



HAL
open science

Bilan carbone des modes de transport terrestre Quelles places des infrastructures ?

Fabien Leurent, Enguerrand Prié

► **To cite this version:**

Fabien Leurent, Enguerrand Prié. Bilan carbone des modes de transport terrestre Quelles places des infrastructures ?. Le Grand Paris Express: les enjeux pour l'Environnement, Economica, 2022, 9782717872460. hal-04483969

HAL Id: hal-04483969

<https://hal.science/hal-04483969>

Submitted on 29 Feb 2024

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.

Bilan carbone des modes de transport terrestre

Quelles places des infrastructures ?

Fabien Leurent et Enguerrand Prié

Par unité de trafic (véhicule, personne transportée ou produit), le bilan carbone d'un mode de transport comprend les émissions en circulation et aussi celles dues à la construction des objets matériels que sont les véhicules et les infrastructures. Le chapitre retrace la composition du bilan carbone pour chaque mode de transport terrestre.

Nous abordons successivement les infrastructures tant routières que ferroviaires, les véhicules des différents modes et les énergies. Dans la comparaison entre les carburants et l'électricité, nous considérons l'intensité carbone de la production d'électricité et aussi le bilan carbone de la batterie électrique. Nous envisageons les matériels et les énergies dans la perspective du cycle de vie, en contrastant trois niveaux d'intensité carbone pour le mix électrique du pays de fabrication.

Pour un usage aux conditions françaises, nous quantifions l'impact Carbone de chaque mode terrestre en cycle de vie, en y distinguant les parts respectives des sous-systèmes Infrastructure, Véhicule, Batterie, Energie d'usage. Dans ces conditions, l'électrification est un facteur clef de la sobriété en carbone, au même titre que le niveau d'occupation du véhicule (facteur de rentabilisation) et que la solidité des objets matériels (durées de vie et « parcours de vie » en longueur parcourue). Nous insistons sur la multifonctionnalité des infrastructures et l'objectivisation de leur imputation au trafic, et nous proposons une échelle graduée de A à G pour situer la performance carbone d'un mode de transport.

Introduction

Contexte

Pour les individus vivant dans un territoire, la mobilité dans l'espace est une condition importante de la vie quotidienne, afin de réaliser les activités humaines, sociales et économiques dans les différents lieux qui les logent. Même à une époque où le télétravail est largement diffusé, la plupart des entreprises conservent des établissements physiques pour leurs agents. Les divers commerces et services (santé, éducation, administration au sens large) sont accessibles sur place, sauf à remplacer le déplacement d'un client par le déplacement réciproque d'un serveur.

La mobilité des personnes et des biens se réalise au moyen de modes de transport. Un mode de transport est une combinaison technique entre un véhicule, une infrastructure de circulation et un certain processus opérationnel, incluant le mouvement physique dans l'espace et donc une consommation d'énergie. Les automobilistes connaissent bien la consommation moyenne de leur véhicule pour parcourir 100 km, en litres de carburant pour une voiture à moteur thermique ou en kWh pour une voiture à moteur électrique. Ces consommations induisent des émissions de gaz à effet de serre dans l'atmosphère terrestre, en bref des émissions de carbone.

En considérant les émissions de carbone globales de l'espèce humaine, on sait que le niveau

de 2020 n'est absolument pas soutenable à long terme et nécessite une réduction drastique. Pour limiter le réchauffement climatique planétaire à +1.5°C ou +2°C par rapport à l'époque préindustrielle, il faut d'ici 2050 parvenir à annuler le bilan carbone net des activités humaines (selon les termes de l'accord international de Paris en 2015). Cet objectif est particulièrement pressant pour la mobilité fortement consommatrice en énergie et fortement émissive en carbone, que ce soit par la consommation de carburant, ou par la consommation d'électricité selon le mix de production en vigueur localement. Et ce non seulement dans l'usage des véhicules et donc des infrastructures, mais aussi pour la construction, la maintenance et le démantèlement de ces objets matériels.

Problématique, objectif et méthodologie

Dans ce chapitre, nous abordons quatre questions au sujet des modes de transport terrestre :

Première question : par mode de transport, à combien, à quel niveau s'élève l'indicateur d'émission de carbone par unité de trafic ?

Deuxième question : encore par mode, au sein de l'indicateur modal d'émissions, quelles sont les parts respectives des composants matériels et des phases du cycle de vie ? En particulier, quelle est la place occupée par l'infrastructure de transport dans le bilan modal ?

Troisième question : à l'aune des émissions de carbone par unité de trafic, quelles sont les efficacités respectives des différents modes de transport ? En quoi l'infrastructure modale, routière ou ferroviaire, contribue-t-elle aux inégalités d'efficacité ?

Quatrième et dernière question : en envisageant chaque mode de transport comme un système technique, quelle est véritablement l'infrastructure ? En effet, en termes systémiques, le véhicule est un sous-système en interaction avec d'autres sous-systèmes, parmi lesquels « l'infrastructure » est définie comme l'équipement fixe et pérenne permettant la circulation. Au-delà de la définition usuelle de l'infrastructure comme l'objet construit qui supporte le passage des véhicules, ne convient-il pas de considérer aussi l'équipement qui fournit l'énergie aux véhicules ?

Ces quatre questions sont fortement liées les unes aux autres. Pour y répondre, nous allons quantifier les émissions de carbone selon les modes de transport terrestre et nous les rapporterons à des trafics. Nous expliquerons les émissions par la composition technique de chaque mode, en distinguant les parts respectives des véhicules, des énergies, des infrastructures de circulation. Ces composantes techniques sont liées les unes aux autres dans la constitution même du mode et dans ses usages, dans ses trafics. Nous considérerons leurs « rapports de nombres » tels que le nombre de passagers par véhicule et le débit de véhicules passant par une infrastructure. Par composante, nous considérerons aussi le rapport entre les phases respectivement constructives et d'usage dans le cycle de vie.

Ainsi, notre méthodologie relève à la fois de la modélisation systémique des modes de transport et de leur comptabilité statistique. Nous nous appuyerons sur diverses études antérieures, depuis des articles académiques sur l'analyse de cycle de vie des infrastructures ou des batteries électriques jusqu'à des synthèses multimodales réalisées pour la France ou pour l'Europe. Nous procéderons à notre propre recombinaison, en mettant en évidence les spécifications techniques d'un mode : le dimensionnement de l'infrastructure, sa constitution matérielle, sa situation territorialisée, son trafic en véhicules ; et par véhicule, sa composition

matérielle et sa logistique en cycle de vie, son vecteur énergétique, son occupation en passagers.

Plan du chapitre

Notre propos est organisé en cinq parties suivies d'une conclusion :

La partie A traite d'une infrastructure de transport terrestre en tant qu'objet physique implanté dans l'espace, avec sa matérialité et sa logistique ordinaire mais aussi constructive : elle débouche sur une quantification des bilans carbone par kilomètre d'infrastructure de voirie routière ou de chemin de fer.

Dans la partie B, nous mettons en rapport la « dette carbone » de l'infrastructure avec les trafics supportés en véhicules ou en unités transportées : en considération de la pluralité de fonctions assurées par l'infrastructure, nous recommandons des schémas d'imputation et nous en déduisons des impacts carbone spécifiques par unité transportée.

Dans les parties C et D, nous présentons les « coopérateurs » naturels de l'infrastructure au sein de tout mode de transport : les véhicules (partie C) et les énergies qui servent à l'usage des véhicules et de l'infrastructure ainsi qu'à leur fabrication respective (partie D). Nous insistons sur les caractéristiques physiques des différents types de véhicules, ainsi que sur les deux grands vecteurs énergétiques que sont d'une part les carburants et d'autre part l'électricité, avec son sourcing et son stockage.

Dans la partie E, nous rassemblons les impacts carbone spécifiques de l'infrastructure, des véhicules et des énergies mises en œuvre afin de composer l'impact intégré d'un mode de transport, par unité de longueur parcourue, et ce au niveau du véhicule ou au niveau d'une unité transportée. Pour des conditions typiques de la France mais en considérant des variantes quant au pays de fabrication des matériels roulants (véhicules, batteries), nous donnons des estimations quantitatives pour les principaux modes de transport terrestre de personnes et nous menons une confrontation rudimentaire.

En conclusion, nous marquerons le rôle fondamental du vecteur énergétique dans le bilan carbone des modes de transport : et cette perspective justifie de considérer une « méta-infrastructure de carbone » comprenant non seulement l'infrastructure physique de circulation des véhicules mais aussi l'infrastructure énergétique permettant d'assurer l'alimentation des véhicules.

A/ Infrastructure de transport et bilan carbone

Une infrastructure de transport est un objet matériel situé dans l'espace, afin d'assurer des fonctions de circulation, d'accès et stationnement pour les véhicules qui l'utilisent. Le trafic est déterminant pour rentabiliser l'infrastructure. Mais dans cette partie nous nous intéressons primordialement à la consistance matérielle de l'infrastructure et à son empreinte carbone.

Deux grands types d'infrastructures de transport sont considérés ici : respectivement routière et ferroviaire. Ces deux espèces d'infrastructures partagent une « condition terrestre » : elles

ont une forme de « voie » pour supporter des véhicules et canaliser leur circulation ⁽¹⁾, en situation d'interface entre les véhicules et le sol.

Nous exposerons d'abord les caractéristiques générales d'une infrastructure de transport terrestre : sa morphologie selon trois dimensions de longueur (tracé en plan), de largeur (profil en travers) et de hauteur (profil en long), qui sont toutes dimensionnantes (§A.1), puis sa composition matérielle et la logistique associée (§A.2). Puis nous marquerons les spécificités de chaque mode infrastructurel : la voirie pour le mode routier (§A.3) et le chemin de fer pour le mode ferroviaire (§A.4). Ensuite nous évoquerons les phénomènes d'usure et les durées de vie caractéristiques qui constituent le fondement temporel de la rentabilisation (§A.5), et enfin nous comparerons les infrastructures routières et ferroviaires à l'aune du bilan carbone par unité de longueur (§A.6).

A.1/ Morphologie de l'infrastructure en longueur, largeur et hauteur ⁽²⁾

En tant qu'objet matériel fixe, une infrastructure de transport terrestre présente une forme géométrique et une composition matérielle.

La forme géométrique présente une dimension principale : la longueur, afin de « relier » des lieux en offrant un parcours continu dans l'espace. Le **tracé en plan** de l'infrastructure est rectiligne ou presque : il épouse la surface du terrain, il en hérite le relief et s'y adapte en jouant sur les pentes et la sinuosité. Les conditions locales restreignent la forme idéale qui serait rectiligne (efficacité du franchissement) et plate (pour neutraliser la gravité).

L'infrastructure s'étend aussi en largeur. En section courante, son extension d'un bord à l'autre comprend des files allouées à la circulation, pour un ou deux sens de trafic, selon le ou les modes compatibles : c'est le **profil en travers**.

L'infrastructure étendue en longueur et en largeur constitue un objet plan. Selon la dimension verticale, elle présente un **profil en long** qui est son inscription longitudinale et en relief sur le terrain : en général au niveau du sol, occasionnellement en dénivelé et ce en aérien ou en souterrain.

Dans le sens de la longueur, l'infrastructure comprend principalement des « sections courantes » assurant le passage et aussi la desserte directe (cas de la voirie), mais aussi des lieux spécialisés qui constituent des « **nœuds** » : des lieux d'accès tels que stations ferroviaires, et des lieux de croisement et d'articulation entre plusieurs voies. En de tels nœuds, la directionnalité des flux est plurielle et l'emprise spatiale s'étend « carrément » dans les deux dimensions de l'espace géographique, plutôt que dans « une dimension élargie » constituée par le couple (longueur, largeur).

Une implantation à la surface du sol favorise la fonction de desserte autant que la constructibilité et la logistique de l'infrastructure. Mais l'emprise au sol tout au long de l'itinéraire terrestre constitue une « coupure » dans l'autre dimension de l'espace géographique pour toutes espèces de flux (mouvements humains, biodiversité, écoulement des eaux), Coupure à laquelle on remédiera par des passages en plan (intersections) ou en dénivelé.

¹ Notion de « way » en anglais

² Pour une illustration des éléments présentés ici, on pourra consulter l'ouvrage Urban Transportation Systems ainsi que les manuels HCM et TCQSM

La configuration dénivelée est standard entre des axes autoroutiers, ou entre des lignes de métro. La voirie ordinaire permet des carrefours plans. Alors que l'épaisseur propre de l'infrastructure se compte en dizaines de centimètres, en hauteur son gabarit propre compte plusieurs mètres pour loger les véhicules les plus hauts, plus le cas échéant une caténaire d'alimentation électrique, et encore les contraintes géométriques de variations de niveau. C'est pourquoi une solution en dénivelé engage une maille verticale relativement grande, avec deux niveaux d'infrastructure en gabarit total.

En complément des voies, l'infrastructure terrestre comporte aussi des « *lieux annexes* » qui sont typiquement des espaces affectés au stationnement, au remisage, à l'entretien et à la maintenance des véhicules : stationnement hors voirie pour les automobiles et les deux roues, stationnement des autobus ou encore des trains.

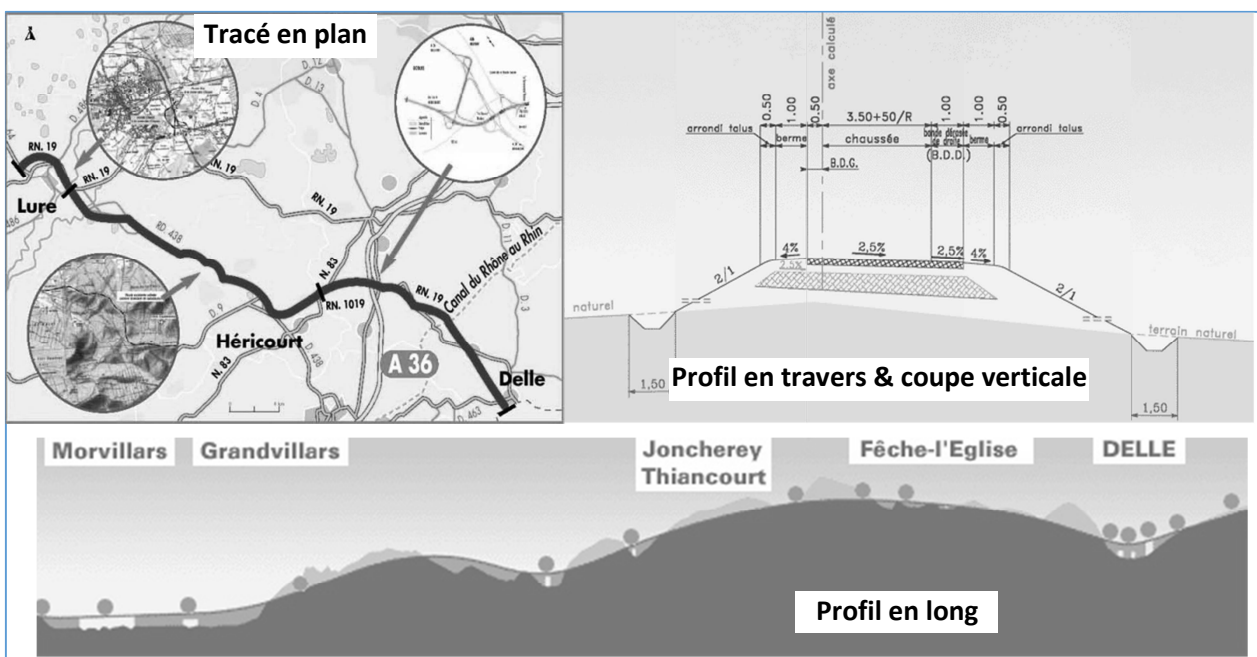


Figure 1. Morphologie d'une infrastructure de transport terrestre.

A.2/ Composition matérielle et logistique

Matérialité de l'infrastructure. En section courante, la voie se présente comme un objet relativement plat (aux pentes près). Selon sa largeur, elle comprend principalement un corps de chaussée relativement homogène encadré par des côtés spécifiques au terrain et au milieu territorial ⁽³⁾. Le corps de chaussée a la forme d'un bloc rectangulaire (en largeur et en hauteur selon l'épaisseur) composé de plusieurs couches horizontales. L'étage supérieur est destiné au roulage des véhicules : couche fine dite « de roulement » pour le mode routier ou des rails pour le mode ferré. L'étage intermédiaire assure la forme : couche plus épaisse en routier, traverses sur ballast ou couche en béton pour soutenir les rails. La couche inférieure assure la fondation sur le sol, c'est en général la plus épaisse.

³ Pour une implantation au niveau du sol, en milieu urbain les côtés sont des trottoirs ; en milieu rural des bas-côtés éventuellement assortis de fossés pour l'écoulement des eaux

Le volume de matériaux est déterminé par l'épaisseur de la couche, sa largeur et la longueur du tronçon d'infrastructure. Pour les rails et les traverses, les formes sont spécifiques et les volumes bien moindres, par unité de longueur et par file de circulation. La masse des matériaux impliqués est le produit de ce volume et de la masse volumique spécifique au type de matériau.

Pour les ouvrages enterrés il s'ajoute des parois latérales et même supérieure dans le cas souterrain. Pour un ouvrage en aérien il faut prendre en compte aussi le dispositif de suspension, tel que piles de viaduc, système de haubanage, etc.

Équipements spécifiques. Au-dessus des couches de matériaux, les rails ferroviaires et leurs traverses constituent des équipements spécifiques. De même pour l'alimentation en énergie (par rail spécial ou en aérien par ligne caténaire). La sécurité et l'exploitation du trafic mettent en œuvre divers équipements spécialisés : glissières de sécurité, appareils de voie à fonctions de capteur ou d'actionneur, dispositifs d'éclairage, et jusqu'au mobilier urbain destiné aux voyageurs. Ces équipements étant principalement métalliques, par unité de masse leur fabrication met en jeu des énergies bien supérieures à la logistique des matériaux de construction.

Construction et logistique de chantier. La construction de l'infrastructure en tant qu'ouvrage de génie civil nécessite des flux de matières : les matériaux et matériels d'infrastructure sont à installer, à partir de certaines sources d'approvisionnement en « matières premières », selon une certaine logistique tant d'approvisionnement que de chantier. Complémentairement, il faut en général enlever des matières préinstallées incluant le cas échéant la démolition d'ouvrages préexistants. La mise en forme du terrain peut nécessiter non seulement des déblais mais encore des remblais en matériaux de type terre ou roche. Tous ces mouvements de matières pondéreuses sont réalisés au moyen d'engins spécifiques (dont bulldozers) et engendrent des consommations d'énergie. En particulier le creusement par tunnelier est fortement consommateur en énergie, pour fragmenter les matériaux préexistants et les évacuer, pour construire les voussoirs (pièces de paroi) et les mettre en place. L'eau constitue une sorte d'antimatière : pour la vie de l'ouvrage il est crucial d'assurer la circulation des eaux de ruissellement, et la présence d'eau sur le site du chantier le complexifie grandement.

Logistique ordinaire de l'infrastructure. Dans son fonctionnement au quotidien, l'infrastructure assure un ensemble de fonctions :

- pour les modes ferrés à motorisation électrique, l'alimentation en électricité des circulations,
- gestion du trafic, signalisation du trafic, éclairage et autres fournitures courantes,
- gestion de sécurité et interventions d'urgence,
- l'entretien quotidien (nettoyage..) des lieux et des véhicules de transport public,
- les fonctions commerciales « sur place » : information, vente, paiement.

L'alimentation en énergie des véhicules électriques justifie les « courants forts », tandis que les autres fonctions se contentent de « courants faibles ».

A.3/ Infrastructure routière

Les voies routières peuvent accueillir différents types de véhicules : sur la voirie urbaine, des piétons, deux roues avec ou sans moteurs, voitures et autres quadricycles, véhicules lourds

tels que autobus et camions. La voirie de type autoroutier est spécialisée pour les véhicules rapides et suffisamment protecteurs. Dans les deux cas la voirie routière peut participer à autant de modes de transport que de types de véhicules admissibles.

