



HAL
open science

Empreinte carbone et évaluation environnementale de la mobilité urbaine

Cyrille Francois, Natacha Gondran, Jean-Pierre Nicolas

► **To cite this version:**

Cyrille Francois, Natacha Gondran, Jean-Pierre Nicolas. Empreinte carbone et évaluation environnementale de la mobilité urbaine. Bernard Bourges, Jean-Sébastien Broc, Thomas Gourdon. Empreinte carbone : évaluer et agir, Presses des MINES, pp 309-322, 2015, 978-2-35671-233-2. <emse-01225349>

HAL Id: emse-01225349

<https://hal-emse.ccsd.cnrs.fr/emse-01225349v1>

Submitted on 31 May 2018

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.



HAL Authorization

Empreinte carbone et évaluation environnementale de la mobilité urbaine

Cyrille François^{1,3}, Natacha Gondran¹, Jean-Pierre Nicolas²

¹ UMR CNRS 5600 Environnement Ville Société; Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne

² Laboratoire d'Economie des Transports (UMR CNRS 5593); Ecole Nationale des Travaux Publics de l'État

³ Stage de master financé par l'Institut des Transports et des Mobilités Urbaines du pôle de compétitivité LUTB Transports & Mobility Systems

INTRODUCTION

Les déplacements de personnes et de marchandises sont responsables d'une part importante des impacts environnementaux à l'échelle de la ville [Verdon *et al.*, 2008]. On peut ainsi montrer que les émissions de Gaz à Effet de Serre (GES) liées aux mobilités individuelles locales (réalisées à moins de 80 km du domicile), majoritairement internes aux aires urbaines, sont non seulement plus importantes que celles liées aux déplacements à longue distance (69% vs 31%), mais qu'elles ont également augmenté significativement plus que les autres entre les années 1990 et 2000 du fait de la poursuite de l'étalement urbain (+17% vs +8% entre 1994 et 2008; cf. [Nicolas *et al.*, 2013a]). L'évaluation environnementale de la mobilité représente ainsi un enjeu important pour les acteurs publics afin de dégager un diagnostic des émissions de GES générées par un système de déplacements urbains, mais également d'identifier les conséquences potentielles de son évolution.

L'étude présentée dans cet article s'est interrogée sur les outils d'une évaluation environnementale des mobilités urbaines, pour accompagner la réflexion des acteurs urbains qui veulent agir sur leur territoire pour diminuer la contribution des transports à l'effet de serre, tout en maîtrisant les autres impacts environnementaux.

Trois hypothèses principales ont guidé le travail qui a été mené dans ce cadre : (1) Le champ de l'évaluation environnementale doit être suffisamment large pour éviter d'omettre des points importants pour la prise de décision, (2) il est intéressant de lier les émissions avec les émetteurs, ce qui est complexe dans le cas du transport, et (3) il existe aujourd'hui des modèles de simulation des interactions entre transports et urbanisme qui permettent d'étendre l'évaluation à l'échelle d'une agglomération.

Premièrement, la majorité des évaluations d'impacts environnementaux réalisées sur la mobilité urbaine ne prennent en compte que les émissions directes générées

lors de l'utilisation des véhicules. Cependant, les recherches conduites sur l'ensemble du cycle de vie montrent l'intérêt d'élargir l'étude aux autres impacts indirects du transport tels que les infrastructures, la fabrication des carburants, des véhicules, leur maintenance et leur fin de vie [Le Féon, 2014]. En plus d'élargir le périmètre d'analyse, les évaluations environnementales gagneront en pertinence en considérant d'autres types d'impacts, comme le montrent les travaux du COST 356 recensant les chaînes d'impacts environnementaux dans les transports [Joumard et Gudmunsson, 2010].

Deuxièmement, lier les émissions à leurs émetteurs constitue un vrai défi scientifique. Beaucoup d'études fournissent de bonnes estimations des émissions et de leurs impacts, permettant d'éclairer tout à la fois l'importance des enjeux environnementaux et les principaux secteurs économiques concernés. Cependant, dans le cas des transports, les sources d'émissions étant mobiles, le lien émetteurs-émissions est plus difficile à établir et les émissions sont souvent attribuées aux trafics sur différents tronçons routiers, et non à leur source, c'est-à-dire aux agents effectuant le déplacement (dans le cas des mobilités individuelles comme pour celui des mouvements de marchandises, même si cet article est resté focalisé sur les personnes). Ceci peut rendre les actions publiques moins efficaces car peu ciblées sur les personnes à l'origine des déplacements, sans connaissance de leurs motifs ni de leurs caractéristiques socio-économiques. Les Enquêtes Ménages Déplacements (*Household Travel Survey* dans les pays anglo-saxons) peuvent pallier à ce manque, comme l'illustrent les travaux canadiens du projet MADITUC fournissant une image détaillée des flux et des personnes qui les réalisent [Chapleau, 2005]. Cependant, c'est en France que des travaux méthodologiques ont été le plus poussés pour estimer les émissions à partir des Enquêtes Ménages Déplacements locales, permettant ainsi de mieux comprendre qui émet quoi, pourquoi et combien [Orfeuil, 1984 ; Gallez et Hivert, 1998 ; Bouzouina *et al.*, 2011 ; Verry *et al.*, à paraître].

