



NNT : 2014 EMSE 0729

THÈSE

présentée par

Samuel LE FEON

pour obtenir le grade de

Docteur de l'École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne

Spécialité : Sciences et Génie de l'Environnement

ÉVALUATION ENVIRONNEMENTALE DES BESOINS DE MOBILITE DES GRANDES AIRES URBAINES EN FRANCE APPROCHE PAR ANALYSE DE CYCLE DE VIE

soutenue à Paris, le 17 Janvier 2014

Membres du jury

Rapporteurs :	Agnès JULLIEN	Directeur de Recherche, IFSTTAR, Bouguenais
	Jean-Pierre NICOLAS	Chargé de Recherche, LET - ENTPE, Vaulx-en-Velin
Examineurs :	Michel ANDRE	Directeur de Recherche, IFSTTAR, Bron
	Lynda AISSANI	Ingénieur de Recherche, IRSTEA, Rennes
Directrices de thèse :	Valérie LAFOREST	Maître de Recherche, ENSMSE, Saint-Etienne
	Natacha GONDRAN	Maître Assistant, ENSMSE, Saint-Etienne
Invités :	Denis LE BOULCH	Ingénieur Expert, EDF R&D, Moret-sur-Loing
	Marie-Agnès GIRARD	Maître assistant, ENSMSE, Saint-Etienne

J'ai vu une des nouvelles locomotives de l'Ouest, plus longue encore, plus haute, plus simple que les autres ; les rouages en sont finis comme ceux d'une montre ; cela roule presque sans bruit ; on sent que tous les efforts y sont utiles et tendent tous à une même fin ; la vapeur ne s'en échappe point sans avoir usé sur les pistons toute l'énergie qu'elle a reçue du feu ; j'imagine le démarrage aisé, la vitesse régulière, la pression agissant sans secousse, et le lourd convoi glissant de deux kilomètres en une minute. Au reste le tender monumental en dit long sur le charbon qu'il faudra brûler.

Voilà bien de la science, bien des plans, bien des essais, bien des coups de marteau et de lime. Tout cela pourquoi ? Pour gagner peut-être un quart d'heure sur la durée du voyage entre Paris et Le Havre. Et que feront-ils, les heureux voyageurs, de ce quart d'heure si chèrement acheté ? Beaucoup l'useront sur le quai à attendre l'heure ; d'autres resteront un quart d'heure de plus au café et liront le journal jusqu'aux annonces. Où est le profit ? Pour qui est le profit ?

Chose étrange, le voyageur, qui s'ennuierait si le train allait moins vite, emploiera un quart d'heure, avant le départ ou après l'arrivée, à expliquer que ce train met un quart d'heure de moins que les autres à faire le parcours. Tout homme perd au moins un quart d'heure par jour à tenir des propos de cette force, ou à jouer aux cartes, ou à rêver. Pourquoi ne perdrait-il pas aussi bien ce temps-là en wagon ?

Nulle part on n'est mieux qu'en wagon ; je parle des trains rapides. On y est fort bien assis, mieux que dans n'importe quel fauteuil. Par de larges baies on voit passer les fleuves, les vallées, les collines, les bourgades et les villes ; l'oeil suit les routes à flanc de coteau, des voitures sur ces routes, des trains de bateaux sur le fleuve ; toutes les richesses du pays s'étalent, tantôt des blés et des seigles, tantôt des champs de betteraves et une raffinerie, puis de belles futaies, puis des herbages, des boeufs, des chevaux. Les tranchées font voir les couches du terrain. Voilà un merveilleux album de géographie, que vous feuillotez sans peine, et qui change tous les jours, selon les saisons et selon le temps. On voit l'orage s'amasser derrière les collines et les voitures de foin se hâter le long des routes ; un autre jour les moissonneurs travaillent dans une poussière dorée et l'air vibre au soleil. Quel spectacle égale celui-là ?

Mais le voyageur lit son journal, essaie de s'intéresser à de mauvaises gravures, tire sa montre, bâille, ouvre sa valise, la referme. A peine arrivé, il hèle un fiacre, et court comme si le feu était à sa maison. Dans la soirée, vous le retrouverez au théâtre ; il admirera des arbres en carton peint, des fausses moissons, un faux clocher ; de faux moissonneurs lui brailleront aux oreilles ; et il dira, tout en frottant ses genoux meurtris par l'espèce de boîte où il est emprisonné : « Les moissonneurs chantent faux ; mais le décor n'est pas laid. »

2 juillet 1908

Extrait de « Propos sur le Bonheur », Alain

Remerciements

Ce travail a été encadré conjointement par l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, sous la direction de Valérie Laforest et Natacha Gondran, et EDF R&D, auprès de Denis Le Boulch.

Tous mes remerciements vont d'abord à Madame Agnès Jullien, Directeur de Recherche à l'IFSTTAR (Bouguenais) et Monsieur Jean-Pierre Nicolas, chargé de Recherche au LET (Vaulx-en-Velin) pour avoir accepté d'être rapporteurs de mon travail de doctorat et membres du jury de soutenance. Je remercie également Mesdames Lynda Aissani, ingénieur de Recherche à IRSTEA (Rennes) et Marie-Agnès Girard, maître-assistant à l'ENSMSE (Saint-Etienne) ainsi que Monsieur Michel André, directeur de Recherche à l'IFSTTAR (Bron) d'avoir accepté de faire eux-aussi partie du jury.

Je souhaite également remercier l'ensemble des personnes avec qui j'ai pu échanger au cours de cette thèse, et qui ont contribué, à leur manière à l'élaboration de ce manuscrit. En particulier, merci à tous ceux qui m'ont aidé au cours de ma collecte de données à Saint-Etienne : Monsieur Fouad Bellouannas pour m'avoir accueilli à Saint-Etienne Métropole (SEM) et orienté vers les interlocuteurs appropriés que je remercie également pour leur disponibilité : Mesdames Sophie Bonnefoi, Rachel Rossignol, Florence Nicolas et Monsieur Thomas Vercasson (SEM), Monsieur Bernard Delage (STAS), Monsieur Daniel Zobebe (EPURES). Merci également de m'avoir permis de rendre compte des premiers résultats du cas stéphanois au sein des locaux de Saint-Etienne Métropole. Merci ensuite à Madame Agnès Jullien et Monsieur Michel Dauvergne (IFSTTAR, Bouguenais) de m'avoir accueilli et expliqué les travaux qu'ils réalisent sur les ACV d'infrastructures de transports. Un grand merci à Monsieur Michel André pour ses conseils lors de mes venues à l'IFSTTAR (Bron) et lors de nos rencontres à Paris. Merci enfin à Marie-Agnès Girard (EMSE) de m'avoir consacré une partie de son temps lors de mes venues à l'école.

Un grand merci va ensuite à Valérie et Natacha, qui ont assuré la direction de ce travail. Tout au long de ces trois années de thèse, vos nombreux conseils, votre expérience et votre implication ont été plus que précieux pour mener à bien ce travail. Merci aussi à Jacques Bourgois d'avoir participé au lancement de ce travail et à Zahia Mazer pour sa disponibilité. Plus largement, je remercie l'ensemble du laboratoire PIESO pour son accueil. Bien que je n'aie été présent dans vos locaux que de manière sporadique, vous avez participé à rendre mes séjours à Saint-Etienne productifs mais aussi passionnants et agréables. Merci à Carine, Jonathan, Lucile, Sandrine, Sophie, Valentine, Guillaume.

Tous mes remerciements vont ensuite à Denis Le Boulch qui m'a accueilli pendant ces trois années au sein de l'équipe ACV d'EDF E&D. Ton expertise a souvent permis d'éclairer ce sujet de doctorat. Merci pour ta disponibilité. Merci à Vanessa, Thierry, Marie-Lou et Yann qui ont contribué à l'encadrement de ce travail à EDF. J'en profite pour remercier l'ensemble de l'équipe E22 et plus largement le département EPI. En particulier, merci à Pierryves, Baptiste et Aurélie. L'union fait la force et j'ai adoré partager avec vous cette expérience du thésard E22. Bon courage à toi colloc, pour la

troisième année. Ce n'est sans doute pas la plus simple, mais à coup sûr la plus libératrice. Merci à Raph, Mathieu, Rémy (on lâche rien), Marie-Lou, Kevin, José, Thomas, Christian, Maxime, Cyrielle, Lucie, Julien. Merci aussi à ceux qui ont apporté, souvent pendant les mois d'été, leur jeunesse et leur insouciance. Merci aux basketteurs et aux badistes qui m'ont offert une évasion salutaire pendant les pauses méridiennes. Merci à Marc pour sa motivation sans faille. Enfin, merci à tous ceux qui ont permis de rendre mon départ du 77 presque difficile : Benoit, Sophie, Géraud, Jennifer, Laura, François, Louise, Juan.

Merci à ceux qui ont participé, à un moment ou l'autre à me conduire vers cette thèse, en particulier Jérôme Marty, Olivier Réthoré, Emilie Machefaux, Christine Cros et Valérie Héquet.

Merci ensuite aux bretons, qui ont soutenu, de près ou de loin, cette aventure : Tomig, Youn et Tim, mes compagnons d'accordéon (et autres instruments barbares), Joanne, Anné, Anne, Laëtitia, Laure, Erwan, Samie, Adrien (oui breton...). Merci au Belsunce, celui de Rennes, troisième étage de l'internat à Chato : Tom, Brendan, Aurélie, Evan, Touch, Brieg, Antoine, Cyrille, Maud, Camille, ça fait déjà 10 ans, et ce n'était que le début.

Merci aux Nantais, qui sont aussi peu bretons. Merci de vous être exilés à Paris pour m'accompagner pendant cette thèse. Merci aux collocs, Erwan, Pickwé et Jean-Miche. Merci à Jeanne, Tibo, Thibaut, Zoé, Axel, Doudou, Marie, Hubert, Potpot, Gaby, Tacou, Santi, Adrien, Noam, Gus.

Merci à tous ceux qui ont participé aux relectures de ce manuscrit. Ils ont déjà été cités mais méritent un rappel. Seules deux pages n'ont pas été relues, que je termine ici. Je prends donc l'entière responsabilité des fautes possibles et malheureux oublis.