Ces différents types de véhicules routiers partagent les traits communs suivants :

- une capacité motrice importante, permettant de franchir des dénivelés jusqu'à 10 % et au-delà.
- la motricité jointe au gabarit restreint confère une agilité pour manœuvrer sur la voie, notamment en virage. Cela permet de limiter les longueurs des bretelles dans les intersections. Par suite, le diamètre d'un carrefour giratoire mesure entre 20 et 40 m.
- une autonomie par rapport à la voie : sans contrainte de guidage latéral, ni d'approvisionnement en énergie, ni « horaires de passage » (contrairement à la gestion des « sillons de circulation » en exploitation ferroviaire).

Ces « caractéristiques cinématiques » sont communes aux véhicules routiers quelles que soient leurs dimensions en termes de gabarit et de masse :

- les gabarits vont de petit pour un deux roues (1 m de long et 50 cm de large) à assez grand pour un « véhicule long » (12-15 m de long et 2 m de large pour un camion ou un autocar ; les autobus articulés atteignent 25 m) : mais ces formats restent contenus par rapport aux véhicules ferroviaires.
- l'éventail des masses en charge va de la centaine de kilogrammes à quelques dizaines de tonnes pour les « poids lourds », ce qui reste inférieur d'un ordre de grandeur à la masse d'un train.

L'agilité des véhicules routiers facilite l'adaptation de la géométrie de la voie routière aux contraintes du terrain et aux contraintes d'urbanisation. La voie routière est essentielle pour assurer l'accès aux bâtiments et autres établissements d'activités. Sa constitution en réseau est aisée et généralisée : la route est « ubiquitaire ».

Géométrie d'une voie routière. Les dimensions caractéristiques sont, en largeur, d'environ 3 mètres par file de circulation et 2 mètres par file dédiée au stationnement, tandis que la largeur impartie aux trottoirs est variable. Une voie urbaine comprend en général une ou plusieurs files pour la circulation automobile et des trottoirs pour les piétons ; souvent, des files affectées au stationnement ; le cas échéant, des couloirs réservés, entre pistes cyclables ou voies pour autobus. La voirie autoroutière comprend, outre ses files de circulation, des glissières de sécurité entre les sens et des bandes d'arrêt d'urgence. La voirie interurbaine compose avec son environnement vert et bleu : dépendances vertes sur les bandes latérales de terrain, fossés d'écoulement des eaux...

Matérialité d'une voie routière. Le corps de chaussée est classiquement un empilement de trois couches : de haut en bas, une couche fine dite « de roulement », puis une couche de forme, et en-dessous une couche de fondation, plus épaisse. L'ensemble peut atteindre 60 cm d'épaisseur pour une chaussée autoroutière, ou seulement une vingtaine de cm pour une voie urbaine. Les matériaux sont essentiellement des granulats tassés pour les couches de fondation, et des matériaux liés ou « enrobés » pour les couches supérieures (bitume ou béton).

Empreinte carbone d'une voie routière. Prenons l'exemple d'une chaussée de 8 m de large et 20 cm d'épaisseur construite en enrobés, dont la masse volumique est proche de 2,4 t / m³. Par mètre linéique, la masse de matériaux est de 1,6 m² x 2,4 t/m³ = 3,8 t/m. A raison de 55 kg CO₂e par tonne d'enrobés selon l'ADEME, la construction de cette chaussée coûte 220 kg de CO₂e par mètre linéique, soit 210 tonnes par km.

Sur les routes réservées aux véhicules automobiles, la chaussée est plus large et plus épaisse : en comptant deux files chacune de 3,5 m de large par sens de circulation, des bandes d'arrêt d'urgence de 2 m de large et une bande médiane de 1 m, la largeur atteint 19 m, tandis que l'épaisseur est typiquement de 60 cm. Ainsi la section en coupe mesure 11,4 m² et sa masse de matériaux est de 27,4 t / m linéique. L'empreinte carbone s'élève à 1,5 tonnes / m linéique donc à 1 500 tonnes par km de route. De plus, l'ajout de glissières de sécurité en métal aux deux bords et sur la bande médiane induit des émissions de carbone à raison de 280 kg CO₂e par mètre linéique, soit 280 t CO₂e/km : cet ajout de 20% est minoritaire mais consistant, il porte l'empreinte carbone à environ 1 780 t CO₂e/km. A lui seul, il est plus impactant qu'une route banale à une file par sens.

A.4/ Infrastructure ferroviaire

La voie ferroviaire est spécialisée pour des « trains » au moyen de rails en acier : c'est le « chemin de fer ». En pratique, un train est un véhicule de grande contenance qui est proportionnelle à sa longueur. La capacité d'un train en voyageurs se compte en centaines de passagers (tramway, métro) et même en milliers pour le « Mass Transit » urbain (type RER ou Transilien en Ile-de-France), alors que celles des autobus et autocars se compte en dizaines de passagers, celle des automobiles en unités, et que les deux roues sont en général des modes individuels.

Ainsi, par nature, les modes ferroviaires sont des transports de masse. Par file de circulation, leur débit en trains peut atteindre jusqu'à 30 ou 40 trains par heure (cas du métro automatique) et en voyageurs jusqu'à 50 ou 80 milliers de passagers par heure.

La grande contenance d'un train est dosée principalement par sa longueur. La largeur du véhicule est de l'ordre de 2 à 3 mètres, ou moins pour un tramway circulant en milieu urbain très dense. Cette largeur représente une à deux fois celle d'un véhicule routier. De plus, en jouant sur la hauteur il est possible d'agencer deux niveaux pour des passagers (voitures « duplex »).

Géométrie de la voie ferroviaire. La longueur des trains contraint fortement les dimensions des infrastructures en termes de longueur, de rectilinéarité et d'emprise au sol : ce dès les espaces requis pour le simple stationnement, et surtout pour le tracé de ligne, y compris l'ampleur donnée aux virages pour les parcourir confortablement à vitesse élevée. Des manœuvres des véhicules sur la voie, telles que le demi-tour, qui sont relativement simples sur une infrastructure routière, font l'objet de protocoles complexes sur une ligne ferroviaire, en raison à la fois de la longueur des véhicules et du tracé des rails.

En comptant une voie (paire de rails) par sens de circulation, l'espace intermédiaire entre les voies et des dégagements en bordure, l'emprise d'une ligne ferroviaire représentera de 10 à 40 mètres de large en section courante.

Le « roulement fer » entre roues et rail permet de réduire les frictions, donc d'économiser l'énergie pour mouvoir la masse du train, tout en restreignant la capacité ascensionnelle (pente d'au plus 4 % pour un TGV) et en augmentant la longueur nécessaire au freinage, ce qui limite la fréquence d'exploitation. Les arrêts sur la voie sont coûteux en énergie et surtout en temps d'immobilisation de la voie. Afin de les limiter aux arrêts en gare, les intersections entre lignes ferrées et routières privilégient le trafic ferroviaire, soit explicitement sur un passage à niveau soit implicitement grâce à une solution en dénivelé.

Empreinte carbone de l'infrastructure ferroviaire. Entre la production des matériaux spécifiques, leur mise en place et en forme, la pose des traverses et des rails et autres équipements complémentaires (appareils de voie dont aiguillages...), la régénération d'une ligne ferroviaire à 2 voies engendre des émissions de carbone de l'ordre de 840 tCO₂e/km (source Carbone4). Alors que le génie civil initial pour dégager le terrain et le préparer pour la voie (terrassements, drainage) et disposer des traversées latérales, émettrait 7700 tCO₂e/km pour une ligne LGV en surface, et atteindrait 40 000 tCO₂e/km pour une ligne de métro souterraine creusée au tunnelier. Pour un tramway, l'aménagement initial et la composition de voie s'élèvent à environ 3500 tCO₂e/km.

Ainsi l'investissement initial est véritablement un acte fondateur pour l'empreinte carbone de l'infrastructure ferroviaire : la partie Voie « renouvelable » ne représente que 15 % du total initial pour une ligne de surface, et cette part se réduit à seulement 2 % pour une ligne souterraine à grande profondeur. C'est la partie « voie » qui fait l'objet de renouvellements successifs au cours de la vie de l'infrastructure. L'impact carbone d'un renouvellement de voie se décompose grossièrement en trois tiers (i) de support dont ballast, (ii) de rails, (iii) d'équipements dont l'alimentation électrique des trains (« courants forts ») et l'appareillage d'exploitation du trafic (« courants faibles »).

La ligne à grande vitesse (LGV) Rhin-Rhône, mesurant 140 km de longueur, a fait l'objet d'un bilan carbone ferroviaire global par l'ADEME et la SNCF (2009). Les 1 100 milliers de t CO₂e pour la construction de l'infrastructure se décomposent en :

(i) un tiers de génie civil (360 milliers de t CO₂e dont 110 de dégagement des sols, 107 transports de matériaux, 41 d'extraction et mise en œuvre de matériaux, 47 de mouvements des agents),

(ii) 45% de production hors site des matériaux (500 milliers de t CO₂e dont 282 pour les chaux de traitement du sol, 47 pour le ciment, 51 pour les aciers d'armature, 33 pour les aciers profilés des ouvrages d'art), et

(iii) 22% d'équipements et bâtiments ferroviaires (225 milliers de t CO₂e dont 106 de voies – rails, traverses, ballast - et caténaires, 8 pour équipements de signalisation, 36 de bâtiments dont 29 pour deux gares nouvelles, 55 pour raccordements ferroviaires, 20 pour maintenir l'infrastructure durant 30 ans).

Ce bilan manifeste pleinement la matérialité de l'infrastructure, l'importance du génie civil, la prépondérance dans le bilan carbone des matériaux sous-jacents sur les équipements ferroviaires « émergés » à raison d'environ 2 tiers contre 1 tiers. Par unité de longueur de ligne, le bilan carbone de l'infrastructure représente 8 000 t CO₂e/km, soit entre 4 et 5 fois plus que pour une autoroute à 2 fois 2 voies. Encore s'agit-il d'une ligne ferroviaire construite

en milieu interurbain, hors contraintes d'urbanisation donc, et en surface, non pas en souterrain.

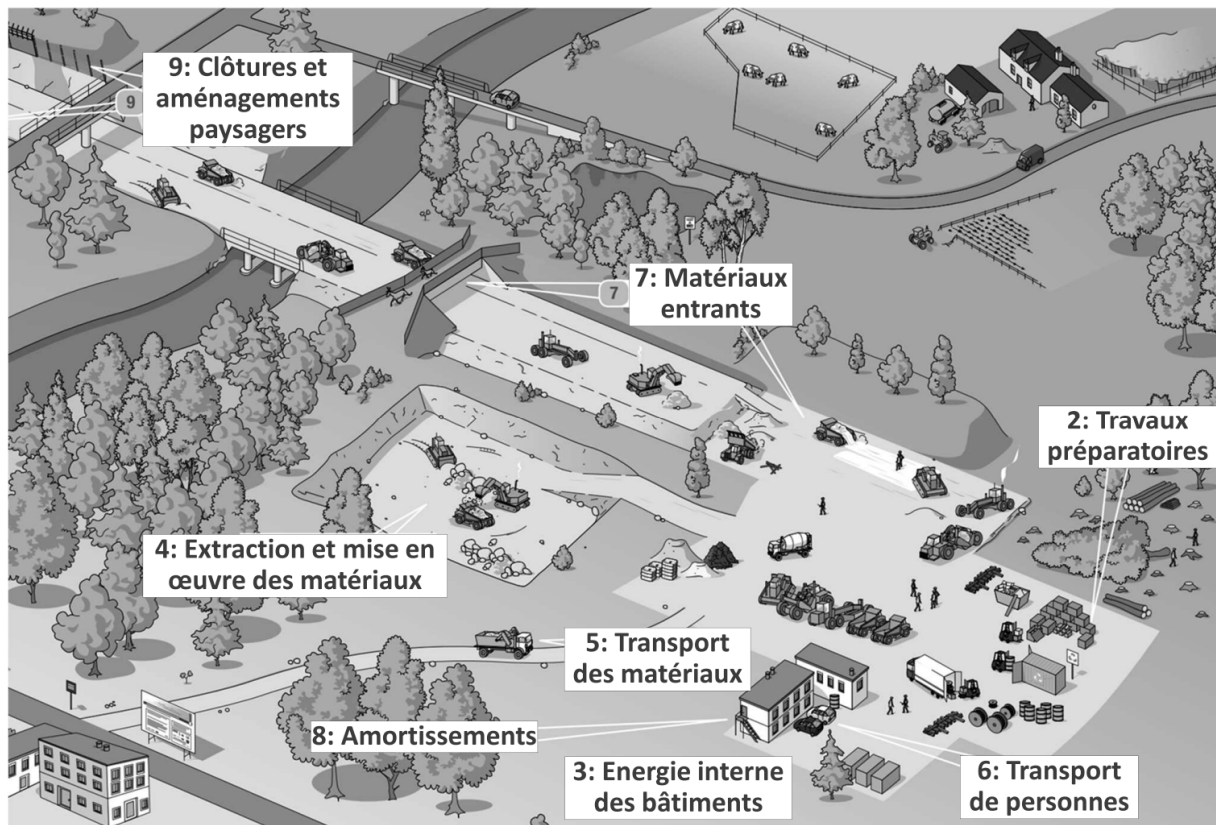


Figure 2. Composition et logistique constructive d'une ligne ferroviaire. (source Ademe-Sncf, 2009)

A.5/ Durée de vie et amortissement dans le temps des impacts constructifs

La construction initiale et la démolition finale sont des opérations uniques, « one-shot », aux deux extrémités de la vie technique de l'infrastructure. Au cours de cette vie technique, des régénérations intermédiaires induisent des chantiers d'ampleur presque comparable.

La durée de vie totale est très large : on la fixe conventionnellement à 100 ans, mais cet âge est déjà largement dépassé par les premières lignes du métro parisien.

La fréquence de « l'entretien routier » se compte en années ou en dizaines d'années, selon le type de voie, le niveau de trafic et le climat doux ou rigoureux, mais aussi selon le type d'intervention, relativement superficiel (restreint à la couche de roulement) ou en profondeur (restauration de propriétés structurelles).

Pour le mode ferroviaire, la régénération de voie ferrée se pratique par intervalles de quelques décennies ⁽⁴⁾ ; le remplacement de rail par intervalles de quelques années ; le simple polissage de rail peut être plus fréquent (cf. Morize, 2020).

⁴ Typiquement 40 ans que ce soit pour une ligne de tramway ou pour une LGV ; mais un trafic élevé raccourcirait la période entre deux renouvellements

Pour une infrastructure correctement construite ⁽⁵⁾, les principales sources d'usure sont le climat ⁽⁶⁾ et le niveau de trafic. Le volume de trafic est un paramètre fondamental de l'usure de l'infrastructure : usure abrasive en surface, fatigue structurelle en profondeur ⁽⁷⁾.

L'effet de la masse par essieu est fortement non linéaire : les véhicules « poids lourds » sont responsables de la quasi-totalité de l'usure sur les voies routières. L'épaisseur de l'infrastructure est une parade dans une certaine mesure (qui trouve une limite pour raisons économiques). Il en va de même pour la qualité des matériaux de construction.

La qualité d'état de la couche de roulement (ou du rail) conditionne aussi l'usure abrasive, qui est aggravée par les dégradations ponctuelles. Interviennent aussi dans ce phénomène les régimes dynamiques des véhicules : les variations de vitesse amplifient l'usure. Intervient enfin la géométrie de l'infrastructure : la sinuosité (faible rayon de courbure) amplifie l'usure ⁽⁸⁾.

Les jonctions sont spécialement exposées au trafic et ce selon plusieurs directions d'effort. Tandis que les lieux annexes de type station ou parking sont moins exposés à l'usure : moindre vitesse des véhicules, ou simples passages de piétons.

Dans le bilan environnemental de l'infrastructure, chaque opération « ponctuelle » sera amortie sur toute la durée d'effet. La construction initiale sur la durée de vie totale, et chaque opération de maintenance sur la durée de l'intervalle jusqu'à la prochaine opération du même type. Il en résulte un « montant annuel » qu'il est tentant de répartir entre les véhicules qui empruntent l'infrastructure.

A.6/ Comparaison carbone des infrastructures routière et ferroviaire

Le bilan carbone d'une infrastructure de transport terrestre se compte en milliers de tonnes équivalentes de CO₂ par km de longueur. Pour une implantation au niveau du sol, une ligne ferroviaire est quatre fois plus émettrice qu'une route à grande capacité réservée aux véhicules automobiles, elle-même 10 fois plus émettrice qu'une route banalisée à une file par sens de circulation. Une construction en souterrain à grande profondeur augmente encore d'un ordre de grandeur le bilan pour une ligne ferroviaire – donc pour une voie routière le facteur d'amplification atteindra deux ordres de grandeur.

Dans le bilan carbone en cycle de vie de la LGV Rhin-Rhône, le génie civil de la construction initiale est important : de l'ordre d'un tiers, ou deux tiers si l'on inclut les matériaux sous-jacents qui pourraient rester en place lors des opérations de renouvellement. Faisant l'hypothèse d'une opération de renouvellement tous les trente ans, son bilan carbone ne

⁵ Des imperfections peuvent être très destructives et nécessiter des interventions rapides : ex. infiltration d'eau à des interfaces entre composantes et types de matériau, en cas d'imperfection des joints.

⁶ Notamment les variations de température au cours de la journée et ce au long des saisons, imposent aux structures des cycles d'allongement-rétrécissement, ce qui contribue à leur « fatigue ». L'action des eaux, par ruissellement mais aussi par cycles de gel et dégel. Evidemment les ouvrages en souterrain sont bien moins exposés aux variations de température et aux intempéries, mais la question des infiltrations d'eau reste cruciale et nécessite un système de protection et/ou un système d'évacuation

⁷ Qui se manifestera par des lésions internes s'étendant progressivement, puis par des mouvements respectifs entre les fragments ainsi créés. Autrement dit : dé-solidification progressive du corps de chaussée

⁸ La sinuosité se mesure de façon inverse par le rayon de courbure de la voie. Pour les voies du tramway grenoblois, les sections à faible rayon (entre 50 et 100 m) s'usent deux fois plus vite que celles à fort rayon (> 100 m) : leurs durées de vie respectives sont de 15 et 30 ans, cf. Morize et Leurent (2019).

devrait pas excéder un tiers du bilan constructif initial. Plus précisément, en comptabilisant seulement le remplacement de la voie et des équipements, les 114 000 t CO₂e représentent 840 t CO₂e par kilomètre de ligne, soit 15 % du bilan initial.

Le décompte des durées de vie techniques de l'infrastructure, et des durées entre deux opérations successives de renouvellement ou régénération (renouvellement lourd), devrait faire l'objet d'un suivi comptable au titre de la gestion patrimoniale des infrastructures. Les durées de 100 ans pour amortir la construction initiale, et de 30 ans entre deux opérations de régénération, sont largement conventionnelles. Leur degré de précision est loin d'être absolu – à 30 % près et ce sans doute avec d'importantes fluctuations dans l'espace et le temps.

B/ Imputer la dette de carbone de l'infrastructure aux fonctions assurées et aux trafics supportés

Pour un montant d'impact carbone annualisé obtenu en rapportant chaque opération infrastructurelle à la durée de vie associée, il reste à fixer des clefs de répartition entre les différentes fonctions assurées par l'infrastructure. Cela concerne tant les voies routières que les lignes ferroviaires à usage mixte combinant transport de voyageurs et transport de fret.

Nous mettrons en évidence les fonctionnalités assurées selon les types d'infrastructure (§B.1) et nous proposerons des schémas d'imputation et des clefs de répartition (§B.2). Nous en tirerons des conséquences pour les infrastructures routières (§B.3) comme pour les infrastructures ferroviaires (§B.4).

B.1/ De la fonctionnalité de circulation à la multifonctionnalité

Pour une infrastructure ferroviaire dédiée exclusivement à la circulation de trains, la « dette carbone » est facile à répartir entre les trains selon leurs courses respectives, et ce d'autant mieux que leurs chargements sont relativement équivalents. Entre des trains aux chargements inégaux, ou entre des trains de voyageurs et des trains de fret partageant une même ligne, l'unité de compte est moins évidente et l'on préfère considérer les masses en charge comme clef d'imputation. Une telle convention a été appliquée au réseau ferroviaire interurbain hors LGV en France, pour distinguer (i) les trains régionaux de voyageurs (TER hors Ile-de-France, ou RER et Transilien en Ile-de-France), (ii) les trains interrégionaux de voyageurs (trains dits « intercités ») et (iii) les trains de fret.