Troisièmement, pour mener à bien l'évaluation de la mobilité urbaine, cet article s'adosse à une modélisation des interactions entre transports et urbanisme. Ce choix d'un recours à la modélisation repose sur la souplesse qu'elle apporte. En effet, une fois réalisé l'investissement initial dans le développement du modèle, les données de calcul des impacts environnementaux peuvent être tirées directement des résultats des simulations. De même, différents scénarios d'évolution du système peuvent être ensuite testés – même si cet article, qui pose les bases de la méthodologie en la matière, ne fournit les résultats que pour une simulation simple établie à une date donnée. Cette souplesse reste bien sûr relative : les simplifications liées au modèle contraignent l'élaboration des scénarios, de même qu'elles génèrent des biais et des incertitudes. Il existe actuellement plusieurs modèles LUTI (Land Use and Transport Interactions) fournissant des données suffisamment désagrégées pour faire le lien entre émissions et émetteurs [Antoni, 2010]. Le modèle choisi pour cette étude est le modèle SIMBAD développé sur l'aire urbaine de Lyon [Nicolas, 2010].

Le but de cet article est donc de montrer l'intérêt et la faisabilité de croiser ces trois hypothèses afin de fournir un résultat clair et structuré de l'impact environnemental de la mobilité urbaine de Lyon. Pour atteindre ce but, plusieurs objectifs ont été fixés :

- Réaliser une Analyse de Cycle de Vie sur le système des déplacements de l'aire urbaine de Lyon
- Réaliser une évaluation environnementale avec plusieurs indicateurs
- Utiliser les données du modèle SIMBAD en données d'entrée de cette évaluation
- Lier les émissions aux émetteurs.

MÉTHODES

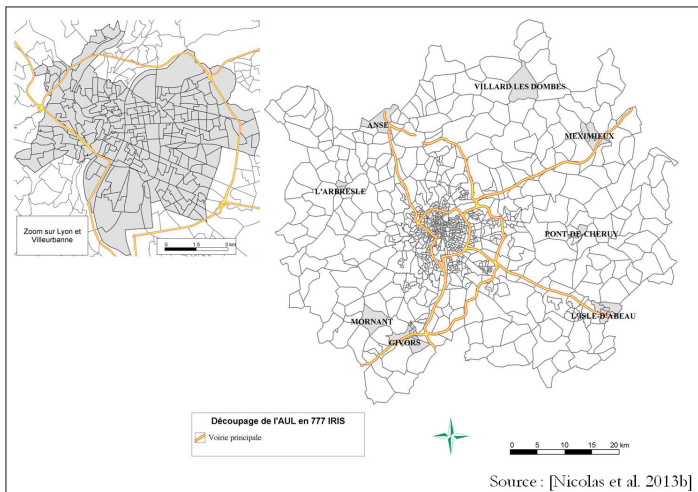
La méthodologie d'analyse de cycle de vie, normalisée [ISO, 2006], a été choisie pour estimer les émissions de gaz à effet de serre générés par la mobilité urbaine. La fonction étudiée, pour la mobilité urbaine, est de "permettre aux personnes vivant ou habitant au sein d'une aire urbaine de se déplacer pendant un jour ouvré". Cette formulation permet de définir la mobilité urbaine non seulement par son système de transport, mais également par les pratiques des personnes en termes de déplacements ainsi que la localisation de leurs différentes activités et de leur logement [Geurs et Van Wee, 2004]. Afin d'étudier ce système dans son ensemble, l'unité fonctionnelle est exprimée "par habitant et par jour", ce qui permet de prendre en compte le système de transport, mais également la distance et le nombre de déplacements. Afin de permettre la comparaison avec d'autres études, ou de discuter le choix de cette unité fonctionnelle, certains résultats sont exprimés en passager*kilomètre ou par déplacement.

SIMBAD (Simulation des MoBilités pour une Agglomération Durable) est une plateforme de modélisation des interactions entre transports et urbanisme, développée par le Laboratoire d'Économie des Transports [Nicolas *et al.*, 2013b]. Elle est conçue à l'échelle du bassin de vie d'une agglomération, avec pour objectif de rendre compte des impacts économiques, sociaux et environnementaux, des trafics qui s'y réalisent. En simulant l'évolution dans le temps de la localisation des entreprises et des ménages ainsi que les mobilités générées, elle permet de représenter l'évolution de la mobilité à un horizon de 25 à 30 ans. Ainsi, diverses politiques de transport et d'urbanisme peuvent être testées afin de simuler les impacts qu'elles génèrent ainsi que les interactions entre les différentes composantes du système (voir par exemple [Antoni *et al.*, 2014]). L'approche de modélisation est de type stratégique, permettant de rendre compte des impacts de politiques contrastées à l'échelle de l'agglomération plus que de projets particuliers à une échelle fine.

