des données. D'autres travaux apportent des éclairages spécifiques sur l'approche de l'évaluation, la multiplicité et complexité d'évaluation des mesures de gestion des mobilités et du trafic, le cadre particulier de l'analyse du cycle de vie, ou encore les indicateurs et polluants à considérer dans les analyses.

Dans une seconde partie, et en s'appuyant les travaux précédents, on a tenté une mise à plat des phénomènes entrant en jeu dans la pollution de l'air et le bruit liés au trafic et leurs impacts sanitaires, et un état de lieux des outils et connaissances qui permettent de les représenter. Cet état de l'art doit permettre une meilleure appréhension de l'évaluation dans ses différents aspects.

Dans ce but, nous avons finalement récapitulé les différents apports méthodologiques et retours d'expérience dérivés de ces travaux et de la mise en œuvre des approches qu'ils ont permis de développer. Ces apports considérables constituent une base de réflexion pour l'amélioration des approches d'évaluation, et la conduite de travaux complémentaires nécessaires à cette amélioration.

Les problématiques principales pourraient concerner en particulier la spatialisation - nécessaire aux études d'impact sanitaires et sur les populations, les difficultés liées à la disponibilité des données caractérisant l'état initial et les évolutions, et notamment les données concernant comportements (mobilités), le couplage des outils et leur pertinence selon les échelles, l'amélioration des modèles et approches et la définition d'hypothèses en vue de travaux prospectifs, l'explicitation des outils et résultats en vue de leur appropriation.

Concernant l'articulation des modèles de trafic et de pollution atmosphérique, le projet ANR Trafipollu en cours permettra de disposer de données expérimentales pour la validation

des chaînes de modèles et sans doute de répondre à de nombreuses limites et questions évoquées dans les travaux antérieurs, pour l'articulation pertinente des modèles et l'évaluation des impacts du trafic sur la pollution de l'air (et au delà des eaux et sols) à différentes échelles.

Concernant les effets sanitaires du bruit et en particulier les suites à donner au travail méthodologique de l'Anses, un rapport détaillé sur l'évaluation par le Cerema de la grille méthodologique doit être publié en 2015, et des travaux complémentaires doivent être réalisés en liaison avec le MEDDE sur le projet de contournement ferroviaire de l'agglomération lyonnaise (CFAL). Ces travaux devraient aboutir à une validation et lecture simplifiée de la grille méthodologique, à visée opérationnelle.

Plus généralement, les travaux sur la démarche d'évaluation environnementale se prolongeront dans le cadre Efficacity, par une approche systémique des mobilités d'une part, et au-delà en considérant l'aménagement urbain et ses différentes fonctionnalités.

Par ailleurs un GERI (groupe d'échanges et de recherche Ifsttar) a été récemment initié autour de l'évaluation des projets d'infrastructures (MEPI, Méthodes d'évaluation des projets d'infrastructures), envisageant les différents aspects de l'évaluation (économique, social, environnemental).

Au-delà de ces cadres déjà constitués, on pourrait envisager un groupe de travail multidisciplinaire pour une meilleure prise en compte des impacts sanitaires dans l'évaluation de la pollution de l'air / du bruit liés au trafic, ou encore un projet fédérateur multidisciplinaire avec un éventuel soutien du MEDDE et/ou de l'Ademe autour des problématiques d'évaluation environnementale des politiques de transports et/ou d'urbanisme.

Références

André M., M. Fallah, C. Berger, A. Montenon, E. Brutti-Mairesse (2012). Évaluation des PDU - problématique du calcul des émissions de polluants du trafic. Eval-PDU L3.4b, Rapport Ifsttar-LTE, Bron (France), 105 p.

Brutti-Mairesse E. (2013) : Réflexion sur les méthodes d'évaluation environnementale des mesures de gestion des déplacements et du trafic : analyse critique et proposition d'un nouveau cadre conceptuel. Thèse de doctorat de l'ENTPE, réf. 2013-ENTP-0002. Vaulx-en-Velin, France, 378p.

Carteret M., M. André, A. Pasquier (2015). Observation des parcs automobiles en circulation et évaluation de l'impact de mesures de restriction d'accès sur les émissions de polluants. Projet Primequal ZaParC. Rapport IFSTTAR LTE, Bron (France). 184p. (à paraître)

École d'été sur la modélisation urbaine (2014). 1-5 septembre 2014, Marne-La-Vallée. <http://www.urban-modelling.org/fr/actualites/article/ecole-d-ete-sur-la-modelisation-et.html>,

Efficacity (2014). Efficacity : l'institut de R&D pour la transition énergétique de la ville. <http://efficacity.com/accueil>

EMEP/EEA. (2009) : "Part B.1 : Sectoral Guidance - Energy" EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2009, (EEA, Copenhague, 2009), pp.770.