Pour une infrastructure autoroutière, l'argument de la masse génératrice de l'usure mènerait à affecter sa charge en carbone exclusivement aux véhicules lourds – camions et autocars. Mais leur trafic nécessite en général au plus une file de circulation par sens, alors que la voie en compte 2 ou plus. Une convention simple serait d'imputer une moitié de charge carbone aux véhicules de fret et une moitié aux automobiles (avec aux alentours les autocars et les véhicules utilitaires légers).

Mais la voirie urbaine assure une multiplicité de fonctions. Les charges carbone respectives des différentes files de circulation pourraient être affectées à leurs usagers respectifs : chaussée pour les voitures et camions, piste cyclable aux bicyclettes et trottinettes, trottoirs aux piétons. Cependant les véhicules passent sur les trottoirs pour accéder aux bâtiments et aux parkings hors voirie. De plus les bicyclettes partagent la plupart des voies. Et parmi les poids lourds, certains assurent non pas du transport de fret ou de voyageurs, mais la collecte

des déchets, ou des interventions d'urgence (pompiers, police). Il faudrait compter autant de parts que de telles « fonctions territorialisées ». En tout état de cause, il faut se garder d'affecter tout l'impact infrastructurel aux seules voitures, puisque les principaux facteurs d'usure sont les poids lourds, dont les véhicules professionnels du milieu urbain. Parmi les fonctions territorialisées devraient figurer encore le passage des réseaux d'eau, d'énergie et de télécommunication, dont l'entretien nécessite souvent le percement de la chaussée et participe grandement à son usure (dé-solidification menant ultérieurement à des déformations, en plus des questions d'infiltration mentionnées plus haut).

B.2/ Schémas d'imputation et clefs de répartition

Pour une voie routière de type « rue urbaine » à trafic modéré ou moyen, i.e. jusqu'à 5 ou 10 000 véhicules/jour, les impacts carbone peuvent être répartis équitablement en quatre quarts pour les quatre fonctions que sont (i) le transport de personnes, (ii) le transport de fret et les livraisons, (iii) les services urbains destinés aux résidents, (iv) les autres réseaux techniques.

Pour une voie de type « artère urbaine » supportant plus de 10 000 véh/jour, la part du transport de personnes peut être une moitié, celle du fret un quart et le dernier quart pour l'ensemble des services urbains et autres réseaux techniques.

Pour une voie de type autoroutier, la répartition naturelle est par moitié entre transport de personnes et transport de fret. Il en va de même pour une route interurbaine à grande circulation. Mais pour une route interurbaine à trafic modéré, une répartition équitable serait en trois tiers pour les trois fonctions que sont (i) le transport de personnes, (ii) le fret et (iii) les services ruraux : notamment les mouvements des véhicules assurant localement les activités agricoles (tracteurs etc).

Pour une voie ferroviaire dédiée aux trains de voyageurs, l'impact est à imputer à 100 % à cette fonction. De même, une voie servant uniquement au fret est à imputer à 100 % à ce transport. Tandis qu'une voie à usage mixte entre voyageurs et fret est à répartir équitablement, par moitiés, entre ces deux fonctions.

B.3/ Trafics routiers et impacts infrastructurels par unité fonctionnelle

Pour une autoroute à 2 x 2 voies, un niveau typique de trafic est de 30 000 véh/jour dont 80 % de véhicules légers et 20 % de poids lourds. Les véhicules légers sont essentiellement des voitures particulières, contenant en moyenne 1.2 personnes en urbain ou 1.8 en interurbain (en France). En supposant 40 ans de durée de vie, la moitié des 1800 tCO₂e/km répartie sur 40 ans pour 80% x 30 000 véh/jour représente 2,5 g CO₂e/véh.km, soit 2,1 gCO₂e/p.km en urbain ou 1,6 en interurbain. Par véhicule lourd, l'autre moitié répartie entre 4 fois moins de véhicules donne un impact unitaire de 16 gCO₂e/véh.km : pour un chargement moyen de 15 tonnes, la part unitaire par tonne chargée est d'environ 0,7 gCO₂e/t.km. Ces valeurs seraient réduites pour une autoroute à 2x3 voies supportant 50 000 véh/jour, et plus encore pour une autoroute à 2 x 4 voies supportant 80 ou 100 000 véh/jour, malgré l'élargissement de la chaussée et l'amplification de la dette carbone initiale à respectivement 2340 et 2900 t CO₂e/km.

Pour une rue, la dette carbone initiale de 210 tCO₂e/km répartie sur 40 ans et affectée pour un quart au transport de personnes représente 1,3 tCO₂e/km.an. Pour un trafic de 5000 véh/jour à 1,2 p/véh, l'impact unitaire est de 0,7 gCO₂e/véh.km et 0,6 gCO₂e/p.km, valeur à appliquer à tout mouvement de personne quel qu'en soit le mode de déplacement.

Par autobus ou autocar, l'impact par véh.km pourrait se déduire du nombre moyen de passagers transportés ; pour un autobus avec 18 personnes l'impact infrastructurel serait de 11 gCO₂e/km pour une rue à trafic modéré ou de 66 gCO₂e/véh.km sur voie rapide urbaine. Pour un autocar transportant 30 personnes sur autoroute interurbaine l'impact infrastructurel serait de 72 gCO₂e/véh.km selon cette convention ; ou, en considérant l'autocar comme un poids lourd, de 16 gCO₂e/véh.km par analogie avec un camion.

B.4/ Trafics ferroviaires et impacts infrastructurels par unité fonctionnelle

En transport ferroviaire les véhicules sont beaucoup plus capacitifs qu'en transport routier, mais les trafics en véh/jour par file de circulation sont bien moins élevés.

Comme instance de ligne ferroviaire à haute fréquence de circulation, nous pouvons considérer le métro parisien : le passage d'un train par sens toutes les 2 minutes environ en période de pointe représente 60 trains par heure pour les deux sens ; pour une journée équivalant au total à disons 6 heures de pointe, le trafic est d'environ 500 trains par jour. La charge moyenne par train est de 170 personnes, donc 60 000 personnes par jour. L'impact carbone de 40 000 tCO₂e/km imputé sur 100 ans à ces niveaux de trafic représente 2,2 kg CO₂e/train.km et 17 gCO₂e/p.km.

Pour un train de mass transit urbain héritant son tracé du passé, l'impact carbone n'est que de 840 tCO₂/km. En les imputant aux 30 années d'un cycle de régénération, le montant annuel est de 28 tCO₂/km. Ce montant est fortement dominé par les émissions de la maintenance courante (Prié, 2021).

Le nombre de trains par jour varie entre 200 et 500 (RER francilien), et le nombre moyen de passagers par train de 100 à 300 (RER francilien encore). Pour le RER francilien l'impact carbone est de 1050 gCO₂e/train.km et 3 gCO₂e/p.km.

De telles hypothèses « modérées » de trafic ferroviaire conviennent assez bien pour une ligne de tramway. Alors l'impact constructif initial de 3500 t CO₂e/km, réparti sur 40 ans, représente 1,2 kg CO₂e / véh.km et 12 gCO₂e/p.km.

En transport ferroviaire interurbain dédié aux voyageurs, le nombre de 200 trains par jour pour une ligne à une voie par sens constitue un trafic élevé : la moyenne est à 110 trains par jour sur le réseau de LGV en France en 2017. De plus, en France l'occupation moyenne d'un train à grande vitesse est de l'ordre de 400 passagers. Pour une LGV ainsi chargée, en imputant un tiers des 8 000 tCO₂e/km de la construction initiale au titre de l'héritage, et en admettant une période de 30 ans entre deux régénérations, le montant annuel d'impact carbone de l'infrastructure atteint 80 t CO₂e / km : soit 2 kg CO₂e / train.km et 5 g CO₂e / p.km. Pour un train intercités, les émissions sont plutôt de 1 kg CO₂e / train.km mais répartis entre des passagers deux fois moins nombreux, soit encore 5 g CO₂e / p.km. Tandis que pour les trains régionaux hors Ile-de-France, le montant de 440 g CO₂e / train.km est à répartir entre 84 passagers, soit encore environ 5 g CO₂e / p.km (Prié, 2021).



Figure 3. Des véhicules et des voies : multifonctionnalité de la voirie.

C/ Les véhicules : catégories physiques, cycle de vie et couplages avec l'infrastructure

Un véhicule de transport est en soi un véritable système technique : nous identifierons les caractéristiques déterminantes de l'impact carbone (§C.1). Et par véhicule, la notion de cycle de vie dépend de sa complexité matérielle (§C.2). Nous expliciterons les relations techniques qui couplent le véhicule et l'infrastructure, afin de bien situer certains postes générateurs d'impact carbone (§C.3). Nous pourrions alors établir quelques repères quantitatifs et continuer de comparer les modes (§C.4).

C.1/ Catégories de véhicules

Nous considérons ici les catégories de véhicules suivantes pour le transport terrestre :

- le piéton, conçu comme un « deux pieds » en tant que son propre véhicule pour la marche à pied.
- les deux roues : véhicules individuels de taille réduite (environ 1 m de long, 0.5 m de large) tels que trottinette, vélo, scooter, motocyclette.
- les voitures : véhicules de taille médiane (environ 4-5 m de long ⁹, 1.6 m de large) permettant de transporter jusqu'à 5 personnes environ ainsi que des bagages ou produits divers, cette catégorie inclut des véhicules utilitaires légers.
- les « poids lourds » routiers sont des véhicules longs (plus de 10 m, pour 2 m de largeur) qui se subdivisent selon la fonction assurée : autobus et autocars pour le transport de passagers respectivement à courte ou longue portée, camions pour le transport de fret.
- les véhicules ferroviaires sont souvent appelés « trains » au sens large : tramways, métros, trains de mass transit urbain (type RER ou Transilien en Ile-de-France), trains

⁹ Cette taille « médiane » est intermédiaire entre la taille réduite d'un deux roues et la taille plus élevée d'un véhicule long routier

à grande vitesse (TGV) en interurbain, autres trains interurbains de transport de voyageurs (intercités) ou de fret.

Ces définitions ne sont pas exhaustives, il manque entre autres les monoroues, les 3 roues. Chaque catégorie est large : entre petite et grande voiture la masse peut varier du simple au double. La notion de train est composite : en principe un train est un assemblage modulaire de « voitures » (pour des passagers) ou de « wagons » (pour du fret). En transport urbain l'assemblage est pérennisé afin d'éviter les temps de composition, de formation en convoi.

Entre la dizaine de kg d'un petit deux roues et la dizaine de tonnes d'un poids lourd routier, les différences sont évidentes pour la masse à vide (MAV) des véhicules. En considérant la masse en charge avec au moins une personne à bord comptant pour 70 kg en moyenne, l'intervalle se restreint quelque peu. Mais la masse des trains se compte en centaines de tonnes : 300 tonnes pour un train de mass transit urbain, 430 pour un TGV, 500 pour la MAV d'un train de fret qui chargera facilement 500 t de fret...

Les modes autres que piétons sont mécanisés : la roue permet des vitesses au-delà des 10 km/h. Les modes autres que les piétons et les deux roues sans moteur sont motorisés : la motorisation permet des vitesses allant jusqu'à 20 km/h et un peu au-delà pour les deux roues faiblement motorisés, et atteignant 100 km/h et plus pour les catégories routières supérieures, incluant les deux roues fortement motorisés.

Les puissances motrices sont évidemment proportionnées au format du véhicule et donc à sa contenance. Le tableau 1 synthétise les caractéristiques techniques fondamentales des catégories de véhicules. Les valeurs numériques mentionnées ont une portée indicative : la catégorie est large et les variations internes sont importantes, typiquement de - 50 % à + 50 % autour de la valeur mentionnée à titre indicatif.

Pour tout véhicule autre qu'individuel, le chargement est une variable extrinsèque : nous avons explicité une gamme de variations et nous en avons tiré les conséquences en termes d'abord de masse en charge, puis de facteur de consommation d'énergie par unité transportée.

Tableau 1 : Caractéristiques physiques des catégories de véhicules.

Type de véhicule	MAV (kg)	MEC (kg)	Occupation (p ou t)	Puissance (kW)	kWh / UF	PDV (km)
Piéton	0	70	1	0,21	0,2	500
e-trottinette	13	83	1	0,2	0,2	7 000
Vélo	16	86	1	0,42	0,4	15 000
e-bike	19	89	1	0,35+0,1	0,4	15 000
Scooter	80	150	1	10	10,0	60 000
Moto	180	250	1	50	50,0	150 000
Voiture légère	1 000	1 084	1,2	60	50,0	150 000
Voiture lourde	2 000	2 119	1,7	150	88,2	250 000
Autobus	11 500	12 760	18	280	15,6	600 000
Autocar	13 000	15 100	30	300	10,0	800 000
Camion moyen	9 000	24 000	15	300	20,0	1 000 000
Tramway	55 000	63 610	123	880	7,2	1 500 000
Métro	130 000	141 900	170	1 230	7,2	2 000 000
RER	288 000	312 920	356	1 300	3,7	3 000 000
TER	180 000	185 880	84	3 500	41,7	5 000 000
TGV	380 000	412 060	458	9 300	20,3	15 000 000
Intercités	430 000	446 310	233	4 400	18,9	9 000 000
Train de fret	460 000	990 000	530	4 200	7,9	4 000 000

C.2/ Le véhicule comme complexe matériel : cycle de vie

Nous pouvons analyser un véhicule selon les composantes matérielles suivantes : habitacle, châssis, roues, pneumatiques, bloc motopropulseur, conteneur d'énergie (réservoir à carburant ou batterie électrique de grande capacité). Les deux roues n'ont pas d'habitacle à proprement parler. Les modes actifs, dont les piétons, utilisent la force motrice humaine et donc le corps humain comme moteur et comme réservoir d'énergie. Les batteries électriques de grande capacité augmentent fortement la masse des véhicules ; a contrario elles permettent de récupérer de l'énergie cinétique, par freinage régénératif.

Le châssis et l'habitacle sont fortement solidaires et partagent un même cycle de vie qui est celui du véhicule : en principe ce cycle a une temporalité longue. A l'autre extrême du spectre temporel, les pneumatiques automobiles et les roues des trains sont des pièces d'usure plus rapide, dont l'entretien et le remplacement suivent des cycles de vie plus courts. Le moteur a sa propre durée de vie : qui se compte en centaines de milliers de km, avec un net avantage au moteur électrique. ⁽¹⁰⁾

Quant à la batterie électrique, sa durée de vie dépend de la technologie particulière (composition chimique) et aussi, de manière très significative, des cycles de décharge-recharge et des niveaux de charge en utilisation mais aussi au repos. La recharge met en jeu son propre équipement (borne externe au véhicule) et des pertes en ligne (autour de 10 %).

Les différentes temporalités des cycles de vie correspondent à différents rapports entre phase d'usage et phase constructive, et donc à des parts différentes de la phase constructive dans le

¹⁰ Les évaluations en ACV modélisent bien plus finement la composition d'un véhicule : Cf. Hawkins et al. (2012) puis Ellingsen et al. (2016)

cycle de vie de la composante concernée et in fine dans les impacts énergétiques et matériels pour l'ensemble du véhicule.

Les conditions industrielles de fabrication ont des influences : par les sources d'énergie utilisées au site de production, le mix énergétique local de la production d'électricité ⁽¹¹⁾, et aussi les économies d'échelle par effet de série. Les quantités d'automobiles produites à la chaîne sont bien supérieures aux quantités de véhicules lourds : d'un ordre de grandeur pour les camions, de deux pour les autobus et les autocars, de 3 ou 4 pour les trains, métros et autres tramways. ⁽¹²⁾

Le tableau 1, dans sa dernière colonne, indique une durée de vie typique par catégorie de véhicules. Pour un piéton, c'est le kilométrage de marche jusqu'à usure complète d'une paire de chaussures. Pour les modes mécanisés, les pneus sont des consommables et les durées de vie correspondent aux véhicules. Elles vont de 10 à 800 milliers de km parmi les véhicules routiers : elles croissent avec la masse et la puissance motrice du véhicule, car l'aptitude à la vitesse va de pair avec l'aptitude à la distance. Les DDV ou parcours de vie se comptent en millions de km pour les véhicules ferroviaires destinés à un trafic soutenu.

Les émissions de carbone aux diverses phases du cycle de vie peuvent être estimées proportionnellement à la masse à vide (MAV) du véhicule. Le tableau 2 distingue la fabrication, la distribution et la fin de vie, ainsi que des processus spécifiques de maintenance pour les véhicules utilisés par des services partagés, pour deux grandes catégories de véhicules routiers (micromobilité vs. Fortement motorisés) et une catégorie de véhicules ferroviaires.

Par unité de masse, les facteurs d'émission à la fabrication sont proches entre les modes terrestres, car la masse des véhicules réside essentiellement dans leur corps en acier. Cette similitude s'étend à la fin de vie ainsi qu'aux crédits de recyclage. Pour les véhicules automobiles, le facteur d'émission de la distribution correspond à une fabrication en Europe pour un usage en France. Les facteurs d'émission à la fabrication sont moyennés pour la fabrication dans plusieurs pays européens : il faudrait moduler ces facteurs selon le mix énergétique de la production d'électricité dans le pays de fabrication (cf. partie suivante).

Tableau 2 : Intensité carbone par phase constructive dans la vie du véhicule, en kgCO₂e / kg MAV.

Catégorie	Fabrication	Distribution	Service	Fin de vie	Recyclage	Total cycle
Micromobilité Privatif	6,5	0,5		0,5	1,5	6
<i>Partagé</i>	6,5	0,5	0,50	0,5	1,5	6,5
Véhicule routier	4,7	0,1	0,30	0,4	1,5	4,0
<i>Made in France</i>	1,92	0,1	0,30	0,4	1,5	1,22
<i>Made in Germany</i>	4,77	0,1	0,30	0,4	1,5	4,07
<i>Made in China</i>	6,40	0,1	0,30	0,4	1,5	5,70
Train	6,1					6,1

Sources : ADEME, Ellingsen et al (2016) et calculs des auteurs.

¹¹ Et plus largement la supply chain de la fabrication et de la distribution du véhicule

¹² A contrario, par effet de massification notamment face à la résistance de l'air, la taille du véhicule permet de gagner en efficacité énergétique : un poids lourd en charge à 24 tonnes consomme en moyenne 40 litres de carburant aux 100 km, à rapporter aux 8 litres par 100 km d'une automobile de 1.5 tonnes en charge.

C.3/ Couplages forts entre véhicules et infrastructure

Au-delà du rapport entre roues et support, et de l'influence de la morphologie de l'infrastructure sur la cinématique du véhicule, les couplages forts comprennent la répartition de certaines fonctions entre l'infrastructure et le véhicule. C'est la question des équipements « embarqués » ou « débarqués » en « bord de route » (ou de voie).

L'approvisionnement en énergie électrique est emblématique : il distingue nettement les voies ferrées électriques qui alimentent leurs trains et les modes routiers tels que le véhicule électrique stocke sa propre réserve d'énergie (batterie ou carburant). Corollairement, une capacité de récupération d'énergie cinétique peut être mise en œuvre au niveau du véhicule ou de l'infrastructure si elle assure l'alimentation dynamique en électricité.

Les fonctions de guidage et conduite du véhicule, la coordination avec le reste du trafic, font aussi l'objet d'une répartition : traditionnellement côté infrastructure pour le mode ferroviaire et côté véhicule pour le mode routier. Mais le développement de la délégation de conduite pour les véhicules routiers remet en question cette répartition traditionnelle et pousse à équiper l'infrastructure routière de manière spécifique. De plus les technologies d'accrochage virtuel permettent de faire circuler des véhicules routiers en convois, en trains virtuels. Sur le mode ferré, la conduite autonome est aussi en voie de développement. Certains systèmes prévoient d'embarquer dans le train ou la nacelle le dispositif d'aiguillage, alors que cet équipement fait traditionnellement partie de la voie ferrée.