D'un point de vue méthodologique, plusieurs choix ont été faits au niveau des outils utilisés pour réaliser cette modélisation. Tout d'abord, la plateforme URBANSIM [Waddell, 2002] permet de représenter des localisations des ménages et des

activités, avec une approche désagrégée et stochastique reposant sur la théorie des choix discrets. Concernant les transports, une structure traditionnelle à 4 étapes a été retenue pour simuler les mobilités individuelles, avec un choix entre les modes motorisés individuels (assimilés à l'automobile, qui représente plus de 99% des distances parcourues par ces modes), les transports collectifs et les modes doux (marche à pied, vélo). Par ailleurs, le modèle FRETURB [Toilier *et al.*, 2005] est utilisé pour générer les flux de marchandises en ville. Les trafics ainsi estimés sont ensuite affectés à l'aide du logiciel VISUM développé par la société PTV, tant pour les trafics routiers que pour les déplacements sur le réseau de transports collectifs. Cette chaîne de modélisation des mobilités et des trafics permet d'estimer des temps généralisés entre l'ensemble des zones du périmètre d'étude, qui servent ensuite à établir des indicateurs d'accessibilité utilisés dans les modules de localisation des ménages et des activités.

Le terrain d'application correspond à l'aire urbaine de Lyon 1999, couvrant 3 300 km² répartis sur 296 communes et 777 IRIS (Îlots Regroupés pour l'Information Statistique, servant d'unité spatiale de base pour SIMBAD; cf. carte 1). La modélisation des logiques de localisation a été calibrée à partir des données de recensement de 1999 pour les ménages ainsi que du fichier SIRENE 1999 pour les entreprises. Le réseau routier et le réseau de transports collectifs ont été construits et validés sur cette même année, et la modélisation de la chaîne transport a été calibrée à partir de l'Enquête Ménages Déplacements lyonnaise de 2006 [Nicolas *et al.*, 2013b; Cabrera, 2013]. Pour la simulation utilisée dans cet article, l'année 2006 a servi de référence aux calculs. Ainsi, 1 710 000 habitants ont été pris en compte, pour 6 900 000 déplacements réalisés quotidiennement.



Carte 1 : Le périmètre de SIMBAD et les 777 IRIS de l'aire urbaine de Lyon

L'évaluation environnementale proposée aujourd'hui au sein de SIMBAD ne prend en compte que les émissions directes de CO₂ et de NO_x générées par le transport routier. Une évaluation environnementale plus complète, tant sur le périmètre

des impacts considérés (émissions directes et indirectes) que sur celui de thèmes observés apparaissait donc pertinente. Les résultats de modélisation des flux de déplacements, répartis selon les différents modes de transports motorisés et sur les différents tronçons d'infrastructures de transport, ont ainsi été utilisés comme données d'entrée pour une évaluation environnementale basée sur l'analyse de cycle de vie qui permet de représenter les impacts liés aux différentes phases de la « vie » du système étudié (fabrication des véhicules et des infrastructures, utilisation puis fin de vie des véhicules), mais également d'identifier d'éventuels transferts de pollution entre les différentes catégories d'impacts environnementaux.

Afin d'avoir une vision globale des impacts environnementaux liés à la mobilité urbaine, neuf indicateurs ont été étudiés, abordant l'impact sur le changement climatique (émissions de gaz à effet de serre en $\text{kg CO}_2\text{eq}$), les pressions exercées sur les ressources naturelles (utilisation d'énergie non renouvelable (MJ_{eq}) et d'énergie renouvelable (MJ_{eq}), consommation de ressources métalliques (g Fe_{eq}) et de fossiles ($\text{kg pétrole}_{\text{eq}}$), mais également la pollution atmosphérique locale : formation d'oxydants photochimiques (en $\text{g COVNM}_{\text{eq}}$), formation de particules (en $\text{g PM10}_{\text{eq}}$), contribution à l'acidification terrestre (en $\text{g SO}_2\text{eq}$). Enfin, la contribution à l'occupation au sol ($\text{m}^2\cdot\text{an}$) a été estimée.

Tableau 1 : Catégories d'impacts estimés

Catégorie d'impact	Unités	Substances étudiées
Emissions de gaz à effet de serre (à 100 ans)	$\text{kg CO}_2\text{eq}$	Tous les gaz à effet de serre
Formation de particules	kg PM10-eq	PM, SO_2 , NO_x , NH_3
Formation d'oxydants photochimiques	kg COVNM-eq	COVNM ⁽¹⁾ et autres oxydants photochimiques
Contribution à l'acidification terrestre (100 ans)	$\text{kg SO}_2\text{-eq}$	NH_3 , SO_2 , NO_x
Consommation de ressources fossiles	kg oil-eq	Charbon, gaz, pétrole
Consommation de ressources métalliques	kg Fe-eq	Tous les métaux
Utilisation d'énergie non renouvelable	MJ-eq	Charbon, gaz, pétrole, tourbe, uranium, forêt primaire
Utilisation d'énergie renouvelable	MJ-eq	Energies issues de l'hydraulique, éolien, géothermie, solaire, biomasse
Occupation des sols	m^2a ⁽²⁾	Terres agricoles et urbaines

⁽¹⁾ Composés Organiques Volatiles Non-Méthane

⁽²⁾ Mètres carrés par an

Pour chacun de ces indicateurs, les impacts sont estimés à partir de facteurs de caractérisation exprimés en unité d'impact par $\text{veh}\cdot\text{km}$. Nous avons choisi d'utiliser les facteurs de caractérisation fournis par la méthode ReCiPe [Goedkoop *et al.*, 2013]. Cette méthode, communément utilisée par la communauté scientifique, propose des facteurs de caractérisation pour l'ensemble des indicateurs que nous avons sélectionnés. De plus, elle adopte une approche orientée d'impacts (dites « midpoint »), en opposition à celles orientées dommages (dites « endpoint ») proposant des indicateurs tels que l'impact sur la santé humaine et les écosystèmes. L'approche orientée impact nous semble être un bon compromis entre la volonté de simplification dans une optique de communication des résultats et le souci de rigueur scientifique.