Enfin, un immense merci à ma famille qui me soutient depuis toujours dans ces longues études. Merci à mes parents pour à peu près tout, mais surtout pour les moments de calme que j'ai pu trouver à la maison, lorsque la pression était un peu forte à Paris. Merci à Aline et Vio pour leur précieux soutien, leurs conseils avisés, leurs relectures et leur écoute. Merci bien sûr à Antonin et Arnaud qui les ont accompagnées dans toutes ces tâches.

Table des matières

Remerciements	4
Table des matières	6
Liste des abréviations.....	11
Table des Figures.....	15
Table des Tableaux	18
Résumé.....	20
Abstract.....	22
Introduction	23
I. Chapitre I : Etat de l'art	27
I.1 La mobilité urbaine, premières définitions.....	29
I.1.1 Définitions.....	29
I.1.2 Les modes de déplacement.....	33
I.2 La mobilité urbaine, système complexe, à la croisée des champs de recherche.....	37
I.2.1 La mobilité, constante mais changeante.....	37
I.2.2 La mobilité, et son rôle dans les pratiques sociales.....	39
I.2.3 La mobilité, différente selon les personnes.....	39
I.2.4 Les réseaux urbains et la morphologie urbaine, structurants pour la mobilité et structurés par les déplacements	40
I.2.5 L'organisation urbaine et la mobilité, sujets phares d'intérêt et d'investissement des collectivités 41	
I.2.6 Les déterminants de choix modaux	44

I.3	Les enjeux environnementaux des transports et de la mobilité.....	53
I.3.1	Les émissions de gaz à effet de serre	53
I.3.2	Les polluants réglementés des transports.....	55
I.3.3	Les autres enjeux environnementaux.....	58
I.4	Les méthodes d'évaluation et leur application à la mobilité et aux transports	64
I.4.1	L'évaluation environnementale « classique » de la mobilité : les émissions issues de la phase d'usage	64
I.4.2	Les différents périmètres pour le calcul d'émissions de polluants	69
I.4.3	Les méthodes d'évaluation environnementale	77
I.4.4	Conclusion de partie.....	80
I.5	L'analyse de cycle de vie (ACV).....	81
I.5.1	Introduction historique à la notion d'ACV.....	81
I.5.2	Principes généraux	81
I.5.3	Les quatre étapes de l'ACV	82
I.6	Le besoin de déplacement.....	92
I.6.1	Le besoin et l'économie de fonctionnalité	92
I.6.2	Du besoin au motif de déplacement.....	93
I.6.3	Les nomenclatures de besoins de déplacements.....	94
I.6.4	Conclusion de partie.....	95
I.7	Conclusion du chapitre – hypothèses et questions de Recherche.....	96
I.7.1	Hypothèses de Recherche.....	97
I.7.2	Questions de Recherche	98

II.	Chapitre II : Méthodologie et cas d'application.....	99
II.1	Description générale.....	101
II.1.1	Choix d'un cas d'application.....	101
II.1.2	Unité fonctionnelle (UF).....	102
II.1.3	Système étudié.....	103
II.1.4	Indicateurs environnementaux considérés.....	105
II.1.5	Exigences relatives à la qualité des données.....	106
II.2	Les données d'inventaire.....	107
II.2.1	Les données de déplacement.....	109
II.2.2	Les données relatives aux modes.....	125
II.3	Résultats pour l'agglomération stéphanoise.....	135
II.3.1	Résultats pour la mobilité des personnes.....	136
II.3.2	Résultats pour la mobilité de marchandises.....	145
II.4	Conclusion et transition.....	147
III.	Chapitre III : Identification de parangons d'aires urbaines et application de la méthodologie d'évaluation à différents cas particuliers.....	151
III.1	Proposition d'une typologie d'aires urbaines par analyses multivariées.....	154
III.1.1	Détermination d'une typologie d'aires urbaines.....	154
III.1.2	Les individus (les aires urbaines).....	155
III.1.3	Les variables.....	156
III.2	Application de la méthodologie d'évaluation environnementale aux parangons d'aires urbaines identifiés.....	172
III.2.1	Présentation des aires urbaines retenues.....	172

III.2.2	Résultats.....	176
III.2.3	Incertitude sur les résultats	189
III.3	Conclusions de la partie	191
IV.	Apports scientifiques, limites du travail et perspectives	193
IV.1	Apports du travail de thèse.....	195
IV.1.1	Développements méthodologiques.....	195
IV.1.2	Apports pour l'aide à la décision	198
IV.2	Limites du travail.....	201
IV.2.1	Limites relatives aux données.....	201
IV.2.2	Limites relatives aux indicateurs ACV	208
IV.2.3	Incertitudes	210
IV.3	Perspectives.....	212
IV.3.1	Potentialités pour le test de scénarios.....	212
IV.3.2	Utilisation des méthodes d'analyse factorielle dans l'analyse des résultats	215
IV.3.3	Prise en compte des infrastructures	216
IV.3.4	Analyse de Cycle de Vie, impacts à horizons géographiques variables et spatialisation	220
	Conclusion générale.....	227
	Bibliographie	233
	Annexes	256
	Annexe 1 : Seuils réglementaires d'émissions de NO _x dans l'air.....	257
	Annexe 2 : Revue des méthodes d'évaluation recensées dans la littérature	258
	Annexe 3 : Liste des aires urbaines de plus de 250 000 habitants au découpage de 2002	264

Annexe 4 : Cartographie des EMD avant 2007	265
Annexe 5 : Matrice des distances par mode et par besoin pour l'agglomération de Saint-Etienne ..	266
Annexe 6 : Exemples de Fiches descriptives pour les modes de transport	269
Annexe 7 : Données pour la modélisation des modes de transports	281
Annexe 8 : Figures complémentaires pour l'Analyse en Composantes Principales.....	289
Annexe 9 : Compléments sur les aires urbaines	293
Annexe 10 : Valorisation des travaux.....	295

Liste des abréviations

AASQA : Associations Agréées de Surveillance de la Qualité de l'Air

ACP : Analyse en Composantes Principales

ACV : Analyse de Cycle de Vie

ADEME : Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie

AOTU : Autorité Organisatrice des Transports Urbains

AU : Aire Urbaine

BAC : Baccalauréat

BEED : Budget Energie Environnement Déplacements

BEP : Brevet d'Etudes Professionnelles

BEPC : Brevet d'Etudes du Premier Cycle (Diplôme National du Brevet des Collèges)

BET : Budget Energie Transport

CAH : Classification Ascendante Hiérarchique

CAP : Certificat d'Aptitude Professionnelle

CAS : Centre d'Analyses Stratégiques

CCFA : Comité des Constructeurs Français d'Automobiles

CEP : Certificat d'Etudes Primaires

CERTU : Centre d'Etudes sur les Réseaux, les Transports, l'Urbanisme et les constructions publiques

CFC : chlorofluorocarbures

CGDD : Commissariat Général au Développement Durable

CIRAIG : Centre interuniversitaire de recherche sur le cycle de vie des produits, procédés et services.

CITEPA : Centre Interprofessionnel Technique d'Etudes de la Pollution Atmosphérique.

COV : Composés Organiques Volatils

COVNM : Composés Organiques Volatils Non Méthaniques

CP : Composante Principale

CSP : Catégorie Sociaux Professionnelle

DALY : Disability Adjusted Life Yeras

DREAL : Direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement

ECLUSE : Etude des Changements de Logistique Urbaine de Saint-Etienne

EDVM : Enquête Déplacements Ville Moyenne

EEA : Agence Européenne de l'Environnement

EI : Ecoinvent

EIE : Etude d'Impacts sur l'Environnement

EMD : Enquête Ménages Déplacements

ENTD : Enquête Nationale Transports Déplacements

ETC : Enquête Transport et Communication

GES : Gaz à Effet de Serre

GHG : Greenhouse Gas

GIEC : Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat

HFC : hydrocarbures fluorés

ICV : Inventaire de Cycle de Vie

IFSTTAR : Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux

INSEE : Institut national de la statistique et des études économiques

IPCC : Intergovernmental Panel on Climate Change

IRSTEA : Institut national de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture

ISO : International Standardization Organization

LAURE : Loi sur l'Air et l'Utilisation Rationnelle de l'Energie

LCA : Life Cycle Assessment

LET : Laboratoire d'Economie des Transports

LOTI : Loi d'Orientation des Transports Intérieurs

MàP : Marche à Pied

NEDC : New European Driving Cycle

OEET : observatoire énergie-environnement des infrastructures de transport

ORT : Observatoire Régional des Transports

PDE : Plan de Déplacements en Entreprise

PDU : Plan de Déplacements Urbaines

PKM : personne.kilomètre

PM : Particle Matter

PRG : Pouvoir de Réchauffement Global

PTAC : Poids Total Autorisé en Charge

PTS : Particules Totales en Suspension

PTU : Périmètre des Transports Urbains

SCOT : Schéma de Cohérence Territoriale

SEM : Saint-Etienne Métropole

SETAC : Society of environmental toxicology and chemistry

SIG : Système d'Information Géographique

SNCF : Société Nationale des Chemins de Fer

SOeS : Service de l'Observation et des statistiques

STAS : Société de Transports de l'Agglomération Stéphanoise

TC : Transports en Commun

TCNU : Transport en Commun Non Urbain

TCU : Transports en Commun Urbain

TERM : Transport Environment Reporting Mechanism

TIC : Technologies de l'Information et de la Communication

TKM : tonne.kilomètre

TMV : Transport de Marchandises en Ville

UF : Unité Fonctionnelle

UTP : Union des Transports Publics

UVP : Unité de Véhicule Particulier

VCI : Véhicule à Combustion Interne

VE : Véhicule électrique

VP : Véhicule particulier

VUL : Véhicule Utilitaire Léger

Table des Figures

Figure 1 : Zonage en aires urbaines, d'après (Le Jeannic 1997).....	32
Figure 2 : Parts de marché du VP en pourcentages de distances parcourues dans différentes régions du Monde (Joly et al. 2006).....	34
Figure 3 : Répartition modale en pourcentage de déplacements locaux en France en 2008 (Trégouët 2010).....	35
Figure 4 : Répartition sectorielle des émissions mondiales de GES (Bernstein et al. 2008)	55
Figure 5 : Description des polluants réglementés des transports (Flandrin 2002) – HC : Hydrocarbures ; HCT : Hydrocarbures Totaux ; HCNM : Hydrocarbures non méthaniques ; COV : Composés organiques volatils ; COVNM : Composés organiques volatils non méthaniques	56
Figure 6 : Carte des indicateurs relevés pour évaluer la partie environnement dans une évaluation de l'impact sur le développement durable d'un projet d'infrastructure – adapté de (Fernández-Sánchez & Rodríguez-López 2010). En rouge, les indicateurs figurant parmi les 30 plus pertinents définis par consultation d'experts.....	60
Figure 7 : Schéma descriptif des périmètres existant dans l'étude des véhicules	71
Figure 8 : Représentation graphique des différents outils d'évaluation selon deux paramètres : les enjeux environnementaux considérés et le périmètre couvert (inspiré de (Risch et al. n.d.)).....	79
Figure 9 : Les quatre phases de l'ACV	82
Figure 10 : caractérisation des flux élémentaires en catégories d'impacts ou dommages potentiels sur l'environnement (Réthoré & Le Féon 2010 adapté de Joliet et al. 2005).....	87
Figure 11 : Nomenclature des motifs de déplacement INSEE, EMD représentée par (Le Féon et al. 2012).....	94
Figure 12 : Subdivision de l'unité fonctionnelle globale en UF intermédiaires	103
Figure 13 : Territoire de Saint-Etienne Métropole (avec un pointeur : les deux communes rattachées à l'agglomération en 2013) - (Office de tourisme de Saint-Etienne Métropole 2013)	104
Figure 14 : Organisation générale de la méthodologie de quantification des impacts environnementaux de la mobilité des personnes (Le Féon et al. 2012).	107
Figure 15 : Nomenclature des motifs de déplacement EMD d'après (Certu 2009)	110
Figure 16 : Nomenclature des motifs de déplacement de marchandises TMV (Chiron-Augereau 2009).....	113
Figure 17 : Motifs des déplacements les jours ouvrés pour l'Agglomération de Saint-Etienne Métropole (en pourcentage de nombre de déplacements) (Sources : fichiers de données EMD 2009).	115
Figure 18 : Répartition modale des déplacements les jours ouvrés pour l'Agglomération de Saint-Etienne Métropole (en nombre de déplacements) (Sources : fichiers de données EMD 2009)	116
Figure 19 : Répartition kilométrique des déplacements par type de marchandise.....	121
Figure 20 : Répartition kilométrique des déplacements de marchandises à Saint-Etienne Métropole	122
Figure 21 : Répartition par type de benne de la collecte quotidienne des déchets ménagers et assimilés pour Saint-Etienne Métropole	123
Figure 22 : Répartition des motorisations du parc automobile stéphanois (EMD 2009).....	125

Figure 23 : Répartition du parc automobile stéphanois en normes Euro en 2009 (EMD 2009).....	126
Figure 24 : Analyse de sensibilité sur le taux d'occupation des VP.....	128
Figure 25 : Répartition des types de motorisation dans la flotte de bus stéphanoise (GO : diesel ; O# : diesel avec émulsion d'eau ; FAP : filtre à particule ; EEV n'est pas à proprement parler une norme EURO, mais l'évolution de l'EURO5, en attendant l'arrivée de l'EURO6)	131
Figure 26 : Bilans unitaires d'émissions de GES des modes de transport et contributions des phases du cycle de vie - en g CO ₂ eq/pkm	134
Figure 27 : Emissions de GES par besoin de déplacement en pourcentage de g CO ₂ eq.....	137
Figure 28 : Emissions de GES par besoin de déplacement en pourcentage de g CO ₂ eq (hors déplacements à destination du domicile).....	137
Figure 29 : Emissions de GES par motif en fonction de la distance annuelle parcourue tous modes confondus.....	139
Figure 30 : Emissions de GES par mode de transport en pourcentage de g CO ₂ eq.....	139
Figure 31 : Contributions cumulées des différentes phases du cycle de vie des modes de transport pour la mobilité des personnes à Saint-Etienne.....	140
Figure 32 : Emissions de GES par besoin de déplacement relatives à la pkm, en kgCO ₂ eq/pkm....	141
Figure 33 : Impacts potentiels normalisés avec la méthode de caractérisation Impact 2002+ de la mobilité des personnes à Saint-Etienne Métropole, du lundi au vendredi (en équivalent habitant)	144
Figure 34 : Contribution des modes de transport aux différentes catégories d'impact potentiel.....	145
Figure 39 : Contribution de chaque type de marchandises aux émissions de GES à SEM.....	146
Figure 40 : Représentation géographique des aires urbaines retenues pour l'élaboration d'une typologie d'aires urbaines	156
Figure 41 : Représentation des variables dans le plan factoriel (CP1 ; CP2)	161
Figure 42 : Représentation des individus dans le plan factoriel (CP1 ; CP2).....	163
Figure 43 : Représentation en dendrogramme des résultats de la CAH.....	167
Figure 44 : Représentation géographique des classes d'aires urbaines	168
Figure 47 : Répartition modale à Valenciennes (en part de déplacements)	173
Figure 48 : Répartition des déplacements selon le motif à Valenciennes.....	174
Figure 51 : Répartitions modales (tous modes) dans les quatre aires urbaines étudiées.....	178
Figure 52 : Emissions de GES par pkm en fonction de la répartition (diesel essence) à Bordeaux..	180
Figure 53 : Emissions de NO _x par pkm en fonction de la répartition (diesel-essence) à Bordeaux.	180
Figure 54 : Parts modales (en % de pkm) comparées des trajets vers l'université et les grandes écoles dans les quatre aires urbaines étudiées.....	183
Figure 55 : Parts modales (en % de pkm) comparées des trajets vers la crèche ou la nourrice dans les quatre aires urbaines étudiées.....	184
Figure 56 : Parts modales (en % de pkm) comparées des trajets pour le motif « recherche d'emploi » dans les quatre aires urbaines étudiées.....	185
Figure 57 : Résultats de la caractérisation via la méthode IMPACT 2002+ rapportés à la pkm normalisés (Bordeaux = 1). Le choix de Bordeaux comme référence, pour cette représentation et pour les suivantes s'est fait arbitrairement.....	189
Figure 62 : Simplification par l'ACP.....	196
Figure 63 : Description des quatre étapes pour l'insertion d'une nouvelle solution de mobilité dans la méthodologie (exemple du véhicule électrique)	207

Figure 64 : Représentation générale de la méthodologie (en bleu) et des étapes complémentaires possibles (en vert).....	224
Figure 65 : Seuils réglementaires d'émissions de NOx dans l'air (Air Pays de la Loire, 2006)	257
Figure 66 : Cartographie des EMD avant 2007 (Certu, 2008)	265
Figure 67 : Renseignement des paramètres dans Ecoinvent	Erreur ! Signet non défini.
Figure 68 : représentation des variables dans le plan factoriel (CP1 ; CP3).....	289
Figure 69 : représentation des variables dans le plan factoriel (CP2 ; CP3).....	289
Figure 70 : représentation des individus dans le plan factoriel (CP1 ; CP3).....	290
Figure 71 : représentation des individus dans le plan factoriel (CP2 ; CP3).....	291
Figure 72 : représentation des variables dans le plan (CP1 ; CP2) en considérant les motifs de déplacement comme variables illustratives	292
Figure 76 : répartition modale à Toulon (en part de déplacements).....	293
Figure 77 : répartition des déplacements selon le motif à Toulon	293
Figure 78 : répartition modale à Bordeaux (en part de déplacements).....	294
Figure 79 : répartition des déplacements selon le motif à Bordeaux	294

Table des Tableaux

Tableau 1 : Les déterminants socio-démographiques de la mobilité urbaine.....	50
Tableau 2 : Les déterminants spatiaux de la mobilité urbaine	51
Tableau 3 : Les déterminants propres aux trajets de la mobilité urbaine	51
Tableau 4 : Les déterminants socio-psychologiques de la mobilité urbaine	52
Tableau 5 : PRG à 100 ans des principaux GES (Bernstein et al. 2008).....	54
Tableau 6 : Description des différents périmètres existant dans l'étude des véhicules, d'après (Picherit, 2010).....	71
Tableau 7 : Indicateurs midpoint de la méthode de caractérisation IMPACT 2002+	106
Tableau 9 : Distance moyenne par motif (ou groupe de motifs), tous modes confondus.....	117
Tableau 10 : Distances moyennes ajustées par motif de déplacement, tous modes confondus	119
Tableau 11 : Répartition des déplacements par catégorie de PTAC (Albergel et al. 2006)	121
Tableau 12 : Taux d'occupation des véhicules particuliers par motif de déplacement à Saint-Etienne	128
Tableau 13 : Répartition modale kilométrique des types de bus à Saint-Etienne (données STAS)...	130
Tableau 14 : Taux de remplissage des différents véhicules de transports en commun urbains	130
Tableau 15 : Répartitions modales kilométriques des trois grands secteurs modaux (VP, TC, MâP), émissions de GES/pkm.....	143
Tableau 16 : Aires urbaines considérées pour l'élaboration d'une typologie d'aires urbaines	155
Tableau 17 : Déterminants sociaux-démographiques de la mobilité urbaine	157
Tableau 18 : Déterminants spatiaux de la mobilité urbaine	159
Tableau 19 : Déterminants propres aux trajets.....	160
Tableau 20 : Variables contributives à l'axe CP1.....	162
Tableau 21 : Individus contributeurs à l'axe CP1.....	162
Tableau 22 : Variables contributives à l'axe CP2.....	164
Tableau 23 : Individus contributeurs à l'axe CP2.....	164
Tableau 24 : Variables contributives à l'axe CP3.....	165
Tableau 25 : Individus contributeurs à l'axe CP3.....	165
Tableau 26 : Individus et variables de la classe 1	169
Tableau 27 : Individus et variables de la classe 2	169
Tableau 28 : Individus et variables de la classe 3	170
Tableau 29 : Individus et variables de la classe 4	171
Tableau 30 : Individus et variables de la classe 5	171
Tableau 31 : Emissions de GES dans les aires urbaines étudiées.....	176
Tableau 32 : Emissions de GES relativisées par la distance annuelle parcourue pour les aires urbaines étudiées	177
Tableau 33 : Parts modales caractéristiques pour les quatre aires urbaines étudiées.....	178
Tableau 34 : Part des différents types d'énergie dans la flotte automobile des aires urbaines étudiées	179