En principe, le déport d'une fonction vers l'infrastructure permettrait d'allonger la durée de vie des équipements concernés. Mais en pratique les générations technologiques sont plus courtes qu'un cycle de renouvellement de l'infrastructure, sauf si les véhicules ont une longue durée de vie atteignant ou dépassant 30 ans. Se pose aussi la question du nombre des équipements, selon qu'ils sont installés à bord ou le long des voies.

C.4/ Commentaires : valeurs quantitatives et ratios comparatifs

A partir des éléments donnés dans les tableaux 1 et 2, nous pouvons calculer des indicateurs de performance par type de véhicule, en rapportant le bilan carbone des phases constructives du véhicule à sa durée de vie technique spécifique. Les deux termes du rapport : au numérateur et au dénominateur du ratio, augmentent tous deux avec la masse du véhicule. Mais les conditions d'usage interviennent aussi. Entre engin de micromobilité hors batterie (environ 15 kg) et voiture de masse moyenne-supérieure (disons 1500 kg), il y a un facteur 100 pour la masse. Entre les durées de vie respectives de 10 000 km ou de 200 000 km, le facteur est de 20. Donc l'impact carbone de la part constructive, en g CO₂e / veh.km, est cinq fois plus bas pour la micromobilité que pour la voiture. Il faudrait remplir en permanence les 5 places de la voiture afin d'équilibrer la comparaison au niveau des usagers. Ou alors, allonger à 1 M km la durée de vie de la voiture : cela paraît possible (hors batterie) pour des voitures à moteur électrique du segment supérieur (¹³).

Entre voiture légère (1 t) ou lourde (2 t), l'allongement de la durée de vie technique depuis 125 000 ou 150 000 km jusqu'à 300 000 km compense le différentiel de masse en termes de cycle de vie. Nous verrons dans la partie E que les occupations respectives opèrent une

¹³ Témoignages de conducteurs de taxis équipés de Tesla S.

compensation analogue pour la consommation d'énergie en phase d'usage donc pour l'impact carbone associé.

Pour l'automobile comme pour les autobus et autocars, la masse à vide par place offerte est de l'ordre de 250 – 400 kg. Tandis que pour les trains interurbains la masse par place assise est au moins double, de l'ordre de 800 - 1000 kg. Les durées de vie respectives font plus que compenser ce différentiel entre automobiles à DDV conventionnelle et trains. Mais entre autobus - autocar ou train régional les performances sont équivalentes, le facteur 3 de la masse par place compense le facteur 3 des parcours de vie, et ce à taux d'occupation en passagers équivalent. En pratique, sur des liaisons à faible trafic, à clientèle équivalente l'autocar sera proportionnellement bien davantage rempli que le train, donc bien mieux rentabilisé en tant que véhicule. Ce gain d'efficacité s'étendra à la consommation d'énergie, mais pas forcément à l'impact carbone si les vecteurs énergétiques sont différents.

Enfin deux facteurs déterminent de manière importante l'indicateur d'impact carbone par unité de longueur parcourue. D'une part, la mutualisation de l'usage est nécessaire pour que le véhicule passe une proportion importante du temps en roulage : cela vaut pour tous véhicules de transport public, depuis les taxis jusqu'aux transports collectifs. D'autre part, la vitesse spécifique du mode entraîne le parcours d'une longueur proportionnelle : bien plus élevée pour les trains à grande vitesse que pour les trains régionaux. Ce second facteur justifie la différence entre les parcours de vie respectifs des matériels ferroviaires concernés. Ainsi l'indicateur d'impact carbone par unité de longueur de parcours intègre une prime à la longue distance et à la haute vitesse, ce qui déforme la comparaison entre modes de proximité et modes de franchissement. Tant cet aspect que le degré de mutualisation de l'usage sont donc à considérer pour relativiser l'indicateur d'impact carbone par unité de longueur.

D/ L'énergie et ses différentes formes

La mobilité met en œuvre des énergies en situation d'usage, pour le mouvement même, et aussi pour la construction des matériels impliqués, véhicules et infrastructures. Après avoir caractérisé les intensités énergétiques de l'usage (§D.1), nous expliciterons les impacts Carbone respectifs des carburants (§D.2) et de l'électricité (§D.3). Les batteries électriques sont des objets techniques spécifiques qui sont aussi à évaluer en cycle de vie (§D.4). Enfin nous mentionnerons la mobilisation d'énergie par le corps humain pour les « modes actifs » que sont la marche et le vélo, et l'impact carbone associé en raison du régime alimentaire de la personne (§D.5).

D.1/ L'énergie d'usage, son stockage et son sourçage

La dynamique du mouvement met en œuvre de l'énergie : pour prendre un « moment cinétique » (donner une vitesse à une masse) en maîtrisant l'inertie de la masse, pour surmonter la résistance au roulement et la résistance de l'air. La masse du véhicule et de son chargement influence les quantités d'énergie de manière proportionnelle. Les régimes de vitesse sont importants : l'énergie cinétique est proportionnelle au carré de la vitesse. Entre modes individuels actifs et modes motorisés lourds, la masse et la vitesse différencient très fortement les véhicules respectifs. De plus, la nature routière ou ferroviaire du roulement détermine la résistance spécifique : plus forte d'un facteur 10 pour le contact pneu-chaussée que pour le contact rail-roue (par unité de masse)⁽¹⁴⁾.

L'infrastructure détermine aussi l'énergie mise en œuvre par le véhicule de par sa morphologie (relief et sinuosité) et par l'état du revêtement : les dégradations d'état augmentent la rugosité. Et encore par son régime de trafic et les conditions de trafic imposées au véhicule, en particulier dans des régimes alternant des « stop and go ». Quant aux conditions climatiques du territoire, elles influencent les consommations des « systèmes auxiliaires » destinés au confort des passagers : ventilation, climatisation et chauffage. Leur activation peut augmenter de 30 % la consommation courante d'énergie d'une automobile⁽¹⁵⁾.

Par mode de transport, l'intensité énergétique de son usage se caractérise par l'énergie effectivement utilisée par unité de longueur parcourue, primo au niveau du véhicule et secundo par unité transportée. Pour un véhicule à moteur électrique ⁽¹⁶⁾, l'énergie effectivement utilisée est proche de celle consommée par le moteur, à environ 10 % près de déperdition par frottement dans le système motopropulseur : le facteur Tank-to-Wheel (TTW : du réservoir à la roue) est de l'ordre de 90 %. Pour un véhicule à moteur thermique, l'énergie dégagée par la réaction chimique de combustion n'est que très partiellement transmise aux roues. Un litre d'essence dégage 9 kWh par sa combustion ; sur 100 km une voiture à essence de type Renault-Clio consomme environ 6 litres de carburant soit 54 kWh « carburés », alors que le modèle électrique correspondant, une Renault-ZOE, consomme à peu près 15 kWh, soit 3,5 fois moins. Donc le taux TTW n'est que de 30 % pour le moteur thermique. Nous retenons le ratio de 9 kWh/ litre de carburant et le taux d'efficacité de 30 % pour *estimer l'intensité d'énergie utilisée par les véhicules à combustion en des termes équivalents à un véhicule électrique* dans le tableau 3. Par modèle de véhicule, nous rapportons aussi l'efficacité du véhicule en charge à d'une part sa masse en charge et d'autre part son nombre moyen d'unités transportées. Enfin, nous avons estimé une capacité de stockage d'énergie en « quantité utilisable à la roue » : pour les véhicules à moteur thermique la capacité effective est déduite de la contenance du réservoir modulo le taux d'efficacité TTW. Pour les véhicules ferroviaires à moteur électrique mais sans batterie, cette capacité est estimée à partir d'un trajet moyen représentatif des conditions d'usage.

Nous voyons ainsi apparaître la question du stockage de l'énergie : l'expression « vecteur énergétique » signifie bien la source de l'énergie motrice du véhicule. L'électricité transmise

¹⁴ En plus du frottement des roues, il y a la résistance de l'air, le jeu des pentes, et surtout l'inertie du véhicule : pour prendre une certaine vitesse il faut investir l'énergie cinétique correspondante, soit $E=M.V^2/2$ qui dépend seulement de la masse M et de la vitesse V mais pas du mode

¹⁵ Cf. Faria et al. (2013)

¹⁶ Et sans contribution de la force motrice humaine

par l'infrastructure (par rail ou caténaire) évite la problématique du stockage à bord. Pour les véhicules électriques à batterie, ce stockage induit un supplément de masse (¹⁷) et aussi de volume interne au véhicule, par rapport au carburant liquide ou gazeux et au réservoir associé.

Tableau 3 : Consommation et stockage d'énergie dans l'usage des véhicules.

Mode	En alim kcal/kn	Elec kWh/kn	Carburant l/km	Trajet (km)	Stock (*) kWh ut	Usager	kWh / p.km
Piéton	20	0		5	0,0	1	0,000
e-trottinette	14	0,014		10	0,5	1	0,014
Bike	17,5	0		10	0,0	1	0,000
e-bike	13,4	0,007		10	0,5	1	0,007
Scooter	20	0,06	0,025	50	3	1	0,059
Moto	20	0,12	0,05	100	12	1	0,118
Voiture légère	20	0,14	0,06	200	28	1,2	0,118
Voiture lourde	20	0,21	0,09	300	64	1,7	0,125
Autobus		1,07	0,45	150	160	18	0,059
Autocar		0,71	0,30	300	213	30	0,024
Camion : 9t+15t		0,90	0,38	500	450	15	0,060
Tramway		7		100	700	123	0,057
Métro		11		100	1 100	170	0,065
RER		24		200	4 800	356	0,067
TER		9		300	2 700	84	0,107
TGV		20,5		500	10 250	458	0,045
Intercités		21		500	10 500	233	0,090
Train de fret		40		400	16 000	530	0,075

* Stock en kWh utile = pour de l'énergie à la roue. Les énergies d'usage marquées en bleu (électricité) ou en rouge (carburant) sont des consommations alternatives et non cumulables.

Le tableau 3 appelle les commentaires suivants :

- par passager.km en milieu urbain, les modes les plus économes en énergie sont les modes actifs (hors énergie d'origine alimentaire). Puis viennent les autobus et les trains de mass transit urbain à forte occupation. Les voitures lourdes (2 t) à faible occupation (1 p) sont le mode le plus dispendieux. Mais des voitures fortement occupées (4 p) sont largement compétitives avec l'autobus et avec le métro à occupation moyenne, et nettement plus économes que les autobus à occupation moyenne. Entre voiture moyennement occupée et autobus peu rempli (5 passagers, situation fréquente en soirée de jour ouvrable) le bilan énergétique est favorable à la voiture.
- en transport de voyageurs à longue portée, en intensité énergétique par p.km l'autocar suffisamment rempli est plus compétitif que le TGV rempli à 80 % et largement meilleur qu'un train intercity insuffisamment rempli.
- par t.km de chargement, les gros camions et les trains ferroviaires ont des intensités énergétiques analogues, de l'ordre de 0.07 kWh utiles.

¹⁷ compter environ 6 kg de batterie par kWh utile pour une batterie Lithium-ion de chimie NMC

D.2/ Les carburants et leur impact carbone

Un hydrocarbure est composé de molécules chimiques associant essentiellement des atomes de carbone (élément C) et d'hydrogène (élément H) : formule générique C_mH_n , avec $n \leq 4m$. Les masses atomiques respectives sont de 12 pour l'élément carbone contre 1 pour l'hydrogène : comme les proportions respectives font que n est compris entre $3m$ et $4m$, par molécule la masse de carbone soit $12.m$ est 3 ou 4 fois plus importante que la masse d'hydrogène : $1.n \leq 4m$. Après combustion, le CO_2 émis a une masse d'environ 3.5 fois celle des atomes C dans le carburant, car l'oxygène a une masse atomique de 16 relativement proche du 12 du carbone.

Comme un litre d'essence pèse environ 0.75 kg dans des conditions ordinaires de température ambiante, cette masse correspond à 0.6 kg d'élément carbone et la combustion dégage environ 2 kg de CO_2 . Pour les différents types de carburant, la masse volumique est comprise entre 70% et 150 % de celle de l'essence, donc la combustion d'un litre dégage entre 1.4 et 3 kg de CO_2 .

Mais il faut comptabiliser toutes les phases du cycle de vie du carburant : les processus et infrastructures d'extraction, transport, raffinage, distribution, constituent la partie Well-to-Tank (WTT : du puits au réservoir) qui s'ajoute à la partie TTW pour constituer l'ensemble WTW : Well-to-Wheel, du puits à la roue. Aux 2.5 kg de CO_2 par litre d'essence ou de diesel, s'ajoutent ainsi 0.53 kg CO_2e /litre pour l'essence et 0.64 kg CO_2e /l pour le diesel, en moyenne pour la France. Pour les biocarburants, la partie TTW est compensée par la capture de carbone dans la production de la biomasse, mais la partie WTT s'élève à 1.11 kg/litre pour l'essence (bioéthanol) ou 1.47 kg/litre pour le biodiesel. Le GNL, gaz naturel liquéfié, émet 1.55 kg/l en TTW de source fossile plus 0.49 en WTT, ou seulement 0.52 en WTT donc en WTW sous forme de biocarburant. Mais ce carburant est stocké à $-160^\circ C$, nécessitant un réservoir spécial dont la fabrication émet 2.3 kg CO_2e par litre de GNL (selon Carbone4).

Ces consommations de carburant sont à considérer non seulement pour les véhicules circulant sur l'infrastructure, mais aussi pour les véhicules qui œuvrent à l'infrastructure : engins de construction, transport des matériaux et des déchets de construction, véhicules de service et d'intervention.

D.3/ La production d'électricité et son impact carbone

La décomposition $WTW = WTT + TTW$ s'applique aussi à l'électricité.

Son impact carbone en TTW se réduit à celui du contenant. Notons génériquement Y l'impact carbone de la construction de la batterie en kg CO_2e / kWh utile. Notons aussi X la longueur parcourue par le véhicule électrique avec un 1 kWh utile, et N le nombre de cycles de recharge de la batterie sur son cycle de vie. Par unité de longueur, l'impact carbone de la batterie est $C = Y.X/N$ en kg CO_2e / km. Nous verrons plus loin que pour une batterie au lithium, $Y = 25$ pour une fabrication en France ou $Y = 90$ si made in China. En retenant $N = 2000$ et $X = 7$ km pour une voiture légère, alors la fabrication de la batterie induit 2.5 g CO_2e / km si Made in France ou 7 si Made in China.

L'impact carbone de la partie WTT peut être bien plus élevé car il varie grandement selon le mode de production de l'énergie : quasi-nul pour une source renouvelable hydraulique, éolienne ou solaire, mais élevé pour une centrale thermique au gaz, au pétrole ou pire encore

au charbon. Ainsi, pour un véhicule électrique alimenté par une électricité d'origine thermique, par rapport à un véhicule thermique la combustion est déportée du moteur à la centrale.

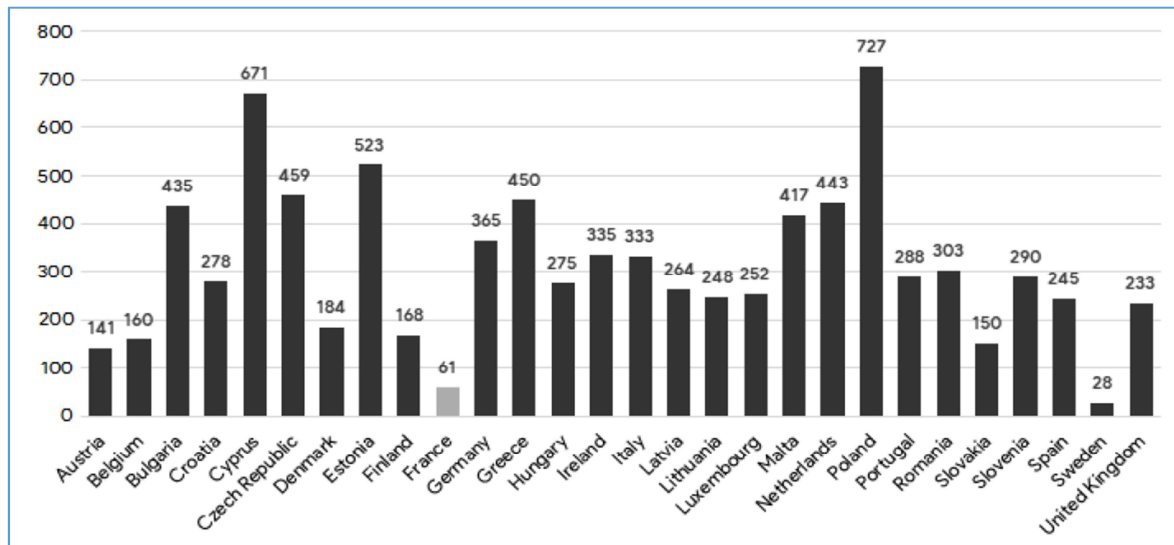


Figure 4 : Intensité carbone de l'électricité (en gCO2e/kWh) par pays de production en 2019.

Sources Ember Climate & Prié (2021).

Par pays l'électricité est produite selon un certain mix de ces diverses sources d'énergie. Son impact varie fortement selon les pays. Pour l'année 2019, parmi les pays européens la figure 4 montre un rapport de 1 à 26 entre la Suède et la Pologne ; la France à 50 gCO2e/kWh est en très bonne position, loin devant l'Allemagne⁽¹⁸⁾. Quant aux Etats-Unis et à la Chine, leurs taux en 2018 étaient respectivement de 460 et 840 gCO2e/kWh (IEA, 2019)⁽¹⁹⁾.

De plus l'impact carbone de l'électricité concerne non seulement l'usage des véhicules électriques mais aussi la fabrication et autres phases constructives pour tous les modèles de véhicules. L'article d'Ellingsen et al. (2016) étudie en cycle de vie le bilan carbone d'automobiles « représentatives » des segments A (mini), C (medium), D (grand) et F (luxe), dont les masses respectives sont nettement différenciées, en distinguant aussi selon la motorisation thermique ou électrique. A partir des résultats indiqués pour quatre scénarios contrastés de mix électrique pour les phases constructives et la phase d'usage, nous pouvons modéliser les bilans carbones de la construction : C_V pour le véhicule électrique hors batterie, C_B pour la batterie. En notant φ l'intensité carbone de l'électricité en kgCO2e/kWh, M' la masse du véhicule hors batterie (en kg) et A la capacité d'énergie de la batterie en kWh, les modèles sont proportionnels à M' ou à A , et affines en fonction de φ :

$$C_V = M'(V_0 + \dot{V}\varphi) \text{ et } C_B = A(B_0 + \dot{B}\varphi)$$

Les coefficients estimés sont $V_0 = 1.6$ (sans dimension), $\dot{V} = 5.98$ en kWh/kgCO2e, $B_0 = 74$ en kgCO2e/kWh, $\dot{B} = 88.7$ (sans dimension).

¹⁸ Dont le mix électrique est en décarbonation rapide depuis 2018

¹⁹ La prudence est de mise pour retenir une valeur d'intensité carbone pour un mix électrique. Pour l'UE en situation de 2010, l'étude de Messagie (2019) pour Transport & Environment rapporte 300 gCO2e/kWh, tandis que Ellingsen et al. (2016) mentionnent 521 g/kWh !

La figure 5 montre l'influence de l'intensité carbone du mix électrique sur les bilans carbone de la construction du véhicule hors batterie (partie gauche) et de la batterie (partie droite). Les abscisses signalées correspondent à nos trois scénarios Bas – Médian – Haut.