Les estimations d'impacts environnementaux de l'automobile sont basées sur le trafic estimé pour chaque tronçon du réseau. Ainsi, les données prises en compte pour chaque tronçon routier, comprenaient: la vitesse moyenne et le nombre de véhicules, estimées par SIMBAD pour une heure creuse moyenne ou une heure de pointe moyenne. Les caractéristiques de la flotte automobile ont été établies à partir des informations disponibles dans l'Enquête Ménages Déplacements de Lyon 2006, permettant ainsi de disposer d'une description détaillée des véhicules en circulation sur chaque tronçon pour calculer les émissions [Grassot *et al.*, 2012]. Les estimations des impacts liés aux transports en commun sont basées sur des données spécifiques au réseau des transports en commun, plus agrégées et moyennées que dans le cas des véhicules particuliers.

La même méthode de calcul a été utilisée pour tous les indicateurs. Cependant, pour chaque tronçon, des calculs différents ont été réalisés pour chaque phase du cycle de vie de la mobilité quotidienne :

- les impacts indirects liés à la production, la maintenance et la fin de vie des véhicules,
- les impacts indirects liés à la fabrication des carburants (extraction et raffinage du pétrole, par exemple),
- les impacts indirects liés à la construction des infrastructures,
- les émissions directes générées par l'utilisation des véhicules.

Pour les phases liées aux impacts indirects, les facteurs de caractérisation ainsi que les hypothèses correspondant aux durées d'amortissement des véhicules et des infrastructures sont issus de la base de données Ecoinvent. La base de données COPERT 4 a été utilisée pour estimer les émissions directes.

RÉSULTATS

La performance environnementale de la mobilité urbaine dépend à la fois du niveau technologique des véhicules (caractéristiques des moteurs, modes utilisés pour le système de transports collectifs, etc...), de la répartition modale et des pratiques de mobilité avec le nombre de trajets et leurs distances. La méthode utilisée distingue les impacts environnementaux suivant quatre phases: gaz d'échappement, production des carburants, cycle de vie des véhicules et des infrastructures. La distribution des impacts entre véhicules personnels et transport public est réalisée de manière séparée. L'utilisation de la plateforme SIMBAD permet également de faire le lien entre les impacts et les différentes catégories de ménages qui en sont à l'origine.

Résultats pour l'ensemble de l'aire urbaine

Chaque indicateur environnemental a été évalué lors des quatre étapes puis sommées pour obtenir le total sur le cycle complet du transport. Pour chaque indicateur, le total et les sous-totaux par phase sont présentés sur la figure 1.

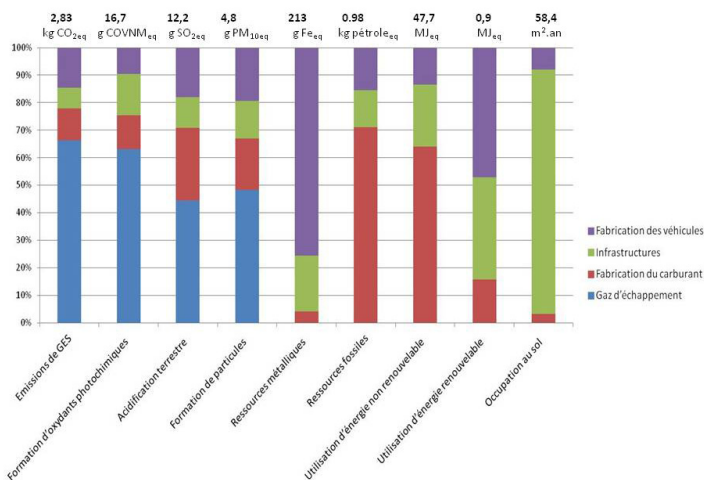


Figure 1 : Performances totales et détaillées de la mobilité quotidienne locale des habitants de l'aire urbaine de Lyon en 2006 (par habitant et par jour)

Le potentiel de réchauffement climatique de la mobilité quotidienne des résidents de l'aire urbaine de Lyon est évalué à 2,83 kg de CO₂eq/habitant.jour. La principale source de GES correspond aux gaz d'échappement des véhicules, qui représentent deux tiers du total. L'impact moyen du transport dans Lyon est ainsi estimé à 175 g CO₂-eq par passager*kilomètre, ce qui est cohérent avec autre étude réalisée sur des villes françaises [Le Féon, 2014] et en-dessous, par exemple, de la ville de New York évalué à 220 g CO₂eq /pkm [Chester *et al.*, 2010]. En prenant en compte la distance des trajets, l'impact moyen est de 969 g CO₂-eq /trajet. Les émissions de GES sont fortement corrélées à l'utilisation de ressources fossiles et d'énergie non-renouvelable lors de l'utilisation des véhicules à combustion.