Tableau 35 : Résultats des émissions de GES par pkm pour une répartition diesel/essence moyenne	179
Tableau 36 : Différence à la moyenne pour les émissions de GES par pkm, par aire urbaine et par besoin de déplacement. En gras : les résultats différant de 10 à 20% du résultat moyen pour le besoin. En souligné, ceux différant de plus de 20%.	181
Tableau 37 : Evolution des émissions de GES pour une pkm parcourue vers l'université ou les grandes écoles, en fonction du taux d'occupation de l'automobile.....	183
Tableau 38 : Emissions de GES évitables par besoin et par cas d'étude en kg CO ₂ eq (X : valeurs déjà inférieures à la moyenne des aires urbaines)	187
Tableau 39 : Indicateurs midpoint de la méthode de caractérisation IMPACT 2002+	188
Tableau 40 : Caractéristiques des trois routes proposées pour l'exemple	218
Tableau 41 : Propriétés d'un véhicule de type Vi.....	218
Tableau 42 : Analyse de sensibilité sur l'influence de la distance à la carrière sur le bilan GES du trafic automobile.....	220
Tableau 43 : Echelle spatiale des différentes catégories d'impact en ACV, d'après (Aissani 2008; Marchand 2013).....	221
Tableau 44 : Liste des aires urbaines de plus de 250 000 habitants au découpage de 2002	264
Tableau 45 : Paramètres retenus pour la modélisation des bus	270
Tableau 45 : Paramètres retenus pour la modélisation des tramways.....	277
Tableau 46 : Inventaires de base utilisés pour les modes de transport.....	281
Tableau 47 : valeurs retenues pour les émissions directes de CO ₂ pour les différentes automobiles (d'après outil de modélisation interne EDF (VICTOR)).....	287

Résumé

Les déplacements de personnes et de marchandises sont tenus pour responsables d'une part importante des impacts environnementaux à l'échelle de la ville. Cependant, les méthodes traditionnelles d'évaluation de leurs impacts environnementaux ne prennent pas en compte les notions de cycle de vie et de besoins de déplacement. Cette thèse part de l'hypothèse que, les impacts environnementaux des phases situées en amont ou en aval de la phase d'usage (le déplacement) ne sont pas négligeables. D'autre part, ces travaux font l'hypothèse que l'étude différenciée des besoins de mobilité peut apporter un éclairage nouveau en termes d'analyse de la mobilité urbaine, notamment dans la perspective d'une aide à la décision.

La méthodologie proposée par ce travail de thèse se concentre autour de ces deux idées principales. Tout d'abord, la mobilité est subdivisée en besoins, qui peuvent chacun être satisfaits d'une manière spécifique. Cette façon propre de répondre à chaque besoin induit, *a priori*, des impacts environnementaux différents. Ces derniers sont calculés à l'aide de la méthode d'Analyse de Cycle de Vie (ACV), de manière à prendre en compte les impacts tout au long du cycle de vie (phase d'usage, construction, entretien, fin de vie des infrastructures, fabrication, entretien et fin de vie des modes de transport). L'unité fonctionnelle (UF) globale retenue (« *permettre la mobilité des habitants et le transports de marchandises d'une aire urbaine en France pendant une année* ») se décline donc en UF intermédiaires du type « permettre les trajets domicile-travail des habitants d'une aire urbaine les jours ouvrés, pendant une année ».

La méthodologie a tout d'abord été développée, testée et validée en se focalisant sur un cas d'application : les émissions de GES de l'Agglomération de Saint-Etienne Métropole. Cette phase a été l'occasion de se confronter à la réalité du terrain et notamment à la disponibilité des données. Elle a aussi permis de rencontrer les acteurs de la mobilité à Saint-Etienne et de se procurer des données spécifiques. Ce cas d'application a mis en avant une première série de résultats, confirmant à la fois la part non négligeable d'impacts hors phase d'usage (par exemple, 17% des émissions de GES) et la disparité des émissions pour une personne.kilomètre effectuée selon le besoin de déplacement. Ensuite, une proposition de classification des aires urbaines a été faite, sur la base d'une étude de littérature identifiant un jeu de paramètres pouvant influencer la mobilité. Pour cela, une Analyse en Composantes Principales (ACP) a été couplée à une Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) sur les aires urbaines de France de plus de 250 000 habitants. Cette classification a permis de déterminer 5 classes d'aires urbaines parmi lesquelles trois, remarquables, ont été étudiées. Pour cela, les données des Enquêtes Ménages Déplacements (EMD) des trois villes les plus proches du centre de gravité de chaque classe ont été collectées : Bordeaux, Toulon et Valenciennes. La méthodologie a été appliquée à ces différents cas, de manière à pouvoir les comparer. Les résultats montrent des disparités entre les cas.

Tout d'abord, au niveau global, les bilans environnementaux par habitant diffèrent, principalement du fait des distances annuelles totales parcourues (allant du million de pkm pour les trajets vers la crèche, la garderie ou la nourrice à plus de 200 millions pour les trajets domicile-travail). La discrétisation

par besoins permet d'identifier certains motifs pour lesquels des disparités importantes peuvent être observées (par exemple les trajets vers l'université, vers la garde d'enfant ou encore la recherche d'emploi). Pour chacun, des marges de progression ont été calculées pour les agglomérations présentant des résultats moins bons que la moyenne, en extrapolant la différence observable à la pkm au total des pkms parcourues pour le besoin dans l'année.

Cela offre des perspectives intéressantes pour l'aide à la décision en permettant de cibler les besoins offrant le plus d'opportunités de réduction des impacts mais également en rendant possible une évaluation plus fine des scénarios de mobilité. Enfin, l'utilisation de l'ACV, méthode multicritère a également mis en avant la nécessité de travailler avec plusieurs indicateurs, bien qu'un développement méthodologique soit nécessaire afin de mieux appréhender les impacts régionaux et locaux.

Mots clés : évaluation environnementale, Analyse de Cycle de Vie, mobilité urbaine, besoins de déplacement

Abstract

Transportation of goods and people is known as a key environmental impact contributor in a city. However, traditional impact assessment methodologies don't consider environmental issues all over the life cycle. The cause of a trip is also rarely taken into account in an environmental assessment. This thesis aims at proposing a new impact assessment methodology that considers the influence of indirect emissions (using Life Cycle Assessment (LCA) methodology) and causes of trips on the environmental footprint.

Two main hypotheses are settled at the beginning: the environmental impacts of mobility do not only occur during the use phase (the trip by itself) but all over its life cycle. Also the trip purposes may change the choice of way to travel and consequently affect environmental impacts. The global Functional Unit (FU) is "transport people and good in a French urban area during a year" and is divided in intermediate FU referring to each trip purposes, such as "allow commuter trips in a French urban area during a year".

The methodology was developed, tested and validated through a real case: the agglomeration of Saint-Etienne (France). During this phase, mobility territorial actors were met and real data provided that allows facing methodology to possible field limitations. This application case shows first results. First, it confirms importance to consider impacts all over the life cycle (17% of GHG emissions occur out of the use phase). Second, it shows significant differences of emissions by person.kilometer between trip purposes categories.

Then a typology of urban area was proposed based on literature about travel determinants. Principal Component Analysis used on French big urban areas (more than 250 000 inhabitants) identified 5 classes. The methodology was applied to three of them (Bordeaux, Toulon and Valenciennes) using data from a standardized survey on households and mobility in order to compare them. It shows disparities on global results partly due to total annual travel distances. The trip purposes differentiation also shows important differences between urban areas. For each cause trip category and emission reduction potentials were calculated for each urban area by extrapolating differences for a pkm to the total annual distance for the trip. This can provide helpful information to deciders. Finally, the need to provide a multicriteria evaluation that is provided by LCA was committed. However methodological improvement would be necessary to better reflect local and regional impacts in LCA.

Key words: environmental impact assessment, Life Cycle Assessment, urban mobility, trip purpose, classification

Introduction

Le secteur des transports est identifié comme l'un des secteurs prioritaires dans la lutte contre le changement climatique et plus généralement pour la réduction des impacts environnementaux. Non seulement, il est jugé responsable d'une part importante des émissions de gaz à effet de serre (GES) avec 26% des émissions françaises et plus particulièrement 34% de celles de CO₂ (Citepa 2011). Mais de plus, ces émissions ne cessent d'augmenter. Dans le Monde, les émissions de GES dues au transports ont augmenté de 13,1% entre 1990 et 2004 (Bernstein et al. 2008). En France, leur augmentation est estimée à 20% entre 1990 et 2001 et semblent décroître depuis 2007 (MEDDE & CGDD 2011). Cette réduction, signe encourageant vis-à-vis des mesures prises ces dernières années, n'apparaît pas suffisante au regard des objectifs fixés par le protocole de Kyoto (United Nations 1998). Outre la problématique climatique, le secteur des transports est également responsable d'une part non négligeable des émissions de divers polluants atmosphériques et ainsi d'impacts environnementaux ou sanitaires associés. Le CITEPA, référence en France en matière de pollution de l'air, montre que peuvent être attribuées au secteur 20% des émissions annuelles de monoxyde de carbone (CO), 52% de celles dioxydes d'azote (NOx), 14% des particules fines et 15% des émissions de composés organiques volatils (COV) (Citepa 2011). Localement, et notamment en milieu urbain, cette part peut augmenter (allant jusqu'à 70% pour les particules fines par exemple) (Citepa 2011). De fait, le secteur de la mobilité est l'objet récurrent de réglementations, visant à mener industries, collectivités et particuliers à des pratiques plus responsables. A l'échelle française (portée par la réglementation européenne), on peut citer récemment l'objectif de 2 millions de véhicules électriques en 2020, le projet de limitation de la vitesse à 70 km/h sur le périphérique parisien ou encore la récente polémique liée au projet d'écotaxe sur les transports en poids-lourds. Il était l'un des sujets phares du Grenelle de l'Environnement (Grenelle 2010).