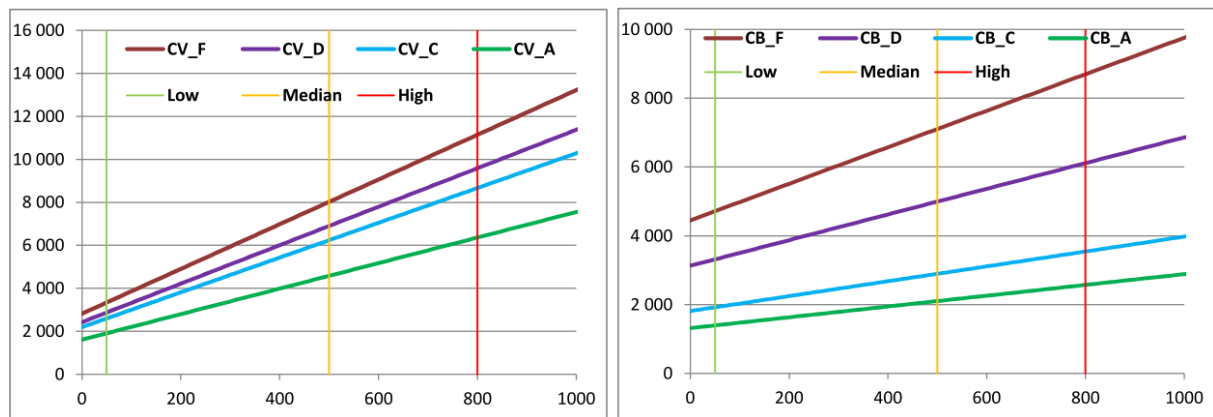


Figure 5. Bilans Carbone de la construction d'une voiture électrique hors batterie et de la batterie, en kgCO₂e. Les modèles A / C / D / F ont pour masse respective M= 1100 / 1500 / 1750 / 2100 kg et leur batterie a pour capacité respective A = 17.7 / 24.4 / 42.1 / 59.9 kWh

D.4/ La batterie électrique : cycle de vie et bilan carbone

Durant la décennie 2010, la technologie lithium-ion s'est imposée très majoritairement pour les batteries électriques des différents véhicules. Cette technologie recouvre différents types, notamment en fonction de la chimie de l'anode et surtout de la cathode : mentionnons spécifiquement la chimie NMC pour Nickel-Manganèse-Cobalt qui présente une densité énergétique relativement élevée de 0.16 kWh par kg de batterie (soit 6 kg pour 1 kWh de capacité énergétique), et la chimie LFP pour Lithium-Fer-Phosphate (LiFePO₄) dont la densité énergétique est moindre d'un tiers mais qui supporte davantage de cycles de recharge⁽²⁰⁾.

En cycle de vie, les phases constructives sont inégalement connues : on manque de recul et de connaissances quant au recyclage et à la fin de vie. Un crédit de recyclage de 55 kg CO₂e / kWh de capacité d'énergie est accordé par l'ADEME, qui compte aussi 15 kg CO₂e / kWh pour le traitement en fin de vie. Ce montant du crédit paraît correspondre à peu près à l'impact carbone d'une extraction des matériaux en Chine : environ 60 kg CO₂e / kWh de capacité de batterie, plus 10 de transport. Quant à la fabrication proprement dite de la batterie, la montée en taille des usines permet des économies d'échelle importantes⁽²¹⁾. Des impacts de 100 à 200 kg CO₂e / kWh en 2010 ont été ramenés à 20 ou 70 kg CO₂e / kWh en 2016 pour une fabrication en Chine : le 20 en chauffant au gaz naturel l'étape de séchage au cours de la fabrication, ou 75 en traitant toute la fabrication à l'électricité selon le mix chinois en vigueur. La transposition des procédés concernés dans des pays à mix électrique faiblement carboné ramènerait la fabrication à 4 kg CO₂e / kWh en Suède, ou 9 en France.

²⁰ Sur la dépendance de la densité énergétique à la chimie de la batterie, et les nombres de cycles, cf. Hao et al. (2017), Peters et al. (2017) et Messagie (2019)

²¹ En Chine l'augmentation des volumes de production permet des économies d'échelle importantes au plan économique comme au plan environnemental : l'étude ANL (2017) montre le gain d'un facteur 2 pour les « grandes » usines de 2016 par rapport aux « petites » usines de 2010.

Au total, en comptant 70 kg CO₂e / kWh d'extraction et de transport, plus de 9 à 75 pour la fabrication, plus 15 de fin de vie, moins 55 de crédit de recyclage, le bilan carbone des phases constructives sera de 39, 81 et 105 kg CO₂e / kWh en fonction du mix électrique dans le pays de fabrication.

Pour l'usage de la batterie, l'indicateur usuel de « durée de vie » est le nombre de cycles de charge (décharge et recharge) que supporte la batterie avant de perdre une certaine proportion de sa capacité nominale (²²). Les constructeurs automobiles recommandent de remplacer la batterie quand sa capacité effective a baissé de 20 % par rapport à la capacité nominale. Mais le nombre de cycles menant à une telle réduction dépend d'une part de la chimie, et d'autre part de la profondeur de décharge (DoD pour Depth of Discharge), comptée en proportion de la capacité nominale. La figure 6 montre les variations du nombre de cycles en fonction de la DoD (partie gauche), et le flux d'énergie passant par la batterie sur l'ensemble de la phase d'usage (partie droite) : cet indicateur moins connu exprime la productivité énergétique de la batterie, selon la chimie et la politique de DoD.

Enfin chaque opération de recharge entraîne des pertes d'énergie, en l'occurrence des surconsommations par rapport au flux effectivement chargé : compter environ 5 % de pertes dans la borne de recharge plus 4 % dans la batterie par échauffement durant la recharge, soit au total 9 % environ de pertes.

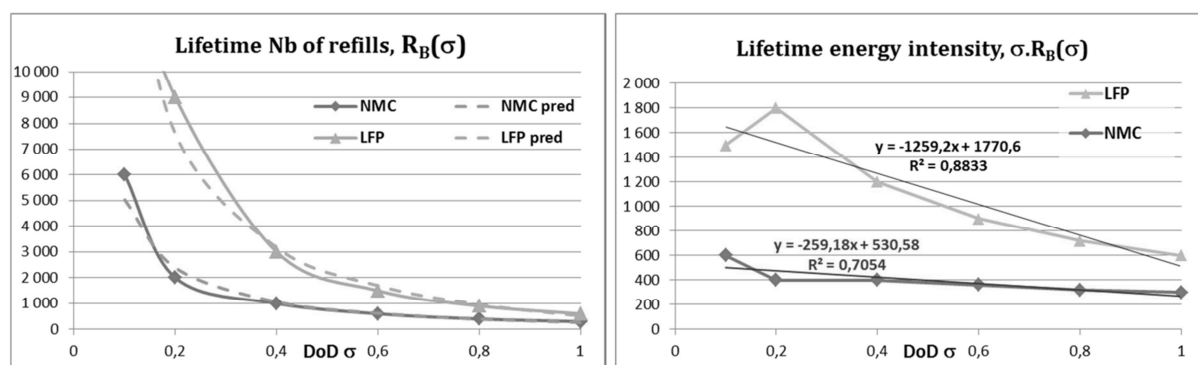


Figure 6 : Loi d'usure et Intensité énergétique en cycle de vie pour des batteries Li-Ion.

Source Leurent (2021)

D.5/ Le corps humain comme vecteur d'énergie d'origine alimentaire

La marche et le vélo mettent en œuvre de la puissance motrice humaine. De même la tâche de conduite d'un véhicule, trottinette ou automobile, entraîne une dépense d'énergie. De telles consommations d'énergie ont pour siège le corps humain : l'énergie concernée est évidemment d'origine alimentaire. La quantité peut en être estimée, ainsi que le bilan carbone associé qui dépendra du régime alimentaire de la personne concernée (²³).

Estimons d'abord les énergies dépensées par une personne selon son activité : par unité de temps, ce sont des niveaux de puissance par nature d'activité. Au repos, une personne de 70 kg dégage une puissance de 80 W. En activité de conduite automobile, la puissance passe à

²² Pour les batteries au lithium, en 2010 on supposait que ce nombre serait de l'ordre de 1000. Mais de fait il s'est avéré bien supérieur : 2000, ou même 2 500 à 3 000 : cf. Hoestra (2019) et Messagie (2019). Concernant la sensibilité du nombre de cycles à la chimie de la batterie en termes de matériaux de la cathode : cf. les études en laboratoire de Hao et al. (2017) et EEA (2018).

²³ Cf. les études ECF (2011) et TheShiftProject (2020)

160 W, soit un différentiel de 80 W imputable spécifiquement à la conduite. La marche à 5 km/h engage 280 W soit un différentiel de 200 W, et le vélo à 16 km/h engage 490 W donc 410 W pour le seul roulage en vélo, hors assistance électrique qui réduit à 340 W la puissance humaine mobilisée.

Ayant déduit la puissance au repos, il faut encore diviser par la vitesse pour obtenir des consommations d'énergie par unité de distance. Les résultats sont de 42 Wh/km pour la marche à 5 km/h, 26 ou 22 Wh/km pour le vélo à 16 km/h respectivement sans ou avec assistance électrique.

Le corps humain présente une grande inertie énergétique et la relation entre énergie dépensée et énergie ingérée par l'alimentation n'est pas directe. Mentionnons toutefois que 1 Wh équivaut à 0.83 kilo calorie (kcal) et que pour un régime alimentaire moyen en France l'impact carbone est de 1.9 g CO₂e / kcal (variant de 0.5 pour un régime végétarien à 5 pour un régime fortement carné) : retenons le taux d'impact de 1.6 g CO₂e/Wh. A ce taux, la marche émettrait 66 g CO₂e / km en dépense d'énergie d'origine alimentaire, le vélo 35 ou 41 avec ou sans assistance électrique. En assimilant la tâche de conduite d'une trottinette électrique à celle d'une automobile, le surcroît de 90 W de puissance humaine par rapport au repos pour circuler à 12 km/h de moyenne nécessite 7.5 Wh / km, soit 12 g CO₂e / km d'impact carbone de l'énergie d'origine alimentaire.

Dit autrement, l'impact carbone de la micromobilité interagit fortement avec les pratiques alimentaires. Si le régime alimentaire est abondant alors la mobilité active sert probablement de déversoir d'énergie alimentaire en excès, et il n'y a pas lieu d'intégrer l'énergie humaine dans l'impact carbone du mode. Mais si le régime alimentaire est frugal, alors il conviendrait d'intégrer l'énergie d'origine alimentaire dans le bilan carbone du mode, et ce en distinguant les types d'alimentation. Cf. Grava (2004).

E/ Le bilan carbone par unité de trafic des modes terrestres

En nous basant sur la composition technique d'un mode de transport et sur les impacts Carbone respectifs des infrastructures, des véhicules et des énergies, nous pouvons modéliser et calculer l'impact carbone intégré d'un mode : et ce, par unité de longueur parcourue, au niveau d'un véhicule ou d'une unité transportée. Nous comparerons systématiquement les versions électriques et thermiques des véhicules ; de plus, nous prendrons en compte la sensibilité au mix électrique, en considérant trois niveaux d'intensité carbone par unité d'énergie, respectivement Bas, Médian et Haut. Pour illustrer caricaturalement ces trois niveaux, en situation de 2020 nous représenterons le niveau bas par la France, le niveau médian par l'Allemagne et le niveau haut par la Chine.

Nous traiterons des principaux modes de transport terrestre de personnes, groupés par familles : micromobilité (§E.1), automobilité (§E.2), transports collectifs routiers par autobus et autocar (§E.3), transports collectifs ferroviaires (§E.4). Nous terminerons par une confrontation de ces différents modes de transport dans des conditions typiques de la France en 2020 (§E.5).

E.1/ Micromobilité

La marche et les deux roues légers : trottinettes et vélos avec ou sans assistance électrique, sont les principaux modes de micromobilité. Ces modes sont en principe individuels, donc l'utilisateur est le conducteur du déplacement. De plus il contribue pour tout ou partie à l'énergie motrice. Par déplacement le parcours sera long d'au plus quelques kilomètres, sur la voirie et en milieu principalement urbanisé.

Dans l'impact carbone il convient donc d'inclure une part individuelle de l'infrastructure viaire concernée : compter 0.6 gCO₂e/p.km.

Nous avons déjà évoqué les véhicules à deux roues que sont les trottinettes et bicyclettes : masse à vide comprise entre 10 et 15 ou 20 kg, hors batterie, et parcours de vie de l'ordre de 10 à 20 milliers de km (²⁴). Pour les phases constructives du cycle de vie, le facteur d'émission de carbone est de 6 kg CO₂e/kg MAV si la fabrication a lieu en Chine (cf. tableau 2), à affiner selon le lieu de fabrication à 1.2 si Made in France ou 4.1 si Made in Germany.

Les batteries électriques utilisées pour des trottinettes et vélos à assistance électrique ont typiquement une capacité comprise entre 0.25 et 1 kWh : en retenant la valeur pivot de 0.5 kWh, soit donc 19 kg CO₂e d'impact carbone constructif de la batterie si Made in France ou 53 si Made in China. Pour les parcours de vie nominaux du véhicule, il n'y a pas lieu de renouveler la batterie : cependant certains utilisateurs s'équipent d'une batterie supplémentaire pour rendre la recharge plus confortable. Cette recharge ne nécessite pas d'équipement spécial pour un usage de particulier, mais pour un service partagé sans station la collecte chaque soir par un véhicule de type van diesel induit un impact carbone de 1.5 g CO₂e/km parcouru et par kg de MAV, soit 18 gCO₂e/km pour un engin de 12 kg de MAV (Hollingsworth et al. 2019). Signalons que les trottinettes électriques et leurs services partagés sont des technologies encore émergentes et en évolution rapide. Entre le tout début des services partagés en 2018 et 2020, des opérateurs de services partagés tels que Lime et Tier mentionnent quatre générations technologiques : renforcement du véhicule, adoption de batteries amovibles de relativement grande capacité, adaptation du processus de recharge et des rythmes d'entretien (Lime, 2020, Voi, 2020, Bilboe, 2021).

A l'usage, les consommations d'énergie électrique sont d'environ 14 Wh/km pour une trottinette électrique et 7 Wh/km pour un VAE. Selon le mix électrique français, les émissions de carbone respectives sont de 0.7 gCO₂e/km pour la e-trottinette et 0.4 pour le e-bike (contre 11 et 5 respectivement selon le mix chinois). Dans le cas français, l'usage et l'infrastructure ont donc des impacts carbone sensiblement équivalents.

La construction mécanique est 10 fois plus émettrice en carbone : en retenant la valeur pivot de 10 000 km pour le parcours de vie, 12 kg de MAV pour une trottinette ou 15 kg pour un vélo (hors batterie) émettent respectivement 7.2 ou 9 gCO₂e/km si Made in China, tandis que 0.5 kWh de batterie rajoutent 1.9 gCO₂e/km pour une fabrication en France mais 5.3 pour une fabrication en Chine, soit +20% ou +80% sur l'impact constructif du véhicule.

Notre total provisoire, en g CO₂e / km, est de 0.6 pour la marche, 9.6 pour le vélo hors assistance électrique si Made in China ou 2.4 si Made in France, pour un VAE 14.5 si Made in China ou 4.7 si Made in France, pour une e-trottinette privative 4.6 si Made in France ou

²⁴ A réduire à 5 000 km pour un usage partagé moins soigné et potentiellement plus dégradant ?

13.8 si Made in China. La différence de masse à vide et celle de consommation d'électricité se compensent approximativement entre VAE et trottinette pour un usage en France. Donc la construction du véhicule, intégrant s'il y a lieu la batterie, représente de 80 % à 95 % de l'impact carbone par km parcouru, elle est très majoritaire. La mutualisation double l'impact pour des trottinettes partagées sans stations.

Enfin, la prise en compte de l'énergie humaine renverserait le tableau. La marche passerait de 0.6 à 67 g CO₂e / km, le vélo simple de 9.6 à 51, le VAE de 5 ou 15 à 40 ou 50 (selon que fabrication en France ou en Chine), la trottinette individuelle Made in China de 14 à 26 soit un doublement, et la trottinette partagée de 32 à 44.

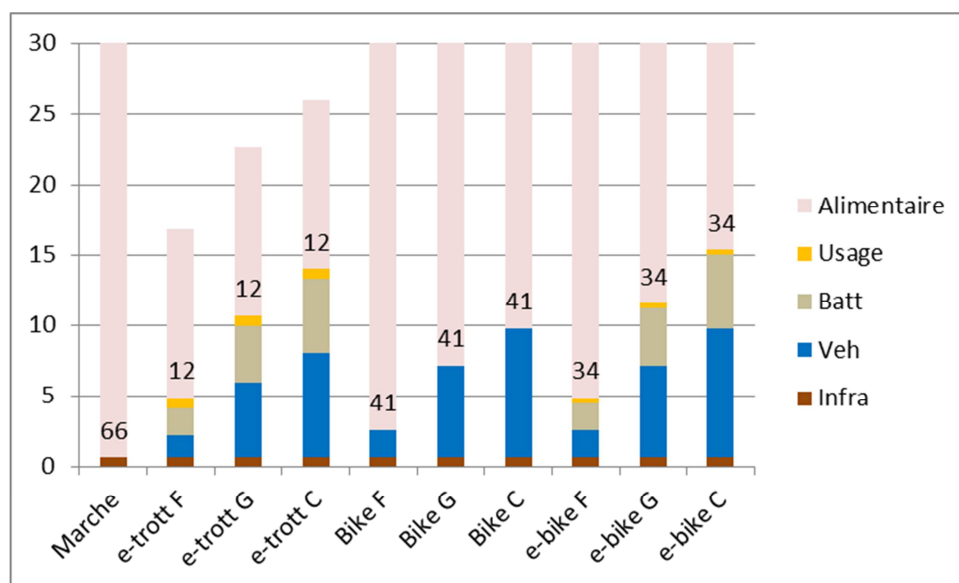


Figure 7. Composition des bilans carbonés des modes de micromobilité, en gCO₂e/p.km.

E.2/ Automobilité

Le mode automobile, au sens strict, désigne l'usage en tant que conducteur ou passager, d'une voiture, véhicule routier offrant en général de 4 à 7 places, fortement motorisé et capable de vitesses dépassant les 100 km/h. Par extension, nous considérerons aussi les deux roues fortement motorisés : scooters et motos, qui ne comptent que deux places. De tels véhicules sont très largement utilisés dans le cadre privé des ménages, mais ils peuvent aussi servir à du transport public : taxi, covoiturage etc. Nous considérerons leurs impacts par véhicule.km, par personne.km en fonction du remplissage et aussi par siège.km afin d'appréhender tout leur potentiel de mutualisation.

L'infrastructure routière est utilisée par les automobiles avec un certain mix des types de voies : en France le réseau de type autoroutier supporte un tiers du trafic des voitures, les autres voies urbaines un autre tiers et les autres voies interurbaines le dernier tiers. Les motos présentent un caractère urbain plus marqué. Les scooters n'ont accès à la voirie de type autoroutier que si la vitesse maximale y est inférieure à 80 km/h. Pour simplifier, pour tous les véhicules automobiles circulant en France, nous considérerons les deux types de voies du §B.3 pour composer une voirie routière moyenne, dont l'impact carbone est de l'ordre de 2 g CO₂e/veh.km. Par p.km l'impact passe à environ 1 g CO₂e. Pour une voiture à 5 places totalement occupée, il serait inférieur à un demi-gramme de CO₂e. Pour une moto et un scooter, l'occupation moyenne est à peine supérieure à l'unité, donc l'impact par véh.km à

considérer est celui par p.km applicable à l'ensemble des modes de transport routier de personnes.

Pour la construction du véhicule, hors éventuelle batterie, l'impact carbone spécifique est de 4 kg CO₂e par kg de masse à vide pour un véhicule au mix européen de fabrication, mais plus précisément de 1.2, 4.1 ou 5.7 selon nos trois variantes de mix. Nos hypothèses de masse à vide hors batterie sont de 80 kg pour un scooter, 180 kg pour une moto, 1 t pour une voiture légère et 2 t pour une voiture lourde. Quant aux parcours de vie, nous retiendrons 60 000 km pour un scooter, 150 000 pour une moto, 150 000 pour une voiture légère et 300 000 pour une voiture lourde. Ainsi, entre voiture légère et voiture lourde, la différence de masse à vide est compensée par le jeu des parcours de vie respectifs. L'impact carbone de la construction du véhicule représente 27 gCO₂e/véh.km pour une automobile du parc français : quasi-équivalent si fabrication en Allemagne, réduit à 8 si fabrication en France mais augmenté à 38 si fabrication en Chine. En considérant des taux d'occupation spécifiques selon le type de véhicule, les valeurs moyennes de 1.2 pour une voiture légère mais de 1.7 pour une voiture lourde avantageront les voitures lourdes pour l'impact par p.km.