Concernant les autres polluants atmosphériques, la source principale correspond également aux gaz d'échappement. Dans le cas des oxydants photochimiques, l'échappement représente 63 % de l'impact total. L'impact des infrastructures arrive en second avec 15 %. La combustion du carburant est à l'origine de 48 % des particules émises. La production du carburant et le cycle de vie des véhicules, phases généralement négligées dans les autres études sur l'impact environnemental des transports urbains, représentent cependant chacun 19 % de la formation des particules. Ces émissions sont certes essentiellement situées en périphérie des villes, mais les problèmes de pollution locale n'en sont pas éliminés pour autant. Les gaz d'échappement représentent seulement 44 % du potentiel d'acidification, la seconde source étant la production de carburant avec 22 %. Notons que, pour les transports en commun utilisant de l'électricité, le mix d'électricité pris en compte dans les calculs est le mix français, majoritairement d'origine nucléaire et émettant

certes peu de GES, mais non-renouvelable et présentant des impacts et risques non représentés par les indicateurs choisis dans cette étude. Si la part des transports électriques venait à augmenter au sein du Grand Lyon, de nouveaux indicateurs devraient être choisis afin de mieux représenter ces impacts.

La consommation de ressources fossiles et d'énergie non-renouvelable sont fortement corrélées à la consommation de carburant des véhicules qui représente respectivement 71 % et 64 %. La fabrication des infrastructures représentent tout de même 23 % de la consommation totale d'énergie non-renouvelable. La consommation d'environ un kilogramme de pétrole équivalent par jour et par personne souligne clairement la dépendance en une ressource limitée et importée. La proportion d'énergie renouvelable est faible avec seulement 1,8 % de l'énergie totale.

L'occupation de terrain due à la mobilité d'un habitant de l'aire urbaine de Lyon est au moins égale à 58m² par an et les infrastructures représentent la part principale avec 89 % de la surface totale. Ainsi l'occupation de terrain pour la mobilité urbaine de Lyon représente au moins 113 ha. Cette sous-estimation est due aux approximations faites sur les largeurs de routes ainsi que sur l'absence, dans les bases de données, d'informations sur les infrastructures non-linéaires telles que les gares et parkings. Enfin, valeur qui est ignorée par les études portant seulement sur les émissions directes de la mobilité urbaine, un habitant de Lyon utilise environ 214 g de fer équivalent de ressources métalliques par jour pour sa mobilité quotidienne provenant principalement de la fabrication des véhicules.

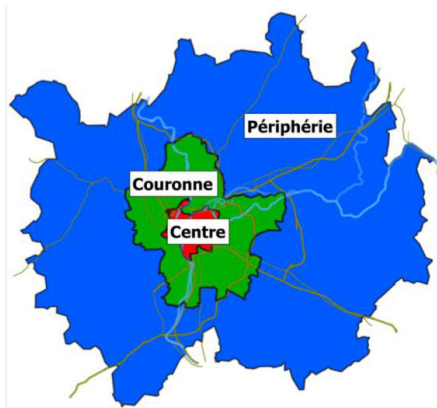
Nous n'avons pas, dans le cadre de cette étude exploratoire, quantifié les incertitudes relatives à ces résultats. Ces incertitudes ne sont toutefois pas négligeables et peuvent varier d'un indicateur à l'autre. En effet, certains des indicateurs présentés (émissions de GES, formation d'oxydants photochimiques, formation de particules, contribution à l'acidification terrestre) sont aujourd'hui bien plus classiquement étudiés que d'autres (épuisement des ressources métalliques, occupation des sols, par exemple). On peut donc présumer que l'incertitude sur les indicateurs plus originaux est plus forte que celle portant sur les indicateurs les plus fréquemment retrouvés dans la littérature. On peut identifier, entre autres, trois types de sources d'incertitudes qui devront être quantifiées dans une étude ultérieure :

- les données statistiques sur lesquelles repose le modèle SIMBAD
- les modèles de mobilités individuelles et de choix entre les modes motorisés individuels et collectifs
- la répartition des flux sur les différents tronçons
- les facteurs de caractérisation des impacts environnementaux par véhicule km.

Des études de sensibilité ont été réalisées sur différents paramètres clés pouvant faire l'objet d'incertitude au niveau local (taux d'occupation des véhicules, vitesse moyenne, taux de véhicules diesel, par exemple). Les résultats de cette étude de faisabilité est disponible dans [François, 2014].

Résultats suivant différentes classes de ménages

Les impacts environnementaux précédents ont été calculés pour l'ensemble de l'aire urbaine de Lyon qui se compose de nombreux ménages ayant des modes de vie très hétérogènes. Pour cet article, deux caractéristiques des ménages ont été sélectionnées comme fortement liées à la mobilité quotidienne et ses impacts : le revenu par unité de consommation, découpé en trois classes (les 20% des ménages aux revenus les plus faibles, les 60% aux revenus intermédiaires et les 20% aux revenus les plus élevés) et la localisation, également en trois classes (le centre dense constitué de Lyon et Villeurbanne, le reste du Grand Lyon et enfin le périurbain situé sur le reste du territoire de l'aire urbaine), créant ainsi 9 classes de ménages.