Le secteur des transports peut se diviser en deux grandes catégories : le transport de personnes et celui de marchandises. La mobilité des personnes est largement étudiée et bénéficie, en France, de méthodes d'enquête standardisées, offrant déjà plusieurs années de recul et de données. Ainsi, la mobilité locale des ménages en ville est observée au travers des Enquêtes Ménages Déplacements (EMD), déclinées pour les villes moyennes (EDVM). Plus généralement, la mobilité des français est observée au travers des Enquêtes Nationales Transports Déplacements (ENTD). L'exploitation de ces enquêtes donne régulièrement des résultats permettant la compréhension des phénomènes de mobilité et pouvant être exploitées en vue d'alimenter les réflexions autour d'aménagements pour les transports (dans le cadre par exemple des Plans de Déplacements Urbains (PDU)). Elles permettent d'analyser, à l'aide des données de déplacements collectées, les comportements et leurs évolutions vis-à-vis de la mobilité.

Ainsi, chaque jour, un français réalise en moyenne 3,15 déplacements pour sa mobilité locale (Trégouët 2010). Si cette donnée est relativement stable d'années en années, la distance parcourue n'a cessé d'augmenter, passant de 17,4 kilomètres en moyenne quotidienne en 1982 à 25,2 kilomètres en 2008. Y. Zahavi a montré, dans les années 1980, que l'augmentation des vitesses de déplacement

permet de compenser l'allongement des distances et de conserver ainsi un budget-temps constant, (Y. Zahavi & Talvitie 1980; Yacov Zahavi & Ryan 1980). Mais le respect de la loi de Zahavi, réputée l'un des piliers de l'étude de la mobilité pourrait bientôt être remis en cause, si les prochaines années confirment l'augmentation des temps de trajet observée récemment (Trégouët 2010). Cette augmentation de la distance de déplacement est en partie imputée à l'ère automobile. Le XX^{ème} siècle a en effet vu l'avènement de l'automobile (Dupuy 1999), impliquant, en plus de l'émergence d'un nouveau mode de vie des problématiques nouvelles : rallongement des distances, étalement urbain puis dépendance à l'automobile (Dimitriou 1991; Newman & Jeffrey R. Kenworthy 1999; Dupuy 1999), raréfaction des ressources fossiles et hausse des prix des carburants, problématiques environnementales (Citepa 2011; Jean-Pierre Nicolas 2013).

Des alternatives à l'automobile existent et sont amenées à prendre une place de plus en plus importante sur le marché. Le choix de ces « altermobilités » est déterminé par de nombreux paramètres (Vincent 2008). En particulier, les alternatives sont particulièrement développées en milieu urbain où la compétitivité de l'automobile est mise à défaut du fait notamment des problèmes de congestion induits par la densité de l'habitat (limités pour les transports en commun qui bénéficient de voies réservées). Ainsi, plus l'habitat est dense, plus les personnes peuvent avoir recours aux alternatives à l'automobile : principalement les transports en commun, la marche-à-pied ou le vélo (Trégouët 2010). Les déplacements sont donc réalisés différemment en fonction du territoire sur lequel ils interviennent. En particulier, ceux intervenant en milieu urbain sont particulièrement observés du fait qu'ils représentent une part importante des déplacements totaux (aujourd'hui, 60% de la population française vit dans un pôle urbain (Trégouët 2010)), que leur concentration sur un territoire restreint et habité implique des enjeux sanitaires et environnementaux particuliers mais aussi du fait des marges d'amélioration potentielles qu'ils offrent, portées par les investissements des collectivités.

Les déplacements de marchandises sont quant à eux principalement scrutés sous le spectre de la logistique urbaine, dans une optique d'optimisation (mise en commun de lieux d'entreposage, tournées communes, etc.). Ces optimisations se portent d'abord sur les aspects économiques, mais intègrent de plus en plus les problématiques sociales et environnementales. En 2012, le transport de marchandises a représenté 350 milliards de tkm, effectuées principalement par la route (86%) (SOeS 2013). En France, les enquêtes Transports de Marchandises en Ville (TMV) donnent de premiers retours. Cependant, elles ne bénéficient pas de la même ancienneté ni d'une application aussi large que les EMD pour les personnes. De plus, les études sur le transport de marchandises souffrent, par rapport à celles sur les individus, d'une difficulté plus importante d'obtenir des données (notamment liée aux caractères privé et commercial de celles-ci).

Afin de mettre en œuvre une planification cohérente des transports, une meilleure connaissance de la mobilité et de ses impacts sur les territoires cibles est nécessaire. Notamment, la mise en place de méthodes d'évaluation des impacts environnementaux apparaît comme un sujet d'importance permettant une appréciation plus fine de la mobilité, des moyens de suivi de l'impact de mesures politiques et également la mise en place d'outils d'aide à la décision. Par exemple, un volet « évaluation environnementale » a été associé aux PDU. Encore, les projets d'infrastructures de transport sont soumis à une étude d'impacts sur l'environnement (EIE) préalable.

L'objectif de ce travail est de proposer une méthodologie d'évaluation environnementale de la mobilité urbaine basée sur l'approche cycle de vie. Cela repose sur l'hypothèse qu'une part non négligeable du bilan environnemental est produite hors phase d'usage, c'est à dire, en dehors de la phase de déplacement à proprement parler. Ce dernier a en effet nécessité par exemple la construction de la route, la fabrication du véhicule. Une part de leur bilan environnemental doit donc être attribuée à chaque déplacement. A l'échelle d'une automobile, la phase d'usage est responsable d'environ 80% des émissions de GES (Finkbeiner & Hoffmann 2006; Spielmann & H.-J. Althaus 2007; Kakudate et al. 2002), cela laissant 20% des GES émis en dehors de cette phase. Cela est encore davantage prononcé pour d'autres indicateurs ou d'autres modes de transports. D'une manière générale, Chester et Horvath (2009) préconisent la prise en compte de la notion de cycle de vie dans les transports de personnes.

Le développement de cette méthodologie doit également intégrer la notion de besoin de déplacement. En effet, parmi les déterminants de la mobilité apparaît le motif du déplacement impliquant le besoin de se déplacer. En fonction de ce besoin, il est supposé que le déplacement sera effectué de manière différente (du choix du mode à la manière de l'utiliser). Par exemple, en France, si le taux d'occupation moyen d'une automobile est de 1,4, il descend à 1,1 pour les déplacements domicile-travail. La voiture n'apparaît par ailleurs pas comme le mode privilégié pour tous les besoins, bien qu'elle soit le moyen de réaliser une grande part des déplacements. Ces différentes manières de réaliser un déplacement induisent supposément un bilan environnemental particulier et ainsi des potentiels de réduction des émissions différents.

Ce mémoire de thèse se construit autour de quatre chapitres :

- L'état de l'art qui nous permettra de formuler les différentes hypothèses de ce travail ;
- Le développement de la méthodologie visant à estimer les impacts environnementaux générés par la mobilité, les jours ouvrés, dans une grande aire urbaine française. Cette méthodologie vise à prendre en compte l'ensemble du cycle de vie des différents besoins de déplacements pouvant être effectués. Notre méthodologie sera en particulier déroulée au travers du cas d'application de l'agglomération urbaine de Saint-Etienne Métropole ;
- Une proposition de typologie urbaine visant à identifier des cas d'aires urbaines emblématiques et l'application de la méthodologie à des cas types ;
- Une partie d'ouverture et de perspectives.

Dans un premier temps, le contexte dans lequel se situe ce travail de doctorat est explicité, au travers d'un regard pluridisciplinaire de la mobilité urbaine et d'une analyse des méthodes d'évaluation environnementale existantes. La sociologie des transports ou encore leur organisation sont abordées afin d'observer les déterminants de la mobilité, en particulier à l'échelle urbaine. Un regard est ensuite porté sur les enjeux environnementaux liés à la mobilité urbaine et sur les méthodes existantes et utilisées pour les évaluer. Parmi les méthodes d'évaluation des impacts environnementaux, l'Analyse de Cycle de Vie (ACV) est largement utilisée dans le domaine des transports à l'échelle des véhicules, carburants ou encore infrastructures mais peu à l'échelle de la mobilité sur un territoire. L'ACV est une méthode normalisée (ISO 14040 2006; ISO 14044 2006) permettant d'évaluer l'impact environnemental d'un produit ou d'un service, tout au long de son cycle de vie, autrement dit du berceau à la tombe (de

l'extraction des matières premières à la fin de vie en passant par les étapes de conception, fabrication, utilisation ou encore transport). Elle permet en outre la quantification de plusieurs catégories d'impacts potentiels sur l'environnement tels que le changement climatique, la toxicité, l'écotoxicité, la déplétion de la couche d'ozone, l'eutrophisation ou l'acidification. L'utilisation de l'ACV est justifiée par l'hypothèse qu'une part d'impact intervient en dehors de la phase d'usage (hypothèse 1). Enfin, un focus est fait sur la notion de besoin de déplacement. L'hypothèse est ainsi faite que le motif lié à un déplacement peut impacter les modalités de réalisation et par conséquent le bilan environnemental (hypothèse 2).

Le deuxième chapitre porte sur le développement d'une méthodologie d'évaluation des impacts environnementaux au travers d'un cas d'application : l'Agglomération de Saint-Etienne Métropole. Des premiers résultats sur le cas d'application sont alors proposés. La méthodologie se base sur deux hypothèses principales : l'intérêt de la prise en compte de l'ensemble du cycle de vie pour l'évaluation des impacts et celui de la subdivision par besoins de déplacements. L'application sur l'agglomération de Saint-Etienne a permis de confronter cette méthodologie aux données de terrain disponibles et donc de participer à son développement. Un travail de terrain a été effectué auprès de l'Agglomération de Saint-Etienne Métropole (en particulier les services transport et déchets), de la Société de Transports de l'Agglomération Stéphanoise ou encore de l'agence d'urbanisme Epures (prestataire de l'EMD).

Le troisième chapitre vise à élargir la méthodologie développée sur le cas d'application à la mobilité des grandes aires urbaines en France. L'hypothèse qu'il existe entre les villes des disparités pouvant mener à différents profils en termes de mobilité urbaine nous a amené à proposer une typologie des aires urbaines, basée sur une revue de littérature des déterminants de mobilité. Pour cela, les méthodes d'analyse multivariée sont utilisées, et en particulier l'Analyse en Composantes Principales (ACP), permettant de proposer une typologie des aires urbaines. La méthodologie développée en chapitre II a ensuite été appliquée aux données issues des EMD de trois aires urbaines supplémentaires : Valenciennes, Toulon et Bordeaux. Des résultats comparés sont alors proposés ainsi qu'une quantification de marges possibles de réduction des impacts environnementaux.