Pour des véhicules électriques, nous compterons 3 kWh de capacité de batterie pour un scooter, 6 pour une moto, et pour une voiture trois niveaux respectivement de 25, 50 ou 80 kWh. A raison de 2 000 cycles de recharge et 7 km/kWh, les trois niveaux permettent d'utiliser la même batterie pour tout le parcours de vie d'une voiture légère. Mais pour une voiture lourde, il faut appliquer un ratio de 5 km/kWh, donc seules les capacités supérieures à 30 kWh permettent d'utiliser une seule batterie durant le cycle de vie, et le niveau bas nécessitera un remplacement intermédiaire de batterie. Pour une moto, à 9 km/kWh les 6 kWh de batterie suffisent pour assurer l'ensemble du parcours de vie ; de même, pour un scooter, en supposant 15 km/kWh les 3 kWh suffisent. Nous avons indiqué au §D.4 les impacts carbones de la production d'une batterie selon le pays de fabrication : respectivement 39, 81 et 105 pour la France, l'Allemagne et la Chine. Par conséquent, pour un scooter électrique, l'impact de la batterie est de 1.9 / 4.1 / 5.3 gCO₂e/km selon que Made in France / Allemagne / Chine. Pour la batterie d'une moto, 1.6 / 3.2 / 4.2 selon le pays de fabrication. Pour une voiture légère, les impacts spécifiques d'une batterie de 25 kWh (respectivement 50, 80) sont de 6.5 (resp. 12.9, 20.7) si fabriquée en France, contre 13.5 (resp. 27, 43) si fabriquée en Allemagne ou 17.5 (resp. 35, 56) si fabriquée en Chine. Pour une voiture lourde, compte-tenu des besoins de renouvellement selon les capacités de batterie, les impacts spécifiques sont de 6.5 gCO₂e/km (resp. 10.3) pour une batterie de 25 ou 50 kWh (resp. 80) si Made in France, contre 13.5 (resp. 21.6) si Made in Germany - ou 17.5 (resp. 28) si Made in China. Ainsi, selon le lieu de fabrication ou la capacité énergétique, l'impact carbone constructif de la batterie représente de 50 % à 150 % de celui du véhicule.

Concernant l'énergie d'usage, nous retiendrons 6 à 9 litres de carburant aux 100 km pour une voiture thermique selon qu'elle est légère ou lourde, et 14 à 21 kWh pour une voiture électrique légère ou lourde. Ces facteurs baissent pour une moto à 5 l/100 km en mode thermique ou 12 kWh/100 km en mode électrique, et pour un scooter à 2.5 l/100 km en mode thermique ou 6 kWh/100 km en mode électrique. En comptant grossièrement 3 kg CO₂e/litre de carburant et 60 gCO₂e/kWh à la roue pour un véhicule électrique utilisé en France (²⁵), l'impact carbone de l'usage d'une voiture légère est de 180 gCO₂e/km si thermique ou 9 si

²⁵ Cette valeur de 60 intègre 50 par unité d'énergie à la production, +10% de perte de transport, 5% de perte dans la borne et 5% de perte dans la batterie lors de la recharge, cf. Worldbank (2018) et Ellingsen et al. (2016).

électrique : valeurs à augmenter de moitié pour une voiture lourde. Pour une moto, les impacts sont de 150 gCO₂e/km si thermique ou 7 si électrique : par occupant ils sont équivalents à ceux d'une voiture légère. Les impacts pour un scooter sont deux fois moindres : 75 gCO₂e/km si thermique ou 4 si électrique.

Pour chaque mode automobile, l'impact carbone total par unité de longueur s'obtient en agrégeant les différents postes d'émission. Pour un scooter, le total en gCO₂e/véh.km varie entre 7 (électrique, fabriqué en France ainsi que sa batterie) et 83 (thermique, fabriqué en Chine). Pour une moto, le total en gCO₂e/véh.km varie entre 10 et 158 pour les mêmes conditions respectives. Pour une voiture légère, entre 23 (électrique à batterie de 25 kWh, fabriquée en France ainsi que sa batterie) et 218 (thermique, fabriquée en Chine), en passant par 61 (électrique à batterie de 25 kWh, le tout fabriqué en Chine) et 188 (thermique, made in France). Pour une voiture lourde, entre 27 (électrique, batterie de 25 ou 50 kWh, le tout made in France) et 308 (thermique, fabriqué en Chine), en passant par 70 (électrique, le tout fabriqué en Chine) et 278 (thermique, made in France).

La figure 8 montre les compositions respectives de ces indicateurs agrégés. Dans tous les cas, la part de l'infrastructure est très minoritaire. En mode thermique, l'usage est de loin le poste dominant si le carburant est d'origine fossile. En remplaçant par du biocarburant, en tenant compte de l'impact amont, l'usage resterait dominant pour un véhicule thermique made in France mais passerait derrière la fabrication pour un véhicule made in China. En mode électrique aux conditions françaises d'usage, pour les scooters et les motos l'usage domine les deux postes constructifs pour une fabrication en France, mais la fabrication en Chine rend dominants les impacts constructifs. Pour les voitures, les trois postes sont du même ordre de grandeur pour une fabrication en France, tandis qu'une fabrication en Chine produit fait dominer le véhicule puis la batterie sur l'usage.

Par personne.km l'indicateur total conserve ces valeurs pour un scooter ou une moto, mais sera divisé par un facteur 1.2 pour une voiture légère ou 1.7 pour une voiture lourde.

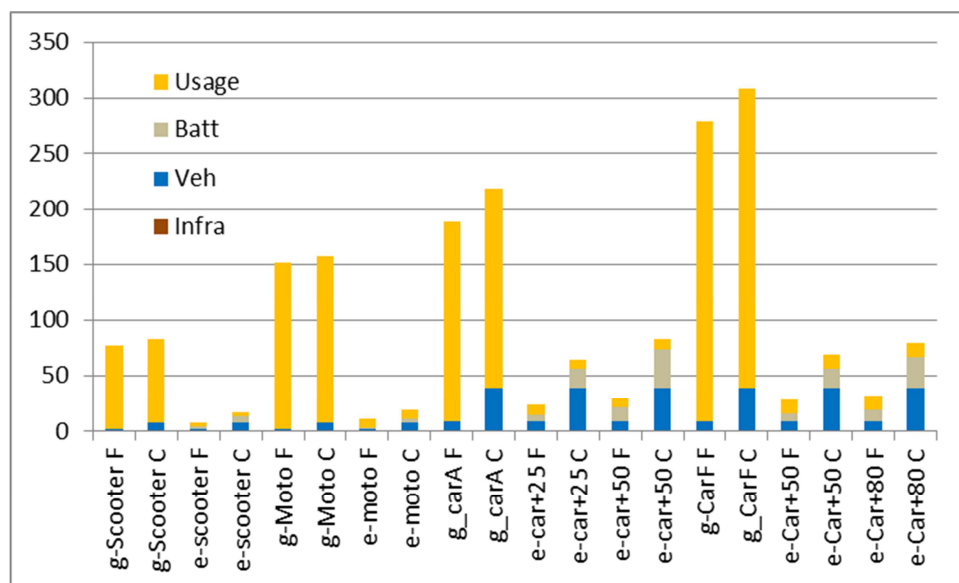


Figure 8. Composition des bilans carbonés des modes automobiles, en gCO₂e/veh.km.

N.B. Mentions « Car » pour voiture lourde et « car » pour voiture légère, F (France) pour fabrication intégralement en mix peu carboné, C (Chine) pour fabrication intégralement en mix très carboné.

Comme pour la micromobilité, on pourrait augmenter l'indicateur total par p.km d'un terme d'effort de conduite : cela s'appliquerait uniquement à un conducteur en mode manuel, mais pas à un passager. Le niveau à considérer dépendrait de la vitesse de parcours et donc du milieu urbain ou interurbain. En temps réel, la puissance humaine mobilisée pour la conduite est de 160 W contre 70 W au repos, soit un supplément de 90 W : en valorisant selon un régime alimentaire moyen, l'impact carbone spécifique est de 142 gCO₂e/h. Par unité de longueur, l'impact spécifique varierait entre 1.4 gCO₂e/km pour une conduite interurbaine à 100 km/h et 9.5 gCO₂e/km pour une conduite urbaine à 15 km/h.

E.3/ Transports collectifs routiers : autobus et autocars

Les autobus et les autocars sont des véhicules routiers destinés au transport collectif de personnes : passagers des autobus en milieu urbain ou périurbain, voyageurs des autocars pour des liaisons interurbaines. Un autobus offre des sièges et des espaces debout, il peut typiquement contenir de 40 à 60 passagers. Un autocar propose uniquement des sièges, orientés vers l'avant, ainsi que des soutes à bagages ; sa capacité typique est une cinquantaine de voyageurs.

L'infrastructure routière utilisée par les autobus comprend essentiellement des voies urbaines, afin de desservir un nombre important de stations. Les autocars utilisent des voies interurbaines à grande circulation, typiquement des autoroutes. Suivant la convention d'imputation des impacts carbone de l'infrastructure aux personnes.km, l'impact infrastructurel d'un autobus rempli en moyenne de 18 personnes s'élèvera à 11 gCO₂e/véh.km pour la France, et pour un autocar rempli en moyenne de 30 personnes à 18 gCO₂e/véh.km.

Autobus et autocars sont des véhicules de masse importante (à vide et hors batteries) : de l'ordre de 11 tonnes pour un autobus simple et 13 tonnes pour un autocar. En cycle de vie et hors énergie d'usage, l'impact carbone du véhicule dépend de la masse à vide et du mix électrique du pays de fabrication : aux conditions françaises, 14 t CO₂e pour un autobus et 16 pour un autocar, contre 47 et 53 aux conditions allemandes et 66 et 74 aux conditions chinoises. Ces montants sont à rapporter aux parcours de vie respectifs, estimés à 500 000 km pour un autobus et 800 000 pour un autocar. Il en résulte un impact carbone spécifique de 28 gCO₂e/km pour un autobus (si construit en France, ou 94 si en Allemagne ou 131 si en Chine), et de 20 gCO₂e/km pour un autocar (si construit en France, ou 66 si en Allemagne ou 93 si en Chine)

La motorisation électrique est devenue une option réaliste pour les autobus ; elle reste virtuelle pour des autocars. Le dimensionnement des batteries s'analyse comme suit : entre deux recharges la longueur à parcourir, ℓ_B , est de 150 km pour un autobus ou 400 pour un autocar. Les consommations électriques χ_V^E équivalentes aux consommations de carburant typiques sont de 1.1 kWh/km pour un autobus ou de 0.7 pour un autocar : la capacité de batterie doit atteindre $\ell_B \cdot \chi_V^E$ soit, en ajoutant 20% de marge, 168 kWh pour un autobus et 676 kWh pour un autocar. En comptant 2000 cycles de recharge pour une batterie, son parcours de vie sera de $L_B = 2000 \ell_B$ soit 300 000 km pour un autobus ou 800 000 pour un autocar. Pendant la vie du véhicule, les batteries dimensionnées selon L_B seront à investir 2 fois pour un autobus et une seule fois pour un autocar. Ainsi, les capacités de batterie comptées pour l'ensemble du cycle de vie du véhicule atteindront 336 kWh pour un autobus et 676 kWh pour

un autocar. A raison de 39 kgCO₂e/kWh aux conditions françaises de fabrication et de recyclage (resp. 81 en Allemagne et 105 en Chine) les montants d'impact carbone des batteries seront de 13 t CO₂e/véh pour un autobus aux conditions françaises (resp. 27 en Allemagne et 35 en Chine) et de 26 t CO₂e/véh pour un autocar aux conditions françaises (resp. 55 en Allemagne et 71 en Chine).

A localisation identique de fabrication entre batterie et corps du véhicule, les impacts de leurs phases constructives respectives sur l'ensemble de la vie du véhicule se situent de 1 à 5 entre batterie et véhicule pour un autobus en France (resp. de 1 à 2.5 en Allemagne et de 1 à 2 si en Chine), et de 1 à 3 pour un autocar en France (resp. de 1 à 2 en Allemagne et en Chine). En bref, la motorisation électrique augmente considérablement l'impact carbone des phases constructives du véhicule. Pour un véhicule fabriqué en France mais équipé de batteries construites en Chine, le surcroît s'élèverait à +250 % (autobus) ou à +450 % (autocar).

Quant à l'énergie d'usage, les consommations déjà mentionnées pour des véhicules électriques sont équivalentes à des consommations de carburant de 45 l / 100 km ou 30 l / 100 km pour des autobus ou autocars à moteur thermique. Pour du carburant diesel d'origine fossile à environ 3 kg CO₂e/litre, les impacts par unité de longueur s'élèvent à 1.35 kg CO₂e/km pour un autobus et à 0.9 pour un autocar. Pour un mix électrique aux conditions françaises, les impacts spécifiques sont de 64 gCO₂e/km pour un autobus et 43 pour un autocar.

Le tableau 4 intègre l'impact carbone du mode par véhicule et par unité de longueur, et en tire l'impact carbone modal par personne transportée et par unité de longueur. Aux conditions françaises d'usage et de fabrication, l'impact carbone du mode est de près de 1400 gCO₂e/véh.km pour un autobus thermique et 930 pour un autocar thermique, contre seulement 111 pour l'autobus électrique et 80 pour l'autocar électrique. Autrement dit, la motorisation électrique permet de gagner un facteur 10 en efficacité carbone pour les transports collectifs routiers aux conditions françaises.

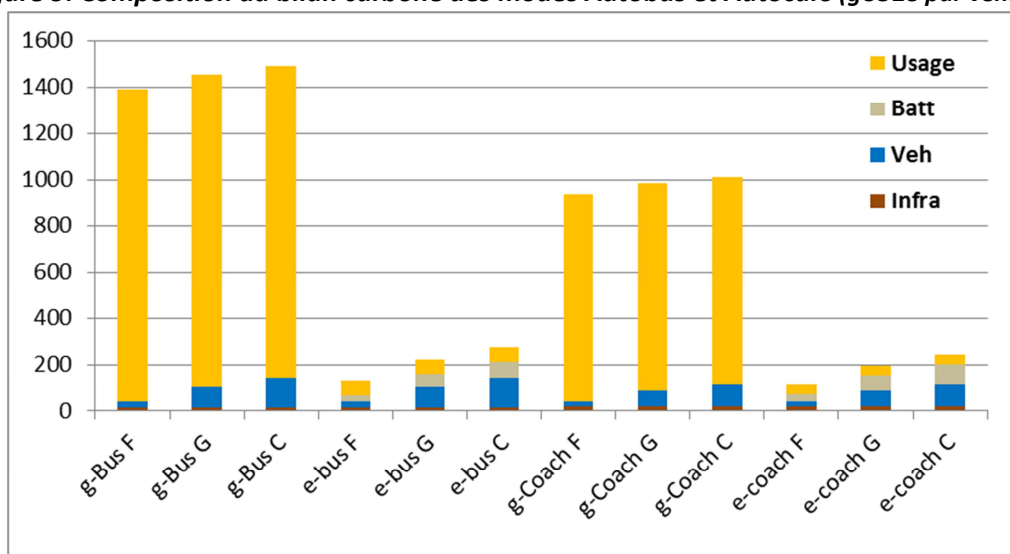
Par passager, les totaux sont de 77 g CO₂e/km en autobus thermique contre 7 en autobus électrique, et de 31 en autocar thermique contre 4 en autocar électrique. La fabrication des matériels influence très sensiblement les performances modales des versions électriques : pour un usage en France, la fabrication en France a un impact carbone équivalent à la moitié de l'impact de l'usage, mais le rapport monte à 2.5 pour une fabrication en Allemagne ou à 3 si en Chine. Cependant, quel que soit le lieu de fabrication, l'électrique présente un avantage carbone très important, tant que l'usage a lieu dans un pays au mix électrique peu carboné. Dans un pays au mix électrique fortement carboné l'avantage est encore consistant (réduction d'un tiers).

Entre thermique et électrique aux conditions françaises donc, la part relative de l'usage est sensiblement infléchie : 95 % en thermique contre 4% pour la fabrication du matériel et 1 % pour celle de l'infrastructure ; tandis qu'en mode électrique, la part de l'usage descend à 48 %, ce qui porte à 40 % la fabrication des matériels (supposés fabriqués en France) et à 12 % la part de l'infrastructure. Autrement dit, en mode électrique les « émissions grises » équilibrent les émissions d'usage.

Mode	g CO2e par véhicule.kilomètre					g CO2e par passager.kilomètre				
	Infra	Veh	Batt	Usage	Total	Infra	Veh	Batt	Usage	Total
g-Bus F	10,8	28,0	0,0	1 350	1 389	0,6	1,6	0,0	75	77,2
g-Bus G	10,8	93,6	0,0	1 350	1 454	0,6	5,2	0,0	75	80,8
g-Bus C	10,8	131,1	0,0	1 350	1 492	0,6	7,3	0,0	75	82,9
e-bus F	10,8	28,0	26,1	64	129	0,6	1,6	1,4	3,6	7,2
e-bus G	10,8	93,6	54,5	64	223	0,6	5,2	3,0	3,6	12,4
e-bus C	10,8	131,1	70,8	64	277	0,6	7,3	3,9	3,6	15,4
g-Coach F	18	19,8	0,0	900	938	0,6	0,7	0,0	30	31,3
g-Coach G	18	66,1	0,0	900	984	0,6	2,2	0,0	30	32,8
g-Coach C	18	92,7	0,0	900	1 011	0,6	3,1	0,0	30	33,7
e-coach F	18	19,8	32,7	43	113	0,6	0,7	1,1	1,4	3,8
e-coach G	18	66,1	68,5	43	195	0,6	2,2	2,3	1,4	6,5
e-coach C	18	92,7	88,9	43	242	0,6	3,1	3,0	1,4	8,1

Tableau 4. Bilan carbone des modes Autobus et Autocars.

Figure 9. Composition du bilan carbone des modes Autobus et Autocars (gCO2e par véh.km).



Notons enfin l'influence du type de parcours donc de la géographie du transport, en lien avec le remplissage du véhicule donc l'économie du transport : par personne.km, un autobus rempli de 18 passagers émet 2 fois plus de carbone qu'un autocar à 30 passagers. Le taux de remplissage du véhicule est le facteur primordial de ce rapport, car par véhicule.km l'avantage de l'autocar est limité à un tiers.

E.4/ Transports ferroviaires de personnes

Pour le transport de personnes, les modes ferroviaires sont fortement collectifs et leurs véhicules respectifs peuvent accueillir à bord des nombres importants de personnes : les capacités se comptent en centaines de passagers par rame de métro, de train suburbain ou interurbain (TGV ou intercity).

Nous avons déjà évoqué la diversité des impacts carbone de l'infrastructure ferroviaire, cf. §B.4. Par véhicule et par unité de longueur parcourue, des repères quantitatifs sont 2.2 kg CO2e/véh.km pour le métro parisien, 1.2 pour un tramway en Ile-de-France, 2.0 pour un TGV, 1.0 pour un autre train interurbain (« intercity »), en intégrant dans le bilan le génie civil initial réparti sur 100 ans. Mais en l'héritant du passé, cet impact baisse à 440 g CO2e/véh.km pour un TER et même à 100 g en Ile-de-France pour un RER.