Carte 2 : Représentation des trois zones de localisation choisies

D'autres variables disponibles dans le modèle SIMBAD auraient pu être considérées, comme l'âge du chef de ménage, son activité, la taille du ménage ou le nombre de voitures par ménage. Mais l'objectif principal de ce travail exploratoire étant le test de la méthodologie de calcul, une première analyse à partir de deux facteurs est apparue suffisante.

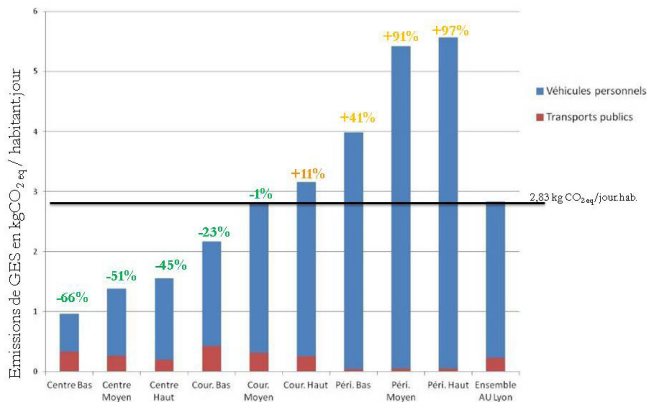


Figure 2 : Émissions de GES liées à la mobilité urbaine, par catégories de ménages, en 2006

Comme les résultats le confirment (cf. infra), l'éloignement du lieu de résidence par rapport au centre a un impact fort sur les distances parcourues et le taux d'utilisation de la voiture. Le revenu a aussi un impact, mais de moindre importance. La Figure 2 montre les différentes contributions des classes de ménages aux émissions de GES. Une personne habitant en périphérie avec un revenu élevé émet environ six fois plus de GES qu'une personne à faible revenu du centre. Les impacts environnementaux augmentent avec le revenu des ménages : en particulier les faibles revenus émettent environ 2,14 kg CO₂-eq/habitant.jour qui peuvent être comparés aux 2,99 kg et 3,05 kg pour respectivement les moyens et hauts revenus. Cette différence est notamment due à la plus faible proportion d'actifs dans la classe de faible revenu, avec plus d'étudiants et de retraités. Pour cette classe, l'usage de la voiture est plus faible, lié à la fois aux contraintes financières et aux trajets plus courts (les trajets travail-domicile, plus longs, sont moins nombreux). Concernant le paramètre de localisation, les émissions augmentent avec la distance de la localisation du ménage par rapport au centre-ville. Les émissions de GES pour un habitant du centre sont de 1,34 kg CO₂-eq /jour, 2,73 kg CO₂eq /jour pour le reste du Grand Lyon et 5,19 kg CO₂-eq/jour dans la périphérie. Ainsi, la Figure 2 montre que les émissions augmentent toujours plus avec l'éloignement du centre à revenu fixé qu'avec la croissance du revenu à localisation donnée : les impacts apparaissent donc plus dépendants de la localisation que du revenu.

Pour les huit autres indicateurs, les conclusions sont similaires à celles liées au réchauffement climatique, avec une augmentation des impacts avec le revenu et l'éloignement de la résidence par rapport au centre (Figure 2). Notons que nous avons considéré, pour cette étude, le même parc moyen de véhicules pour l'ensemble des catégories de ménages. L'impact de l'utilisation d'un parc de véhicules particuliers «types» pourra être investigué dans une prochaine étude afin de prendre en compte les éventuelles différences d'efficacité des véhicules, mais également les différences de cylindrées et de taux de renouvellement.

La distance parcourue est fortement corrélée à la localisation du ménage. La distance moyenne parcourue en voiture pour un habitant du centre est de 5,5 km/jour, 12,7 km/jour pour un habitant de la couronne et 27,2 km en périphérie. La distance parcourue dépend aussi, dans une moindre mesure, du revenu du ménage, avec un décrochage notable entre les ménages à revenus médians et ceux à revenus modestes car l'effet «revenu» recouvre alors également un effet «activité», les ménages modestes, plus composés de retraités et d'étudiants, étant moins contraints par les déplacements domicile-travail que les autres. De plus, les ménages à faibles revenus utilisent moins la voiture et privilégient plus le transport en commun (ainsi, une personne à revenus modestes résidant à Lyon ou Villeurbanne parcourt 2,5 km/jour avec les transports publics). En périphérie le transport public est moins accessible et pratiquement toute la distance parcourue est réalisée en voiture. Le nombre de trajets par jour affecte aussi la distance totale parcourue. En effet, les habitants de la périphérie réalisent un peu plus de déplacements (2,44 déplacements/jour) que ceux de Lyon et Villeurbanne (1,46 déplacements/jour). De même, les membres des ménages aisés font plus de déplacements quotidiens (1,93 déplacements/jour) que les membres des ménages plus modestes (1,73 déplacements/jour).