Le dernier chapitre propose, en plus des apports et limites relevés dans ce travail, certaines pistes d'ouverture. Certains points n'ont en effet pu être développés, mais ont été évoqués ou relevés au cours de différentes lectures, discussions ou essais. Les apports méthodologiques sont évalués (utilisation de l'ACV pour l'évaluation environnementale de la mobilité urbaine, utilisation de l'ACP en combinaison avec l'ACV) puis ceux en termes d'aide à la décision.

I. Chapitre I : Etat de l'art

Cette thèse a pour but d'évaluer les impacts environnementaux de la mobilité urbaine. Cependant, cela ne peut se faire sans avoir au préalable observé les nombreux phénomènes permettant de l'expliquer. En effet, la complexité de l'étude de la mobilité urbaine tient dans la multiplicité et l'hétérogénéité des acteurs et des phénomènes qu'elle met en jeu. Le système urbain est lui-même considéré comme l'un des plus difficiles à analyser du fait de sa complexité (Claramunt & Thériault 2001). Il peut être divisé en huit sous-ensembles distincts : les réseaux, le mode d'occupation des sols, les lieux d'emplois, les lieux de résidence, l'emploi, la population, le transport de marchandises et le déplacement de personnes (Wegener 1994).

Des mécanismes qui peuvent être économiques, sociologiques, sociétaux, politiques ou souvent la combinaison de ces différentes composantes entrent en jeu dans la compréhension du système « mobilité urbaine ». Une décision politique urbaine cherche à répondre à des problèmes sociaux (par exemple, l'égalité d'accès aux transports). Cette décision aura elle-même un fort impact sur les déplacements urbains et *a fortiori* sur le bilan environnemental engendré. Ces différents mécanismes font de la mobilité urbaine un système à la fois complexe, mais également dynamique, soumis à de nombreux paramètres extérieurs qui peuvent orienter les politiques (directives nationales, etc.) ou les particuliers (disponibilité des modes, météo, climat, etc.).

Cette première partie a pour but d'exposer les clés qui permettront d'appréhender la mobilité urbaine au regard des objectifs de la thèse : l'évaluation environnementale. Cela sera fait au travers de six sous-parties bibliographiques :

- Quelques définitions générales pour la mobilité urbaine ;
- Les grands principes la régissant ;
- Les enjeux environnementaux liés à la mobilité urbaine ;
- Les méthodes permettant de les évaluer ;
- Une description plus précise de l'Analyse de Cycle de Vie ;
- Une introduction à la notion de besoin de déplacement.

I.1 La mobilité urbaine, premières définitions

I.1.1 Définitions

I.1.1.1 Un peu de sémantique

Le premier sens du mot « mobilité » est une propriété des corps, le « caractère de ce qui est susceptible de mouvement, de ce qui peut se mouvoir ou être mû, changer de place, de fonction » (Larousse 2013a). Il vient du latin « mobilis, e », « mobile, qu'on peut déplacer, qui peut se mouvoir facilement » ou encore « mobilitas, atis », « mobilité, facilité à se mouvoir, agilité », ayant eux-mêmes racine commune avec le verbe « moveo, ere, movi, motum », signifiant « mettre en mouvement, mouvoir ». Le mot mobilité est utilisé dans de nombreux domaines pour désigner le fait de changer de lieu, par exemple, de résidence – c'est la mobilité résidentielle (Tunstall et al. 2010; Flouri et al. 2013) – d'emploi – c'est la mobilité professionnelle (Lainé 2010; Iucu et al. 2011) – ou encore la mobilité étudiante (Doyle & Prout 2012; Hill et al. 2012). Dans le domaine des transports, le mot mobilité est employé pour désigner l'ensemble des déplacements, mais également pour les quantifier. Il représente alors un nombre de déplacements, par exemple, la mobilité quotidienne (ou encore la mobilité individuelle) (Kitamura et al. 2000; van Wee et al. 2006). Ainsi, en France, les principales enquêtes consacrées à la mobilité des individus, les Enquêtes Ménages Déplacements¹ (EMD) parlent de « mobilité tous modes » ou encore de « mobilité à pied », en désignant des nombres de déplacements.

Le terme « urbain » représente tout ce qui « appartient à la ville » (Larousse 2013b). Il vient du latin « urbs, urbis », signifiant « la ville » et par extension « la population de la ville », les urbains. Il a donné lieu notamment à une discipline, l'urbanisme, étude du phénomène urbain et de son organisation.

La « mobilité urbaine » peut donc être définie comme la propriété de se déplacer dans l'espace urbain, considérant l'ensemble des déplacements effectués sur un territoire urbain donné. Cela implique de définir précisément la notion de déplacement (paragraphes I.1.1.2), mais également, les frontières du système urbain (paragraphes I.1.1.3).

I.1.1.2 Du déplacement à la mobilité

D'après la définition donnée par l'INSEE², « un déplacement correspond au mouvement d'une personne sur la voie publique d'un lieu de départ à un lieu d'arrivée. Il se caractérise par un motif et un seul, mais peut recouvrir l'usage d'un ou plusieurs modes de transport. Tout changement de motif

¹ Les Enquêtes Ménages Déplacements seront décrites plus précisément dans la suite

² L'Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques (INSEE) est chargé de collecter, produire, analyser et diffuser des données et informations sur l'économie et la société française, à l'attention des pouvoirs publics, administrations, entreprises, chercheurs, médias, enseignants, étudiants et particuliers. Plusieurs thèmes sont concernés, dont les transports.

entraîne un changement de déplacement » (Seguin et al. 2009). Lorsque plusieurs déplacements se succèdent, on parle de chaîne ou chaînage de déplacements (Hani 2009). Ces chaînes peuvent être simples (départ du domicile – activité primaire³ – retour au domicile) ou plus complexes en introduisant des activités supplémentaires (Valiquette 2010). Par exemple, dans le cas d'un individu s'arrêtant à l'épicerie sur le trajet du travail, deux déplacements distincts sont comptés (l'un du domicile à l'épicerie, l'autre de l'épicerie au lieu de travail). Chaque déplacement d'une chaîne pourra avoir des caractéristiques particulières (mode de transport, taux d'occupation⁴, consommation). A noter que la chaîne de déplacements correspond également à la succession de déplacements pour divers motifs, commençant à un lieu donné (souvent le domicile, parfois le travail) pour terminer à ce même endroit (Currie & Delbosc 2011).

Traditionnellement, la mobilité urbaine représente les déplacements quotidiens des individus du lundi au vendredi, en milieu urbain (Raux & Andan 1988; Petiot 2001). Sont donc exclus les déplacements longue distance, les déplacements de week-end, ou encore de vacances. L'expression « mobilité urbaine des marchandises » revient assez régulièrement également. Quoiqu'il en soit, il n'existe pas de définition stricte de la mobilité. Dans le cadre du présent travail, la mobilité urbaine sera définie comme **l'ensemble des déplacements de personnes et de marchandises recensés sur un territoire urbain donné en semaine (du lundi au vendredi)**. La partie I.1.1.3 propose justement de définir les frontières existant pour caractériser le milieu urbain.

I.1.1.3 Frontières géographiques du milieu urbain

Après avoir caractérisé la notion de déplacement, il est important de définir le périmètre urbain, qui désignera les déplacements à prendre en compte dans l'étude de la mobilité urbaine. Les frontières du milieu urbain peuvent être fixées de différentes manières :

- Depuis la sédentarisation, les **éléments naturels** ont impacté l'établissement des espaces urbains (Stébé & Marchal 2010). L'accessibilité au littoral (pour la pêche ou le commerce), la présence d'un fleuve, d'une forêt ou d'une ressource naturelle utile, l'absence d'un relief accidenté sont autant de critères qui ont privilégié certains endroits et certaines configurations (villes allongées le long de la côte, contre villes concentriques dans les terres par exemple) ;
- Des **décisions politiques** (regroupements de communes) peuvent définir l'espace urbain et son organisation. Régulièrement, les volontés de simplification administrative poussent les dirigeants à proposer des programmes pour réduire le nombre de communes. C'est par exemple le cas de la loi Chevènement (Loi Chevènement 1999) qui a permis le développement de communautés d'agglomérations et de communes. Ces décisions façonnent le territoire

³ Valiquette (2010) définit l'activité primaire comme l'activité principale, justifiant le déplacement.

⁴ Le taux d'occupation d'un véhicule est le nombre de personne qui l'occupent. Le taux de remplissage est davantage entendu pour le transport de marchandises.

administratif national et son fonctionnement où s'opposent régulièrement les théories de centralisation et décentralisation ;

- Enfin, un certain nombre de **déterminants socio-économiques** peuvent servir de référentiel urbain, lorsque l'on considère par exemple les bassins d'emploi. Apparaissent alors les zones ou périmètres d'influence des pôles urbains.

Les frontières d'un territoire peuvent donc être définies de plusieurs manières, la notion de ville étant très différente selon les cas, « dans le monde, il existe presque autant de définitions du mot « ville » que de pays » (United Nations 2002). En France, l'INSEE regroupe les villes et les agglomérations urbaines sous le terme d'unité urbaine. Elles sont délimitées en suivant le critère de continuité de l'habitat et séparées en deux catégories principales :

- Les **agglomérations de communes** regroupant plusieurs communes, sur un territoire hébergeant plus de 2 000 habitants. Elles se présentent sous la forme d'une ville-centre (et dans de rares cas de plusieurs villes-centre, les communes multi-polarisées) entourée de sa banlieue ;
- Les **villes isolées** (plus souvent appelées villes), contenant une population agglomérée de plus de 2 000 personnes.

Régulièrement, les recensements de population permettent de mettre à jour la liste des unités urbaines en France.

Pour l'INSEE, la définition du milieu urbain est fondée sur le principe de continuité de l'habitat, s'ajoutant à un critère de population minimale. Le terme générique d'unité urbaine regroupe des communes isolées et des agglomérations urbaines (qui peuvent être composées de plusieurs communes). Pratiquement, **une unité urbaine est un ensemble de communes comptant au moins 2000 habitants et présentant une continuité du bâti, c'est-à-dire qu'il n'y a pas de coupure supérieure à 200 mètres entre deux constructions** (Insee 2013b). Une unité urbaine peut se composer d'une seule commune (qui a donc une population agglomérée d'au moins 2000 personnes), alors appelée ville. Dans le cas où elle est composée de plusieurs communes (généralement une ville-centre et sa banlieue), elle est qualifiée d'agglomération multicommunale.