En ce qui concerne le matériel roulant, les masses à vide sont colossales : par rame, 55 tonnes pour un tramway, 130 pour un métro, 288 pour un RER duplex, 180 pour un TER, 385 pour un TGV, 426 pour un train intercity. Les parcours de vie se comptent en millions de km en raison des vitesses typiques et en supposant une durée de vie de 30 ans : 1,5 pour un tramway, 2 pour un métro, 3 pour un RER et 5 pour un TER, 9 pour un train intercity et 15 pour un TGV. Les impacts carbone des phases constructives indiqués dans la partie C sont relatifs à des fabrications en Europe, pour un mix électrique européen. Nous pourrions leur appliquer des facteurs de 30 %, 102 % et 143 % pour simuler des fabrications respectivement en France, en Allemagne et en Chine. Cependant, compte-tenu des parcours de vie, la construction du matériel roulant est nettement minoritaire dans le bilan carbone du mode et nous évaluerons seulement une fabrication européenne.

Quant à l'énergie d'usage, nous supposons que l'utilisation a lieu en France. La consommation moyenne d'énergie utile, à la roue, en kWh par km et par rame, est de 7 pour un tramway, 11 pour un métro, 9 pour un TER, 24 pour un RER francilien, 20.5 pour un TGV et 21 pour un train intercity.

En mode électrique, la structure du réseau ferroviaire se prête à une logistique économe de l'énergie pour le transport et la distribution de l'électricité venant alimenter les trains ⁽²⁶⁾ : cela abaisse de 12 % le facteur d'intensité carbone de l'énergie consommée à la roue par un train en France, pour aboutir à 43 g CO₂e / kWh. En appliquant ce facteur, nous obtenons des impacts carbone de l'énergie d'usage de 307 g CO₂e / km pour un tramway, 473 pour un métro, 387 pour un TER, 1032 pour un RER, 880 pour un TGV et 1003 pour un train intercity.

Alternativement au mode électrique, nous pouvons simuler une motorisation diesel : en appliquant un facteur 3 à la consommation d'énergie à la roue, nous obtenons la consommation au niveau du réservoir pour un train diesel, à hauteur de 27 kWh par km pour un TER. A raison de 9 kWh / litre de diesel la consommation est de 3 l par km, et en comptant 3 kg CO₂e/l nous obtenons un impact carbone de 9 kg CO₂e/train.km.

Le tableau 5 rassemble les valeurs des différents postes d'impact pour chaque type de train. En mode électrique, par train.km la quantité de carbone émise va de 1 à 3 kg CO₂e. Par personne.km les niveaux sont compris entre 4 et 17 g CO₂e, donc globalement bas. Parmi ces valeurs, les plus fortes sont associées à une infrastructure nouvellement investie, i.e. qui n'est pas héritée d'un cycle séculaire antérieur. Mais si l'on bénéficie d'un tel héritage, alors c'est l'impact de l'énergie qui est majoritaire. Quant au matériel roulant, il a une part minoritaire qui représente de 10 à 20 % du total.

Le niveau « modéré » de l'impact carbone des modes ferroviaires dépend crucialement de leur motorisation électrique et de la performance bas carbone du mix électrique en France. Avec une motorisation diesel, l'impact du mode TER (train régional hors Ile-de-France au remplissage relativement modeste) serait 10 fois plus élevé et dépasserait celui du mode automobile en version électrique.

De manière assez similaire, en remplaçant le mix électrique français par un mix électrique fortement carboné tel que celui existant en Pologne, l'émission de carbone du poste Energie

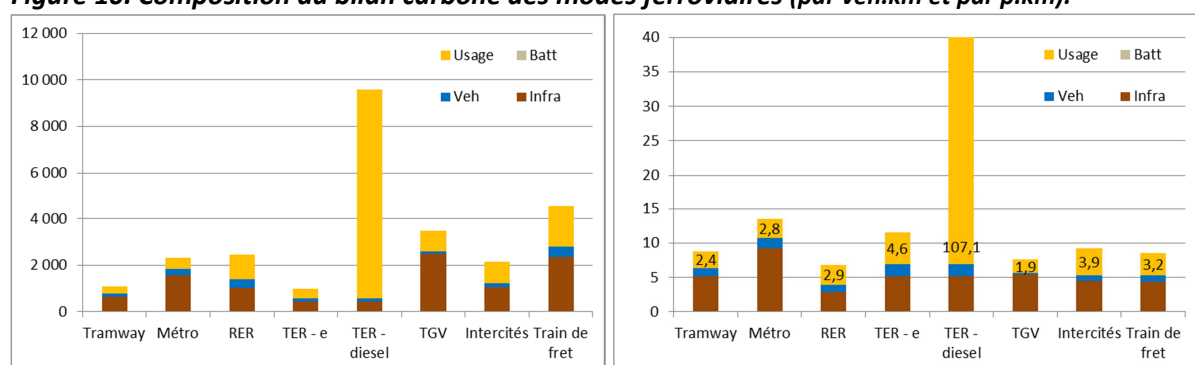
²⁶ Le freinage régénératif est déjà inclus dans les statistiques ferroviaires de consommation

serait multipliée par un facteur de plus de 15 pour les modes électriques, conduisant à des montants triples ou quadruples pour l'impact carbone unitaire.

Mode	g CO2e par véhicule.kilomètre					g CO2e par passager.kilomètre				
	Infra	Veh	Batt	Usage	Total	Infra	Veh	Batt	Usage	Total
Tramway	640	147	0	301	1 088	5,2	1,2	0,0	2,4	8,8
Métro	1 570	260	0	473	2 303	9,2	1,5	0,0	2,8	13,5
RER	1 020	384	0	1 032	2 436	2,9	1,1	0,0	2,9	6,8
TER - e	440	144	0	387	971	5,2	1,7	0,0	4,6	11,6
TER - diesel	440	144	0	9 000	9 584	5,2	1,7	0,0	107,1	114,1
TGV	2 500	101	0	882	3 483	5,5	0,2	0,0	1,9	7,6
Intercités	1 050	191	0	903	2 144	4,5	0,8	0,0	3,9	9,2
Train de fret	2 340	460	0	1 720	4 520	4,4	0,9	0,0	3,2	8,5

Tableau 5. Bilan carbone des modes ferroviaires.

Figure 10. Composition du bilan carbone des modes ferroviaires (par véh.km et par p.km).



E.5/ Confrontation multimodale

Nous avons estimé les émissions de carbone par unité de longueur pour les principaux modes de transport terrestre de personnes, rangés en 4 familles modales respectivement (i) de micromobilité, (ii) automobilité, (iii) transports collectifs routiers et (iv) transports collectifs ferroviaires. Chaque famille comprend plusieurs types modaux, et pour chaque type modal l'indicateur d'impact carbone dépend fortement des spécifications détaillées telles que la masse à vide du véhicule, son remplissage en passagers, et le vecteur énergétique. Par unité de longueur parcourue pour une personne, les impacts des différents modes sont comparables à titre indicatif, dans une première approche de nature agrégée qui préfigure des applications plus fines par situation d'usage (cf. Appendice 2).

Afin de synthétiser les performances bas carbone respectives des modes de transport de personne, définissons une échelle qualitative à 7 niveaux de A à G de la manière suivante, en gCO2e/p.km :

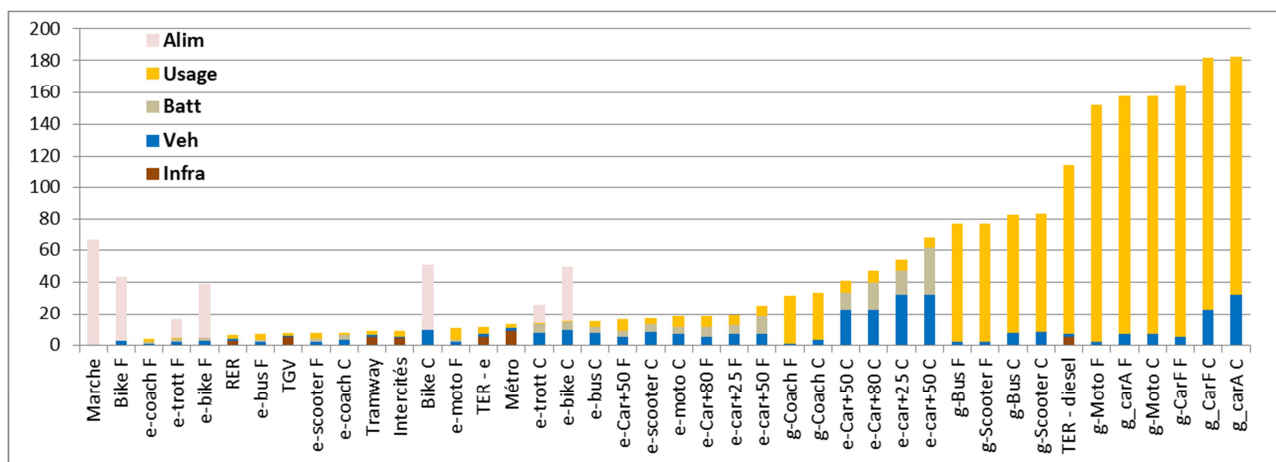
- A : impact < 20,
- B : $20 \leq \text{impact} < 50$,
- C : $50 \leq \text{impact} < 100$,
- D : $100 \leq \text{impact} < 150$,
- E : $150 \leq \text{impact} < 200$,
- F : $200 \leq \text{impact} < 300$,
- G : impact ≥ 300 .

Selon cette échelle de performance, les modes de micromobilité hors énergie alimentaire et les modes collectifs électriques obtiennent la note A. Parmi les modes automobiles, les 2 roues fortement motorisés peuvent atteindre la note A en version électrique fabriquée dans un pays au mix électrique très favorable (tel que la France), mais dans d'autres conditions la note peut descendre jusqu'à C pour un scooter ou D pour une moto. Les voitures électriques peuvent atteindre la note A si la construction et l'usage bénéficient d'un mix électrique favorable et sous réserve d'un recyclage important ⁽²⁷⁾, mais leur note descend à C dans des conditions défavorables d'usage et de fabrication, ou de recyclage. Quant aux transports collectifs routiers, leurs notes varient de A en version électrique favorable à C pour un autobus ou B pour un autocar – et ce pour des niveaux de remplissage en moyenne française de 2019. Enfin, la bonne note des transports ferroviaires en version électrique favorable est remplacée par un D en version diesel fossile pour un train régional moyen hors Ile-de-France.

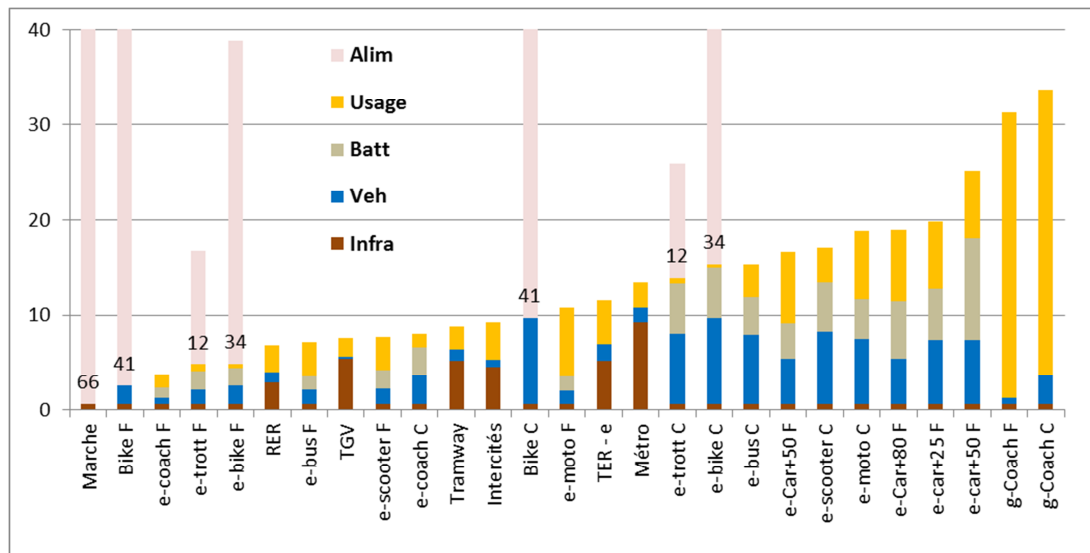
Pour tous les modes terrestres, l'impact spécifique (essentiellement constructif) de l'infrastructure est très modeste : inférieur à 1 g CO₂e / p.km pour la route, et cantonné entre 1 et 5 g pour l'infrastructure ferroviaire selon que l'investissement initial séculaire est hérité du passé ou non.

Parmi les modes, la micromobilité se distingue par une grande frugalité si l'on exclut l'énergie alimentaire ; mais en l'incluant alors la note du mode baisse à B. Pour tous les autres modes, les meilleures notes sont toutes associées à des motorisations électriques, couplées à un usage et à une fabrication dans un pays au mix électrique peu carboné tel que la France, et avec un haut niveau de recyclage. En supposant que ces conditions soient satisfaites, et pour les niveaux de remplissage prévalant en France, alors les modes collectifs routiers et ferroviaires auront une performance carbone sensiblement équivalente, et meilleures que celles des voitures par un facteur 4 ou 5. Autrement dit, entre des modes électriques, il faudrait remplir 4 ou 5 places dans une voiture pour la rendre sensiblement équivalente aux modes collectifs en termes d'impact carbone.

Figure 11. Bilans carbone des modes terrestres de transport de personne (par p.km).



²⁷ En l'absence de recyclage, la fabrication en France des véhicules et des batteries produirait sensiblement le même impact carbone qu'une fabrication en Chine avec recyclage



N.B. Mention « Car » pour Voiture lourde et « car » pour Voiture légère, F (France) pour fabrication intégralement en mix peu carboné, C (Chine) pour fabrication intégralement en mix carboné

Conclusion

La valeur pour le climat d'une infrastructure de transport terrestre ne réside pas, ou à peine, dans les émissions de carbone induites par sa construction et sa maintenance. Cette émission est de l'ordre du gramme de CO₂e par passager.km. La valeur réside essentiellement dans la « bonne performance » (productivité efficiente) de sa fonction de circulation en termes de volume de trafic écoulé et d'impacts carbone en cycle de vie des véhicules concernés, principalement dans leur usage et accessoirement dans leur fabrication.

L'étude quantitative de l'impact carbone des modes de transport terrestre au moyen d'un indicateur d'efficacité en g CO₂e / personne.km débouche sur un grand constat : pour des conditions d'utilisation typiques de la France, les meilleures performances sont atteintes par les véhicules à motorisation électrique, depuis la micromobilité jusqu'au transport ferroviaire en passant par l'automobile et les transports collectifs routiers.

Encore faut-il assurer l'alimentation en électricité de tous ces véhicules. Pour les engins de micromobilité la recharge au domicile est une solution évidente ; pour les trains, l'alimentation électrique par la voie ferroviaire est une technologie bien établie qui permet par surcroît une logistique économe de cette énergie ; pour les véhicules automobiles y compris les autobus et autocars, il faut disposer de solutions de recharge le long de l'infrastructure. Ainsi, pour servir la mobilité de manière durable non seulement au plan technique mais aussi au plan climatique, il faut envisager les infrastructures de transport dans une perspective élargie : l'infrastructure doit assurer la circulation et aussi pouvoir fournir de l'électricité.

Plus profondément, dans cette perspective élargie, nous pouvons considérer que le transport durable nécessite une méta-infrastructure comprenant l'infrastructure de transport ainsi que celle de production d'énergie et de sa distribution jusqu'aux véhicules. Et ce couplage entre infrastructure de transport et infrastructure énergétique permet des effets de systèmes telle que la logistique économe de l'électricité au sein du réseau ferroviaire interurbain.

Au-delà d'une telle méta-infrastructure de transport, dont l'importance est d'ordre 1 pour la performance bas carbone de la mobilité, nous pourrions considérer une méta-infrastructure

d'ordre 2 comprenant de plus la fabrication industrielle des véhicules, ainsi que celle des éléments des infrastructures de transport et d'énergie. Après avoir récolté les gains de l'électrification de l'usage, c'est en optimisant de manière systémique la méta-infrastructure d'ordre 2 que l'on pourra améliorer encore davantage la performance bas carbone de la mobilité.

Les méta-infrastructures des deux ordres mobilisent l'économie circulaire à plusieurs niveaux : que ce soit dans l'enchaînement des cycles d'usage pour les véhicules, les batteries et bien sûr l'infrastructure, ou dans la réhabilitation des véhicules et des éléments d'infrastructures, ou dans la récolte d'énergies renouvelables, ou dans le recyclage des matières pour les véhicules, les batteries et les infrastructures. Les technologies de l'électricité se prêtent parfaitement à une telle économie circulaire. Pour les technologies des moteurs thermiques et des carburants associés, il reste à trouver des « symbioses efficaces » : dans la production de biocarburants, dans leur « distribution industrielle » en s'appuyant sur les infrastructures structurantes de transport et dans leur distribution de détail aux véhicules utilisateurs.

Bibliographie

ADEME (agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie) (2010+), Guide des facteurs d'émissions. https://www.bilans-ges.ademe.fr/documentation/UPLOAD_DOC_FR/index.htm et <https://data.ademe.fr/datasets/etude-facteurs-d'emissions-des-differents-modes-de-transport-routier> et [https://data.ademe.fr/datasets/base-carbone\(r\)](https://data.ademe.fr/datasets/base-carbone(r)).

ADEME & SNCF (2009) 1er Bilan Carbone ® Ferroviaire Global: la Ligne à Grande Vitesse Rhin-Rhône au service d'une Europe durable. Rapport d'étude, 15 pages.

ANL Argonne National Laboratory (2017) Update of LCA of Lithium-ion batteries in the GREET Model, 2017: <https://publications.anl.gov/anlpubs/2017/12/140637.pdf>

Bilboe, Connor (2021). How green are Europe's scooter startups? From swappable batteries to carbon emissions, here's how Europe's scooter startups compare on sustainability. 26 Aug. 2021. <https://sifted.eu/articles/electric-scooter-green-comparison-2021/>

Dai, Q., Dunn, J., Kelly, J. C. and Elgowainy, A. (2017) Update of Life Cycle Analysis of Lithium-ion Batteries in the GREET Model. Technical report, 18 pages. https://greet.es.anl.gov/publication-Li_battery_update_2017

ECF (2011) European Cyclists' Federation. https://ecf.com/system/files/Quantifying_CO2_savings_of_cycling.pdf

EIA (2021) US Environmental Agency. Key World Energy Statistics. Statistical report, 81 p. <https://www.iea.org/reports/key-world-energy-statistics-2020>

Ellingsen, Linda Ager-Wick et al (2016) The size and range effect: lifecycle greenhouse gas emissions of electric vehicles. Environ. Res. Lett. 11 054010.

Faria, R. et al. (2013) Impact of the electricity mix and use profile in the life-cycle assessment of electric vehicles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 24, pp. 271-287.

Grava, Sigurd (2004). *Urban Transportation Systems*. McGrawHill, 807 pages.

Hao, H., et al (2017) GHG emissions from the production of lithium-ion batteries for electric vehicles in China. *Sustainability*, 9(4), p. 504. <https://www.mdpi.com/2071-1050/9/4/504>

Hoestra, A. (2019) The Underestimated Potential of Battery Electric Vehicles to Reduce Emissions. *Joule*, 3, pp. 1412-1414.

Hollingsworth, Joseph, Copeland B. and Johnson J.X. (2019). Are e-scooters polluters? The environmental impacts of shared dockless electric scooters. *Environ. Res. Lett.* 14, 084031 DOI 10.1088/1748-9326. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/ab2da8/pdf>

IVL (2019) Lithium-Ion Vehicle Battery Production: Status 2019 on Energy Use, CO 2 Emissions, Use of Metals, Products Environmental Footprint, and Recycling. <https://www.ivl.se/download/18.14d7b12e16e3c5c36271070/1574923989017/C444.pdf>

Leurent, Fabien (2021) What is the Value of Swappable Batteries for a Shared e-Scooter Service (S3)? ENPC Working paper, 32 pages.

Lime (2020) Lime Announces New Paris Swappable Battery Pilot At Station F To Advance Sustainability Of Electric Scooters. Authored by Matt Wille on 03/01/2021. <https://www.li.me/second-street/lime-announces-new-paris-swappable-battery-pilot-at-station-f-to-advance-sustainability-of-electric-scooters>

Message, A. (2019) https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/publications/TE_-_draft_report_v04.pdf

Morize, Xavier (2020) Contributions à une approche patrimoniale pour la voie ferrée de tramway. Thèse de doctorat de l'Université Paris-Est, soutenue le 19 juillet 2020, 291 pages. tel-03291396f

Morize, X. & Leurent, F. (2019) Analysis of the age at renewal of a tramline track. ENPC-LVMT Working paper, 20 pages.