CONCLUSION

Cette étude évalue les impacts environnementaux générés par la mobilité urbaine à partir d'une approche croisant un modèle d'interaction transports – urbanisme (SIMBAD) et l'analyse de cycle de vie. Le modèle SIMBAD combine des données issues du recensement de la population de l'aire urbaine de Lyon, des fichiers SIRENE pour les entreprises, de l'Enquête Ménages Déplacements locale de 2006 ainsi que des données sur l'offre de transport (réseau de voirie et réseau de transports collectifs). L'unité fonctionnelle choisie, exprimée par habitant et par jour, permet d'intégrer dans l'analyse les pratiques de mobilité quotidienne, au-delà des performances techniques du système. Afin de fournir une vision globale des aspects environnementaux, neuf indicateurs ont été étudiés. Certains concernent des impacts planétaires (contribution aux changements climatiques, utilisation d'énergie). Les indicateurs de consommations de ressources relèvent de la capacité de la société à pérenniser son approvisionnement en ressources naturelles métalliques, fossiles ou en termes d'occupation des sols. Enfin, les enjeux sanitaires et écologiques sont représentés par des indicateurs concernant la pollution atmosphérique locale par des particules, oxydants photochimiques ou l'acidification.

Afin de représenter les différents enjeux environnementaux en présence, il nous semble nécessaire de renforcer l'évaluation environnementale grâce à une certaine diversité d'indicateurs permettant d'enrichir et d'encourager le débat public sur la mobilité urbaine et identifier des leviers d'actions pour en limiter ses impacts.

La principale conclusion, cohérente avec la littérature sur le domaine, de cette étude est la contribution dominante des véhicules particuliers sur l'ensemble des impacts étudiés : l'automobile représente au moins 87% de l'ensemble des impacts, y compris lorsque l'on observe les impacts avec une approche par analyse de cycle de vie. Cette conclusion confirme les résultats de différentes études préalables [Le Féon, 2014 ; Chester *et al.*, 2010]. L'action sur ce mode de transport paraît donc prioritaire dans une perspective de réduction des impacts. Par ailleurs, le modèle SIMBAD fournit une représentation détaillée des caractéristiques socio-économiques des ménages réalisant les déplacements. Nous en avons sélectionné deux en particulier : leur niveau de revenu et leur localisation résidentielle. Ces deux caractéristiques influencent fortement les impacts générés par leurs déplacements. Les ménages qui génèrent le plus d'impacts sont ceux qui habitent dans la périphérie la plus éloignée du centre du fait d'une faible accessibilité aux transports en commun, de plus longues distances par déplacement et d'un plus faible taux d'occupation des véhicules. A l'autre extrême, les habitants du centre-ville génèrent les impacts les plus modérés, du fait d'un meilleur accès aux transports en commun, de l'usage plus développé des modes de transports non-motorisés et de distances plus courtes par déplacement. Enfin, les revenus par personne influencent également les habitudes en termes de mobilité : les ménages dont les revenus sont les plus faibles se déplacent moins, sur de plus courtes distances.

La méthode ainsi mise en œuvre permettra par la suite d'envisager et de tester l'impact de différents scénarios technologiques, de report modal ou de politique

d'urbanisme à l'échelle d'un bassin de vie. L'utilisation de plusieurs indicateurs et l'estimation des impacts pour quatre phases du cycle de vie de la mobilité (production, maintenance et fin de vie des véhicules; fabrication des carburants; construction des infrastructures et utilisation des véhicules) peut mettre en évidence d'éventuels transferts de pollution entre différentes catégories d'impacts environnementaux ou entre les différentes phases. Par exemple, dans le cadre du développement de la mobilité électrique, réduisant les émissions de polluants atmosphériques liés à l'utilisation des véhicules, mais augmentant d'autres impacts liés à la fabrication des véhicules et du carburant, des approches par analyse de cycle de vie nous semblent intéressantes. De même, le recours à un modèle d'interactions entre transport et urbanisme fournit une estimation des localisations résidentielles des ménages au sein de l'aire urbaine en fonction des politiques envisagées. Ceci permet d'avoir une représentation à court et à long terme des émissions tant au niveau de leur responsabilité (identification des agents qui en sont responsables) que de la localisation des émissions directes. Cela peut également permettre de soulever d'éventuelles questions d'équité qui pourraient être sinon oubliées.

Un tel exercice restera, bien évidemment, toujours conditionné aux limites du modèle sur lequel il repose. Il pourra, par contre, apporter des éclairages nouveaux, complémentaires de travaux plus traditionnels soit en aménagement soit en ingénierie de l'environnement.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient les trois rapporteurs anonymes qui ont relu cet article ainsi que l'Institut des Transports et des Mobilités Urbaines du pôle de compétitivité LUTB Transports & Mobility Systems qui a financé le stage de master de Cyrille François.

BIBLIOGRAPHIE

- [Antoni, 2010] Antoni, J-P. (ed.), 2010, Modéliser la ville. Forme urbaine et politiques de transport. Paris, Economica, coll. Méthodes et Approches.
- [Bouzouina *et al.*, 2011] Bouzouina, L., Nicolas, J-P., Vanco, F., 2011, Evolution des émissions de CO₂ liées aux mobilités quotidiennes : une stabilité en trompe l'œil. *Recherche Transports Sécurité*, Vol. 27, n°2, pp. 128-139.
- [Cabrera, 2013] Cabrera, J., 2013, Quelle prise en compte des dynamiques urbaines dans la prévision de la demande de transport ? Thèse de doctorat en sciences économiques, Université de Lyon.
- [Chapleau, 2005] Chapleau, R., 2005, Mobilité urbaine et spatio-démographie : une relation fine à explorer, pp. 247-275 in Aguilera, Madre, Mignot, Les villes ont-elles achevé leur transition? Actes INRETS n°99, Lyon, XVI^e Entretiens Jacques Cartier.