Fallah Shorshani M. (2014). Modélisation de l'impact du trafic routier sur la pollution de l'air et les eaux de ruissellement. Thèse de doctorat de l'Université Paris-Est, Spécialité SIE, Sciences, Ingénierie et Environnement. 186p.

Fallah M., M. André (2013). Chaînes de modélisation pour l'estimation des émissions de polluants et de gaz à effet de serre à différentes échelles - Projet de recherche Ville Numérique. Rapport IFSTTAR LTE13, Bron (France). 78p.

Goger T. (2006) : "Un indicateur d'impact environnemental global des polluants atmosphériques émis par les transports", thèse de doctorat, LTE INRETS - ADEME - INSA Lyon, pp.300

Grassot L. J.P. Nicolas, P. Pluvinet (2012) : De l'intérêt de contrôler l'impact des hypothèses de composition du parc automobile sur l'estimation des émissions liées au trafic routier. Revue Recherche Transports Sécurité RTS, décembre 2012. pp 215-227.

Le Féon S. (2014). Évaluation environnementale des besoins de mobilité des grandes aires urbaines en France, approche par analyse du cycle de vie . Thèse de doctorat de l'École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne, spécialité Sciences et Techniques de l'Environnement. Réf. NNT, 2014EMSE0729, 295p.

Leurent F. (2015). Le système de mobilité : modélisation et évaluation. Document de travail Efficacity 3.1. Confidentiel.

Lépicier V., M. Chiron, R. Joumard (2013) : Developing an indicator for the chronic health impact of traffic-related pollutant emissions. *Environmental Impact Assessment Review* 38 (2013) 35–43 ?

Mestayer P., B. Bourges, L. Fouillé (2014) : Évaluation environnementale du PDU nantais 2000-2010 à partir des simulations numériques des scénarios alternatifs du programme Eval-PDU. RTS (à paraître), pp. 36

Mestayer P. et col. (2012). Eval-PDU, Évaluation des impacts environnementaux d'un PDU et de leurs conséquences socio-économiques : développements méthodologiques et tests sur le PDU de Nantes Métropole. Programme ANR Villes Durables ANR-08-VILL-0005, Rapport scientifique final. 45p.

Muzet A., G. Tinguely, M. Bérengier, F. Coignard, A.S. Évrard, G. Faburel, J. Lelong, P. Lepoutre, F. Mietlicki, M. Nolli, P. Peretti-Watel (2012). Évaluation des impacts sanitaires extra-auditifs du bruit environnemental. Rapport d'expertise collective de l'ANSES, décembre 2012. 295p.

Sciare J., Pernot P., Nedellec V. (2014) : Projet « PREQUALIF » IZNOGOUUD-BARC, Programme Pluridisciplinaire de REcherche sur la QUALité de l'air en Ile de France (PREQUALIF). Impacts des Zapa : NOuvelle Génération d'OUtils de Diagnostic et d'évaluation des Bénéfices sanitaire et économique Attribuables aux Restrictions de Circulation. Rapport provisoire de synthèse du projet. 300p. (à paraître).

Seigneur C., M. Keirsbulck, M. André, C. Bugajny, A. Floch-Barneaud, M. Pascal, G. Plassat, E. Rivière, J. Sciare (2012). Sélection des polluants à prendre en compte dans les évaluations des risques sanitaires réalisées dans le cadre des études d'impact des infrastructures routières. Rapport d'expertise collective de l'ANSES, juin 2012. 185p.

Soula J. (coord.) (2013) : Projet Ville Numérique, Rapport final. CSTB. 45p.

Projets en cours

Trafipollu (2012). Modélisation multi-échelles de la pollution due au trafic dans un environnement urbain. Projet de recherche de l'ANR. http://www.agence-nationale-recherche.fr/projet-anr/?tx_lwmsuivibilan_pi2%255BCODE%255D=ANR-12-VBDU-0002

Efficacity 3.1 (2014). Projet 3.1 : Analyse du cycle de vie à l'échelle urbaine. Projet de l'Institut pour la Transition Énergétique de la Ville Efficacity. Présentation des projets de recherche et développement générique. Juin 2014. 16p. <http://efficacity.com/>