Dans l'étude des déplacements urbains, les Enquêtes Ménages Déplacements (EMD) font référence. Elles sont réalisées depuis 1976 en suivant une méthodologie standardisée dont le cahier des charges est rédigé par le Certu (Centre d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques), la méthode « standard Certu » (Certu 2009). Il n'y a pas de norme pour l'aire d'étude, si ce n'est qu'elle doit inclure *a minima* le Périmètre des Transports Urbains (PTU). En pratique, elle se rapproche souvent de l'Aire Urbaine⁵ (Figure 1). Le choix de l'aire d'étude reste donc libre et se justifie

⁵ « Une Aire Urbaine est un ensemble de communes, d'un seul tenant et sans enclave, constitué par un Pôle Urbain (Unité Urbaine) de plus de 10 000 emplois, et par des communes rurales ou unités urbaines (couronne périurbaine) dont au moins 40% de la population résidente ayant un emploi travaille dans le pôle ou dans les communes attirées par celui-ci. » (Insee 2013a).

souvent en termes de « zone d'influence », c'est-à-dire que toutes les communes dont les déplacements sont fortement – selon un pourcentage donné – influencés par le pôle urbain étudié (suivant l'exemple des 40% dans la définition de l'Aire Urbaine), sont considérées.

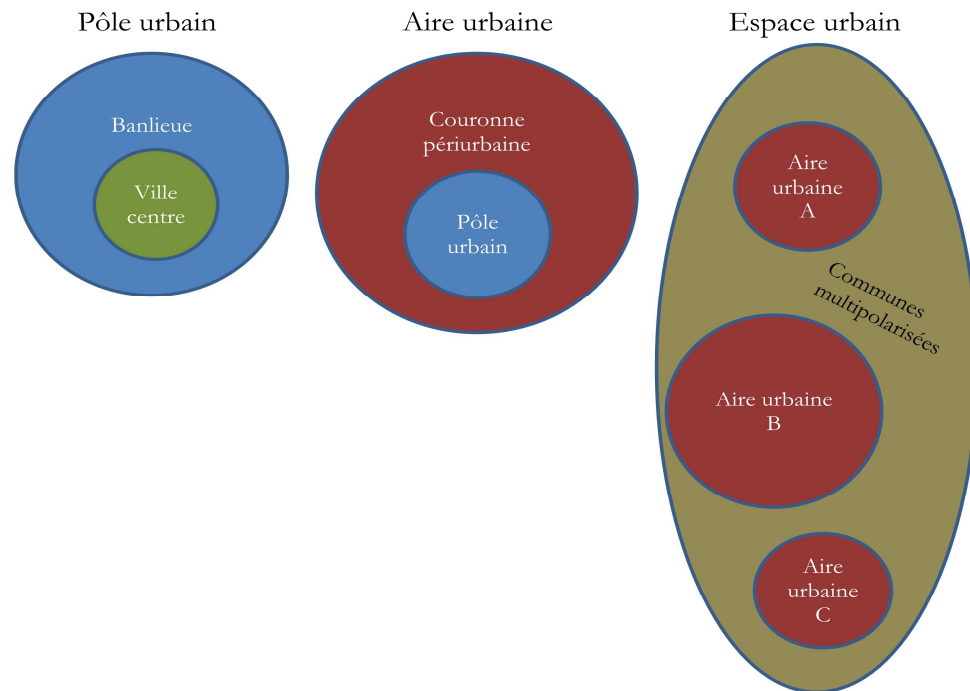


Figure 1 : Zonage en aires urbaines, d'après (Le Jeannic 1997)

Le choix du périmètre est finalement fortement contraint par la disponibilité des données et c'est parfois ce qui justifiera la restriction de ce dernier. Ainsi, l'utilisation des données d'une Enquête Ménages Déplacements pour une quelconque étude, s'appliquera sur le périmètre retenu pour cette EMD. Si le périmètre de l'aire urbaine est plébiscité par la méthodologie EMD, en pratique, ce n'est pas toujours celui qui est retenu pour l'étude, qui conserve *a minima* celui des transports urbains, le Périmètre des Transports Urbains (PTU) – pour lequel l'accès aux données est souvent facilité par la présence d'un gestionnaire des transports en commun ou par les études déjà réalisées.

Lorsque les choix de périmètre sont effectués, il convient de recenser les déplacements de personnes et de marchandises qui y sont effectués, en décrivant notamment les modes de transport utilisés. La partie I.1.2 propose un panorama des modes de transports existants (principalement pour le cas de la mobilité urbaine).

I.1.2 Les modes de déplacement

I.1.2.1 Les déplacements de personnes

Les modes de déplacements peuvent être classés en plusieurs catégories selon qu'ils sont individuels ou collectifs, terrestres ou guidés, pour les personnes ou les marchandises. Leur manière d'être utilisés peut aussi permettre de différencier plusieurs modes pour une seule et même technologie.

Le XX^{ème} siècle a vu l'avènement de la voiture et la naissance d'une réelle dépendance automobile (Dupuy 1999). Dans un premier temps, l'accès à la propriété automobile a permis l'émergence d'un nouveau mode de vie, où les distances sont rallongées, pour des temps de trajets identiques. Puis, cet allongement des distances instauré a conduit à une dépendance vis-à-vis de l'automobile. Les décisions politiques, notamment en matière énergétique ont contribué à privilégier ce mode de déplacement (aide au développement de l'industrie automobile). Certaines technologies ont été préférées : la stratégie de développement de la filière nucléaire en France a libéré du gazole en grande quantité, permettant l'essor du diesel (Deschamps & Tailliez 2013) – représentant 73% des immatriculations en France en 2011 (ADEME 2012). L'automobile reste le mode de déplacement incontournable des sociétés actuelles avec 65% des déplacements et 83% des distances en France (Trégouët 2010) (du fait de plus longues distances moyennes effectuées par ce moyen). Mais de nouveaux usages de la voiture apparaissent, tels que le covoiturage ou l'auto-partage, visant à réduire son utilisation et ses impacts. Cependant les trois-quarts des déplacements automobile se font aujourd'hui par une personne seule (cela est appelé l'auto-solisme) et les exemples des agglomérations de Lyon, Lille ou encore Strasbourg montrent que deux tiers des déplacements font moins de trois kilomètres et la moitié reste réalisée en voiture (Certu & CETE Nord-Picardie 2008).

Les modes dits alternatifs à l'automobile comprennent (Berthet et al. 2012) :

- Les modes doux : ce sont les modes ne nécessitant pas de motorisation autonome pour fonctionner. Ils comprennent la marche à pied et le vélo, mais aussi certains modes plus marginaux tels que la trottinette ou les patins à roulettes ;
- Les transports collectifs terrestres : ils regroupent l'autobus et l'autocar, qui se différencient par le cantonnement de l'autobus au Périmètre des Transports Urbains (PTU). L'autocar sera parfois classé dans les Transport en Commun Non Urbain (TCNU), avec les liaisons ferroviaires inter-cités (TER ou RER notamment) ;
- Les transports collectifs guidés : ils peuvent l'être par rail, par câble, ou par la combinaison des deux. Ce sont le train, le métro, le tramway ou encore le funiculaire, ainsi que certaines déclinaisons, comme le tram-train, qui se présente sous la forme d'un tramway ordinaire effectuant une partie de sa desserte sur une voie ferrée classique ;

- Les deux-roues motorisés regroupent le cyclomoteur, la moto et le solex, ainsi que leurs récentes déclinaisons électriques. Ils sont souvent classés par cylindrée.

Dans les EMD, les résultats sont généralement donnés selon 6 catégories principales :

- Le véhicule particulier (VP), principalement l'automobile. Cette catégorie peut être divisée en deux sous-catégories, le VP conducteur et le VP passager. Plusieurs technologies énergétiques existent. En France, le marché est dominé par le diesel (60,3%) (CCFA 2012). Le parc automobile français se compose de 33,7 millions de véhicules avec un âge moyen d'environ 8 ans (CCFA 2012). L'automobile occupe une part de marché importante, bien qu'inégale selon les continents (Figure 2) ;

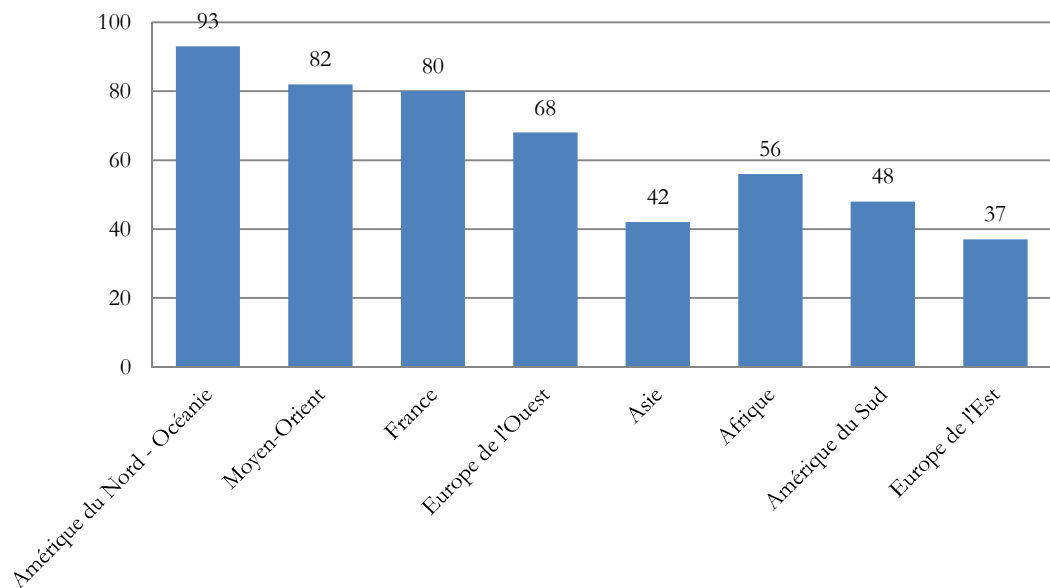


Figure 2 : Parts de marché du VP en pourcentages de distances parcourues dans différentes régions du Monde (Joly et al. 2006)

- Les transports en commun urbains (TCU), qui sont parfois divisés par mode selon les offres de chaque agglomération : bus, tramway, métro. En France, leur fonctionnement est sous la responsabilité de l'Autorité Organisatrice des Transports Urbains (AOTU) – généralement l'agglomération – qui peut en déléguer l'exploitation ;
- Les autres transports en commun (autres TC), qui regroupent les cars intercommunaux, les transports scolaires, les liaisons ferrées régionales (TER, RER). Cette catégorie est parfois appelée transports en commun non urbains (TCNU) ;
- La marche à pied ;

- Les deux-roues, presque toujours divisés en deux catégories : le vélo et les deux-roues motorisés (parfois elle-même divisée en deux sous-groupes, les deux-roues de plus et moins de 50 cm³ de cylindrée) ;
- Les autres modes, qui regroupent les modes utilisés plus marginalement : trottinette, planche à roulette, patins à roulettes, rollers, etc.