- [Chester *et al.*, 2010] Chester, M.V., Horvath, A., Madanat, S., 2010, “Comparison of life-cycle energy and emissions footprints of passenger transportation in metropolitan regions”, *Atmospheric Environment*, n° 44, pp. 1071-1079.
- [CITEPA, 2014] CITEPA - Centre Interprofessionnel Technique d'Etudes de la Pollution Atmosphérique, 2014, Inventaire des émissions de polluants atmosphériques et de gaz à effet de serre en France – Format Secten. Rapport pour le Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie.
- [François, 2014] François, C., 2014. *For an environmental evaluation of urban mobility based on a LCA approach*. Mémoire de Master of Science. Cranfield University.
- [Goedkoop *et al.*, 2013] Goedkoop, M., Heijungs, R., Huijbregts, M., De Schryver, A., Struijs, J., Van Zelm, R., ReCiPe 2008 - A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level. First edition Report I : Characterisation; May 2013, <http://www.lcia-recipe.net>
- [Gallez et Hivert, 1998] Gallez, C., Hivert, L., 1998, BEED : mode d'emploi. Synthèse méthodologique pour les études “budget énergie environnement des déplacements”. Rapport de convention ADEME-INRETS.
- [Geurs et Van Wee, 2004] Geurs, K.T., Van Wee, B., 2004, Accessibility evaluation of land-use and transport strategies: review and research directions, *Journal of Transport Geography*, Vol. 12, Issue 2, pp. 127-140.
- [Grassot *et al.*, 2012] Grassot, L., Nicolas, J-P., Pluvinet, P., 2012, De l'intérêt de contrôler l'impact des hypothèses de composition du parc automobile sur l'estimation des émissions liées au trafic routier. *Recherche Transports Sécurité*, Vol. 28, n°3-4, pp. 215-227.
- [ISO, 2006] ISO, 2006, ISO 14040 : 2006, Management environnemental - Analyse du cycle de vie - Principes et cadre. Paris, AFNOR
- [Joumard et Gudmundsson, 2010] Joumard, R., Gudmundsson, H. (ed.), 2010, Indicators of sustainability in transport – an interdisciplinary approach to methods. INRETS research report, Bron, France.
- [Le Féon, 2014] Le Féon, S., 2014, Evaluation environnementale des besoins de mobilité des grandes aires urbaines en France : approche par analyse de cycle de vie. Thèse en Ingénierie de l'Environnement, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, 295 p.
- [MEDDE 2014] MEDDE, Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie, 2014, Emissions de gaz à effet de serre (Monde, Europe, France), disponible sous : www.developpement-durable.gouv.fr/Emissions-de-la-France,33791.html (consulté le 3 mai 2015).
- [Nicolas, 2010] Nicolas, J.-P., 2010, SIMBAD : un outil pour intégrer le développement durable dans les politiques publiques, in Antoni, J-P. (ed.), Modéliser la ville. Forme urbaine et politiques de transport. Paris, Economica, coll. Méthodes et Approches.
- [Nicolas *et al.*, 2013a] Nicolas, J-P., Verry, D., Longuar, Z., 2013, “Evolutions récentes des émissions de CO2 liées à la mobilité des Français : analyser les dynamiques à l'œuvre grâce aux enquêtes nationales Transports de 1994 et 2008”, *Economie et Statistique*, n°457-458, pp. 161-183.
- [Nicolas *et al.*, 2013b] Nicolas, J.-P., Bonnel, P., Bouzouina, L., Cabrera, J., Pascal, L., Pluvinet, P., Toilier, F., Zuccarello, P., 2013, Projet SIMBAD 2 – Une analyse

temporelle de long terme permettant de mieux simuler les mobilités pour une agglomération durable, LET, Rapport final de convention Predit 4, 168 p.

- [Orfeuill, 1984] Orfeuill, J-P., 1984, Les budgets énergie-transport : un concept, une pratique, des résultats. *RTS*, n°2, pp. 23-29.
- [Toilier *et al.*, 2005] Toilier, F., Alligier, L., Patier, D., Routhier, J-L., 2005, Vers un modèle global de simulation de la logistique urbaine : FRETURB, version 2. Lyon, LET rapport de recherche DRAST, juillet 2005, 109 p.
- [Verdon *et al.*, 2008] Verdon, B., Varnaison-Revolle, P., Lebondidier, C., Verry, D., 2008. Mobilité urbaine et réduction des émissions de gaz à effet de serre, *TEC* n°198 – avril - juin 2008
- [Verry *et al.*, 2015] Verry, D., Hivert, L., Merle, N., Nguyen, Q., 2015, Le diagnostic énergie émissions des mobilités (DEEM) Du pari méthodologique à la standardisation, in CEREMA, Mobilité en transitions - modéliser et représenter les enjeux de mobilité. Ed. CEREMA, à paraître en 2015.
- [Waddell, 2002] Waddell P., 2002, «URBANSIM : Modeling Urban Development for Land Use, Transportation and Environmental Planning». *Journal of the American Planning Association*, Vol. 68, No. 3, pp. 297–314.