Peters, J., Baumann, M., Zimmermann, B., Braun, J., Weil, M (2017) The environmental impact of Li-Ion batteries and the role of key parameters – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 67, p. 491-506.

Prié, Enguerrand (2021) Réduire l'empreinte carbone des transports par l'évaluation et l'expérimentation : finalités et limites des nouveaux instruments de l'action publique. Mémoire de mastère Politiques Publiques et Action pour le Développement Durable, ENPC-AgroParisTech, 126 p.

TheShiftProject (2020) Etude comparative de l'impact carbone de l'offre de véhicules. Rapport d'étude, 90 pages. https://theshiftproject.org/wp-content/uploads/2020/02/2020-02-04_%C3%89tude-de-limpact-carbone-de-loffre-de-v%C3%A9hicules_V1.pdf

T&E (2020), *How clean are electric cars? T&E's analysis of electric car lifecycle CO2 emissions*. Briefing paper, 33 pages.

[https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/downloads/ T&E's EV life cycle analysis LCA.pdf](https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/downloads/T&E's%20EV%20life%20cycle%20analysis%20LCA.pdf)

<https://www.transportenvironment.org/news/ev-batteries-are-getting-cleaner-and-cleaner-2-3-times-better-2-years-ago>

Voi (2020) The Portable Powerhouse: Why Swappable Batteries Are the Way to Go. 17 Dec. 2020. <https://www.voiscooters.com/blog/why-swappable-batteries-are-the-way-to-go/>

Worldbank (2018) <https://data.worldbank.org/indicator/eg.elc.loss.zs>

Appendice 1 : Mode de transport intégrateur du service et des impacts

Par définition, un « mode de transport » est une technique pour déplacer des personnes ou des biens. Nous appelons « passagers » ou « usagers » les personnes utilisatrices d'un service de transport. De par le transport, les entités « usagers » seront déplacées, elles sont donc des « entités mobiles ». En tant que technique pour produire un service, un mode de transport est une combinaison spécifique entre trois composantes :

- **V** : les « véhicules » sont des entités mobiles pour prendre en charge des entités « usagers » ou « produits ». Leurs fonctions principales sont de contenir des personnes ou des biens et de les mouvoir. Plus finement, nous pouvons distinguer 8 qualités que peut offrir un véhicule : (i) contenance, (ii) confort, (iii) sécurité, (iv) solidité, (v) frugalité, (vi) motricité, (vii) connectivité, (viii) serviabilité.
- **I** : l'infrastructure, objet matériel situé dans l'espace, assurant des fonctions de circulation, d'accès et stationnement pour les véhicules qui l'utilisent. Plus précisément, nous pouvons distinguer 7 fonctions assurées par l'infrastructure : (i) support mécanique, (ii) traitement de l'énergie, (iii) signalisation, (iv) gestion d'accès et guidage au sol, (v) gestion du trafic, (vi) gestion de la sécurité, (vii) stationnement des véhicules, montées et descentes des usagers-passagers des véhicules, attentes d'embarquement et intermodalité.
- **P** : pour « processus ». Un processus est un traitement complexe qui fait intervenir divers moyens techniques et des agents. Parmi les processus figurent primordialement le remplissage du véhicule en entités transportées, et la circulation du véhicule sur l'infrastructure, en plus de la logistique infrastructurelle déjà évoquée. Les services de transport reposent sur des processus qui engagent les infrastructures et les véhicules, entre autres ressources : agents, télécommunications, participation des usagers etc. Nous pouvons distinguer des processus « offline » de (i) conception et (ii) construction, et des processus « online » : (iii) entretien et maintenance, (iv) intervention d'urgence, (v) exploitation d'infrastructure en régime courant, (vi) exploitation de transport collectif, (vii) exploitation de transport à la demande, (viii) commercialisation.

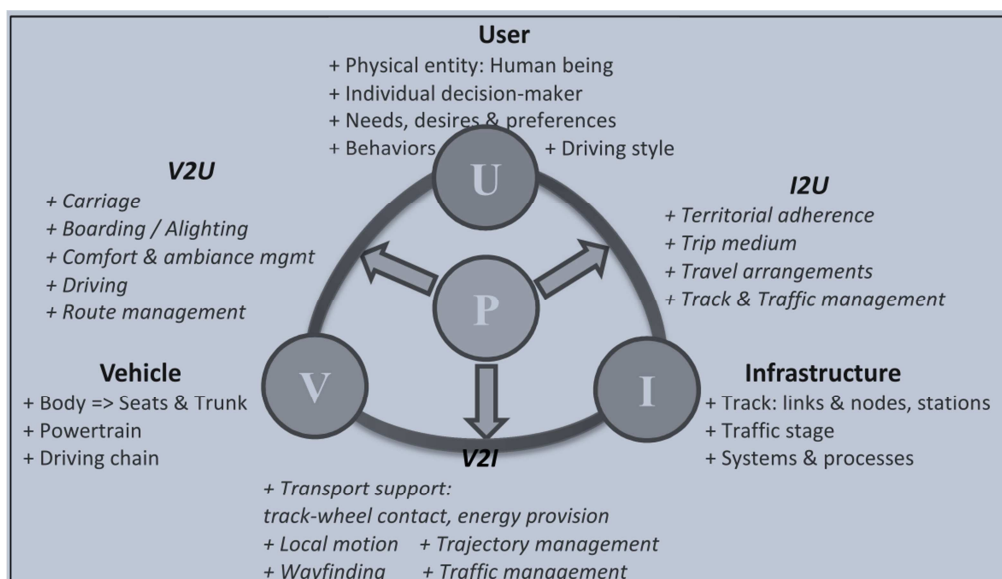


Fig. 14. Modèle Véhicule-Infrastructure-Processus d'un mode de transport.

La figure 14 illustre ce modèle VIP d'un mode de transport, en marquant les caractéristiques essentielles de ces composantes ainsi que les interactions typiques entre les composantes. Pour plus de détail sur les différentes fonctions, on pourra se reporter à Leurent et al. (2018).

Appendice 2 : Modèle comptable

Nous allons exprimer les considérations des parties A et B dans un modèle mathématique, avec des notations et des formules afin de tracer explicitement les variables physiques, les facteurs, les influences physiques, ainsi que les conditionnements spécifiques d'ordre technologique, logistique et géographique. Nous poserons d'abord le modèle comptable de l'infrastructure dans ses phases constructives (§a), puis le modèle du véhicule également dans ses phases constructives (§b), avant de considérer l'usage et ses énergies (§c). Nous pourrons alors formuler l'impact intégré d'un mode de transport par unité de longueur parcourue (§d). La figure X donne le schéma d'assemblage du modèle. A certains endroits du modèle nous spécifierons des variables : afin de modéliser la consommation d'énergie à la roue ou au réservoir, et d'attribuer l'impact infrastructurel par passager.km soit par le véhicule soit directement. L'explicitation du modèle nous permettra d'en discuter la portée et les limites (§e) : nous commenterons spécialement la diversité des modes et leur comparabilité (§f), ainsi que l'adaptation du modèle aux situations d'usage de la mobilité (§g).

Table des notations

Q pour une quantité d'impact

φ pour un facteur physique d'impact : en masse de carbone par unité de masse de matière ou unité d'énergie

c, u index de phase de cycle de vie : constructive (c) ou d'usage (u)

I, V, B index de sous-système Infrastructure, Véhicule ou Batterie

a/ Modèle de l'infrastructure comme objet construit

Soit un élément d'infrastructure I, de longueur ℓ_I et dont la section courante présente une surface moyenne S_I (en coupe verticale). Le volume $\ell_I \cdot S_I$ contient un matériau de densité ρ_I , donc sa masse est $\ell_I \cdot S_I \cdot \rho_I$. En supposant un facteur φ_I^c d'impact constructif par unité massique, la quantité d'impact de l'élément d'infrastructure, Q_I^c , se formule comme suit :

$$Q_I^c = \varphi_I^c \cdot \ell_I \cdot S_I \cdot \rho_I. \quad (1)$$

Cette formule pourrait se décliner par type de matériau et de matériel.

Sur cet élément d'infrastructure, le trafic total de véhicules (compté dans les deux sens de circulation s'il y a lieu) est noté T_I^V par année (en moyenne sur une certaine période) : il est proportionnel à la longueur ℓ_I et au nombre moyen de véhicules en section courante, noté x_I^V :

$$T_I^V = \ell_I \cdot x_I^V. \quad (2V)$$

Nous pouvons aussi exprimer le trafic en nombre d'unités transportées : en notant x_V^p le nombre moyen de personnes par véhicule (ou d'unités de masse pour du fret), le trafic en unités transportées est de :

$$T_I^p = \ell_I \cdot x_I^V \cdot x_V^p. \quad (2p)$$

En notant D_I la durée de vie technique en années de l'élément d'infrastructure, l'impact par véhicule et par unité de longueur parcourue est de

$$Q_{I,1V}^c = \frac{Q_I^c}{D_I} \frac{1}{T_I^V} \psi_I^V. \quad (3V)$$

Nous avons noté ψ_I^V le taux d'affectation à la catégorie de véhicules V de l'impact infrastructurel, cf. §A.5. Une convention alternative d'imputation est de considérer directement les personnes transportées (ou des unités de masse pour du fret), avec pour l'ensemble des personnes une clef d'imputation ψ_I^p . Alors l'impact par personne et par unité de longueur parcourue est :

$$Q_{I,1p}^c = \frac{Q_I^c}{D_I} \frac{1}{T_I^p} \psi_I^p. \quad (3p)$$

Cette imputation permet de considérer équitablement les personnes transportées par différents modes de déplacement sur la même infrastructure. Tandis qu'en passant par le véhicule, l'impact par personne et par unité de longueur est :

$$Q_{I,1p|V}^c = \frac{Q_{I,1V}^c}{x_V^p}. \quad (3p|V)$$

b/ Modèle du véhicule comme objet construit

Soit un véhicule de type V, de masse à vide m_V hors batterie. En supposant un facteur φ_V^c d'impact constructif par unité massique, la quantité d'impact du véhicule se formule comme suit :

$$Q_V^c = \varphi_V^c \cdot m_V. \quad (4V)$$

Similairement, pour une batterie B (ou autre conteneur d'énergie), notons m_B la masse et φ_B^c l'impact constructif par unité massique. La quantité d'impact de la batterie est

$$Q_B^c = \varphi_B^c \cdot m_B. \quad (4B)$$

Ces impacts sont à rapporter aux « parcours de vie » de l'objet matériel, L_V pour le véhicule ou L_B pour la batterie. On en déduit l'impact constructif du véhicule par unité de longueur parcourue, hors batterie ou avec :

$$Q_{V,1}^c = \frac{Q_V^c}{L_V}. \quad (5V)$$

$$Q_{V+B,1}^c = \frac{Q_V^c}{L_V} + \frac{Q_B^c}{L_B}. \quad (5VB)$$

c/ Modèle de l'usage du véhicule (et de l'infrastructure)

En notant m_p la masse moyenne par unité transportée, et en rappelant x_V^p le nombre moyen d'unités transportées par véhicule, la masse en charge moyenne par véhicule est de :

$$\tilde{m}_V = m_V + m_B + x_V^p \cdot m_p. \quad (6)$$

Pour un véhicule sans batterie on convient que $m_B = 0$ (ou compte la masse de carburant contenue en moyenne plus la masse du réservoir). Pour des personnes la masse m_p peut inclure non seulement la personne mais aussi des bagages etc.

Par unité de longueur parcourue, notons $\chi_{V,1}^W$ la quantité d'énergie consommée « à la roue » (W pour Wheel) et $\chi_{V,1}^T$ la quantité d'énergie consommée au niveau du réservoir (T pour Tank). Chacune de ces quantités dépend de la masse en charge par une fonction spécifique notée X. Cela se formule comme :

$$\chi_{V,1}^W = X_{V,1}^W(\tilde{m}_V), \quad (7W)$$

$$\chi_{V,1}^T = X_{V,1}^T(\tilde{m}_V). \quad (7T)$$

L'influence de la masse transportée est spécialement importante pour du fret lourd, au premier ordre de grandeur, ou pour une deuxième personne sur un deux roues ; tandis que pour une automobile ou un véhicule de transport collectif de personnes l'influence est plutôt du second ordre.

La comptabilité d'énergie « à la roue » facilite la comparaison des vecteurs énergétiques, par type de véhicule. Elle est liée à la consommation d'énergie « au niveau du réservoir » par un facteur de rendement TTW du vecteur énergétique dans l'usage du véhicule : notons-le θ_V^{T2W} , avec un indice V qui marque le véhicule et qui sous-entend son vecteur énergétique.

Il nous reste à noter le facteur d'impact (carbone ou autre) φ_E^{c+u} par unité d'énergie injectée dans le véhicule, à la fois pour son usage et pour la phase amont de son élaboration, d'où la mention c + u. Le facteur intègre bien sûr la production de l'énergie concernée, mais aussi les pertes en ligne pour son transport et sa distribution jusqu'au véhicule. Ces pertes sont significatives pour l'électricité : de 5 à 10 % pour le transport depuis les sites de production, puis 5 % dans la borne de recharge par échauffement, et 4 % dans la batterie lors de la charge, cf. Ellingsen et al. (2016) et EEA (2018).

N.B. Les études en ACV de l'impact énergétique des modes de transport, typiquement en kWh par km de véhicule ou de passager, reposent sur des conventions spéciales au niveau du « puits » : tant pour les énergies renouvelables que pour le nucléaire. Elles ne sont directement comparables aux valeurs indiquées ici, que pour les carburants d'origine fossile.

Par unité de longueur parcourue, l'impact de l'usage du véhicule se formule au niveau du réservoir aussi bien que à la roue :

$$Q_{V,1}^u = \varphi_E^{c+u} \cdot \chi_{V,1}^T, \quad (8T)$$

$$Q_{V,1}^u = \varphi_E^{c+u} \cdot \theta_V^{T2W} \cdot \chi_{V,1}^W. \quad (8W)$$

d/ Modèle intégré d'impact par unité de longueur parcourue

Par unité de longueur parcourue, nous pouvons rassembler les parties constructives et l'usage pour obtenir l'impact par véhicule ou par unité transportée :

$$Q_{V,1}^{c+u} = Q_{I,1V}^c + Q_{V,1}^c + Q_{V,1}^u, \quad (9V)$$

$$Q_{p|V,1}^{c+u} = Q_{V,1}^{c+u} / x_V^p, \quad (9p|V)$$

$$Q_{p|V,1}^{c+u} = Q_{I,1p}^c + \frac{Q_{V,1}^c + Q_{V,1}^u}{x_V^p}. \quad (9p)$$

Les deux méthodes d'attribution de l'impact infrastructurel via les véhicules ou directement aux unités transportées ont pour résultat respectif (9p) et (9p|V).

e/ Commentaires

Le modèle comptable de l'impact par unité de longueur, pour un véhicule ou pour une unité transportée, constitue donc un système de formules mathématiques. Ce système exprime la nature des choses de manière modulaire, afin de pouvoir considérer de manière générique des infrastructures routières ou ferroviaires, diverses catégories de véhicules, divers vecteurs énergétiques et divers types de contenu (personnes ou fret). Nous avons distingué systématiquement les deux principes d'attribution de l'impact infrastructurel, afin de manifester l'importance de la « convention collective » à cet égard.

Dans un service partagé de mobilité, notamment en transport collectif, les unités transportées partagent l'usage à la fois des véhicules et de l'infrastructure. S'ils utilisaient des véhicules individuels, ils ne partageraient plus l'usage des véhicules, mais pourraient encore bénéficier ensemble de l'infrastructure. De fait, imputer l'usage de l'infrastructure via le véhicule, plutôt que directement aux unités transportées, est une sorte de double compte de la mutualisation.

Le modèle comptable retrace la composition technique du mode de transport et pointe l'impact carbone pour les différentes composantes, en phase constructive et en phase d'usage. C'est donc un modèle physique. En particulier les facteurs φ expriment la physique de l'impact carbone : entre la chimie basique pour le φ_E^u d'un carburant et procédés techniques pour celui de l'électricité comme pour les impacts amont φ_E^c d'un carburant ou de l'électricité, ainsi que les facteurs spécifiques φ_I^c , φ_V^c et φ_B^c des impacts constructifs respectifs de l'infrastructure, du véhicule et de la batterie. Ces procédés techniques sont à la fois d'ordre industriel et d'ordre logistique, on l'a vu pour φ_E^c de l'énergie et les biocarburants. En pratique, les procédés dépendent fortement du système technico-économique local : tant au lieu de fabrication du véhicule qu'au lieu de son usage (qui est aussi le lieu de construction de l'infrastructure), de par les mix énergétiques pour produire l'électricité dans les pays concernés et aussi par le développement de l'économie circulaire pour la production des matières mises en œuvre (entre métaux, matériaux de construction, batteries etc.).

Les paramètres $\theta_V^{T^2W}$ de rendement énergétique du système énergétique du véhicule (incluant le bloc motopropulseur), à vecteur énergétique donné, tendent à croître à la marge, en raison de la maturation technologique.

Enfin les fonctions $X_{V,1}^W$ d'efficacité énergétique du véhicule dépendent fortement de la composition du véhicule, de son aérodynamisme, ainsi que de la qualité de l'infrastructure.

f/ Diversité des modes et comparabilité

Les indicateurs d'impact carbone par unité de longueur parcourue, évalués au niveau d'un véhicule ou d'une unité transportée, s'appliquent aux différents modes de transport. Ils

permettent de comparer plusieurs modes les uns aux autres dans des conditions à préciser afin de circonscrire la portée des résultats :

- pour un type particulier de véhicule, entre différents vecteurs énergétiques, *coeteris paribus* i.e. toutes conditions de fabrication et d'usage équivalentes entre les options.
- par type de véhicule, comparer des options différenciées selon des caractéristiques intrinsèques (ex. segment de marché automobile) ou extrinsèques (taux de remplissage, pays de fabrication et pays d'utilisation).
- entre différents types de véhicules pour des conditions d'utilisation suffisamment harmonisées : même pays d'utilisation, imputation équivalente des impacts infrastructurels entre les unités transportées.
- entre des modes routiers et ferroviaires, la comparaison est à mener par unité transportée en spécifiant les niveaux de remplissage respectifs.

Il convient de veiller à la cohérence de la notion de mode et à ses limites. Par exemple, une automobile qui assure occasionnellement du covoiturage est utilisée en mode privatif le reste du temps : entre les différentes voitures mobilisées pour le covoiturage, les parcours de vie et les proportions qu'y tient le covoiturage sont diversifiés, ce qui complexifie la constitution de l'indicateur modal d'impact carbone pour un tel service.

g/ Adapter la comparaison aux situations d'usage

Pour une personne disposant de flexibilité dans l'organisation de sa mobilité, les performances carbone respectives des différents modes de transport à sa disposition peuvent contribuer à déterminer les usages modaux pour ses déplacements. La composition concrète de chaque mode dépendra fortement de la situation particulière de déplacement : selon les points d'origine et de destination, la configuration des réseaux infrastructurels offrira diverses options d'itinéraire, chaque option avec sa propre longueur à parcourir, et ce en passant par différents sous-types d'infrastructure (ex. voiries banalisées urbaines ou interurbaines, ou voies de type autoroutier) et / ou par différents sous-types modaux (notamment des sections en mode feeder par micromobilité, automobile ou autobus pour u mode ferroviaire).

Il y a donc des « effets de réseau » à considérer pour comparer objectivement différentes solutions modales au niveau d'un déplacement particulier. L'indicateur par unité de longueur parcourue ne suffit plus, il faut mesurer l'impact carbone d'une option modale par un indicateur global entre l'origine et la destination du déplacement concerné. Pour cela on peut coupler le modèle systémique en cycle de vie avec un modèle multimodal d'offre de transport et de demande de mobilité dans le territoire concerné.