Les pourcentages d'utilisation de chaque mode sont appelés parts modales. Leur compilation constitue la répartition modale. En France, le véhicule particulier constitue le mode le plus emprunté avec environ 80% de la distance totale parcourue (Figure 2). Pour les déplacements locaux, malgré des distances plus courtes, plus facilement réalisables en marchant, cette part reste importante (environ 65% des déplacements). Les transports collectifs sont plus présents à l'échelle locale (environ 8%) (Figure 3).

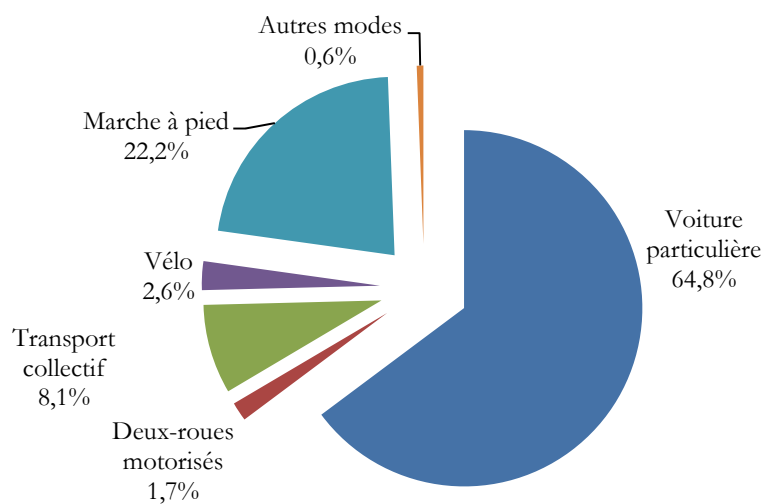


Figure 3 : Répartition modale en pourcentage de déplacements locaux⁶ en France en 2008 (Trégouët 2010)

⁶ Sont pris en compte les déplacements un jour de semaine ouvré, des individus de 6 ans ou plus, résidant en France métropolitaine

1.1.2.2 Le transport de marchandises

De son côté, le transport de marchandises en ville se divise en trois grandes catégories qui ont chacune leurs modes de transport privilégiés (Routhier 2002; Segalou et al. 2002; Albergel et al. 2006; Chiron-Augereau 2009; Patier & Routhier 2009)⁷ :

- Les échanges entre établissements économiques : ils sont parfois réalisés en véhicules industriels lourds (pour les pondéreux en vrac : carburant ou farine par exemple) ou par véhicules légers (la messagerie express notamment). Certains échanges sont alternativement réalisés par véhicules lourds ou légers (comme le transport de produits manufacturés à destination des commerces) ;
- Les enlèvements de marchandises générés par les déplacements d'achats sont majoritairement réalisés en véhicule particulier ;
- Les autres flux de marchandises qui peuvent être réalisés par des véhicules allant de la voiture particulière au poids lourd.

Si le transport sur route domine très largement la mobilité de marchandises, certains modes occupent une place marginale dans l'offre modale : le transport fluvial par barge pour les déchets de chantier par exemple. Des projets évaluent l'opportunité d'utiliser des lignes de transports collectifs de personnes, par exemple pour délivrer des colis (Danard 2013).

Cette première partie a permis d'exposer différentes définitions relatives à la mobilité urbaine, notamment la notion de déplacement et celle d'espace urbain. Elle a aussi permis de dresser un panorama des modes de transports utilisés pour réaliser ces déplacements. Cependant, la mobilité urbaine ne peut pas être observée comme un système isolé, uniquement constitué de déplacements d'un point A à un point B, réalisé par un mode de transport M. Un certain nombre de paramètres extérieurs vont ainsi influencer la mobilité. La partie II cherche à explorer ces différents domaines pouvant avoir une influence sur la mobilité (par exemple sur les choix modaux) et dont la prise en compte est indispensable à sa bonne compréhension et par conséquent à celle de ses impacts sur l'environnement.

⁷ Le contenu de ces catégories sera détaillé dans la suite du travail. Ici, seuls les modes de transport sont évoqués.

I.2 La mobilité urbaine, système complexe, à la croisée des champs de recherche

« Lorsqu'un architecte s'exprime sur la ville, il parle de ses parties visibles. Lorsqu'un sociologue l'aborde, il décrit le plus souvent ses acteurs et ses problèmes. Lorsqu'un politologue appréhende la ville, c'est généralement pour analyser son fonctionnement civique. » (Kaufmann 2008).

Le système urbain est souvent considéré comme l'un des plus complexes à appréhender (Claramunt & Thériault 2001) pouvant être divisé en huit sous-ensembles distincts : les réseaux, le mode d'occupation des sols, les lieux d'emploi, les lieux de résidence, l'emploi, la population, le transport de marchandises et le déplacement de personnes (Wegener 1994). La mobilité urbaine appartient donc au système urbain et est en interaction permanente, influencée et influente, avec les autres sous-ensembles. Chacun aura sa vision propre de la ville, privilégiant certains sous-systèmes, au cœur de son domaine de réflexion (Kaufmann 2008). Ces différentes visions, souvent partielles (l'économiste donnera plus de poids aux indicateurs économiques par exemple) risquent de mener à des conclusions biaisées et donc parfois à des mesures fausses (Dargay 2008).

Un aspect fort dans l'étude de la mobilité urbaine est la compréhension des raisons des déplacements et des choix de solutions pour y répondre. S'il y a une composante induite par la simple disponibilité de modes, les choix modaux découlent pourtant d'un processus complexe liant économie, sociologie géographique et psychologie (De Witte et al. 2013). Pour une même disponibilité de modes, deux personnes n'utiliseront pas nécessairement le même moyen de transport. L'étude de l'acceptation sociale et la viabilité des nouveaux modes de transports est d'ailleurs un point crucial vers leur démocratisation (Dagsvik et al. 2002).

Cette partie propose de parcourir ces différentes visions de la mobilité, en particulier urbaine, qui permettent de comprendre, expliquer et construire un système « mobilité urbaine » en vue de l'analyse environnementale. Elle évoquera alternativement des concepts répandus dans l'étude des mobilités, et des éléments de compréhension, du choix personnel des individus au fonctionnement administratif des collectivités. Préparer efficacement l'évaluation environnementale de la mobilité urbaine implique de comprendre au préalable les différentes thèses soulevées par les spécialistes de la mobilité dans les différentes disciplines qu'elle met en œuvre.

I.2.1 La mobilité, constante mais changeante

Certains paramètres sont connus pour être constants lorsqu'on traite de la mobilité urbaine des personnes. Notamment, le nombre de déplacements quotidiens (Kaufmann 2008) ou encore, plus communément répandu sous le nom de loi de Zahavi, le budget temps consacré aux déplacements (Yacov Zahavi & Ryan 1980; Y. Zahavi & Talvitie 1980; Prendergast & R. D. Williams 1981). S'il existe des différences selon les agglomérations (un individu est généralement plus enclin à passer davantage de

temps dans les transports dans les grandes agglomérations), le budget-temps est constant avec les années (Hourdez 2005).

Cependant, l'amélioration technologique des modes de déplacement et des infrastructures a tout de même modifié les pratiques de mobilité. Tout en conservant ces paramètres constants, l'accroissement du taux de motorisation des ménages, la périurbanisation ou encore l'amélioration des infrastructures a mené à allonger les distances de déplacement (Baccaïni et al. 2007; Scheiner 2010). Le nombre de déplacements ne serait donc pas directement en cause, mais bien la manière de les effectuer. Ainsi, lors des dernières décennies, l'ensemble des pays européens a vu les parts d'utilisation de l'automobile et de l'avion croître (Kaufmann 2008). En France, la part de l'automobile est passée de 63 à 65% des déplacements de 1994 à 2008, celle de l'avion passant de 5,1 à 5,8% (Trégouët 2010).

Suivant l'augmentation de la part de certains modes, la portée spatiale des déplacements a considérablement augmenté (Kaufmann 2008). En corollaire à la conjecture de Zahavi, la portée spatiale est fonction de la vitesse de déplacement (Serve 2009). En effet, un usager sera prêt à allonger ses distances de déplacement si et seulement si un mode de transport ou une situation d'utilisation lui permettent de garder son budget-temps constant. Les modifications d'offres modales des dernières décennies ont précisément permis l'augmentation des distances de déplacement, en respectant la constance du temps réservé par les particuliers à leur mobilité. Certaines études voient en l'évolution de la distance de déplacement une des causes principales du phénomène d'étalement urbain (Brueckner 2000; Bruegmann 2001; Habibi & Asadi 2011), avec celles de l'accroissement de la population urbaine totale, le coût de la vie (et notamment l'accès à la propriété) (Serve 2009; Bruegmann 2001). De surcroît, si certains y voient une de ses principales causes, l'étalement, une fois établi, n'est pas sans effet sur les pratiques modales puisqu'il ouvre à terme de nouveaux territoires urbains, non desservis dans un premier temps par les transports publics, et où l'automobile est indispensable (P. Zhao 2010). L'étalement urbain est ainsi reconnu comme l'une des causes majeures de la croissance de l'usage de l'automobile (Kahn 2000) après en avoir été un effet.

Cependant, la croissance de la part modale de l'automobile observée depuis son avènement semble être en passe de s'inverser. En effet, l'analyse des dernières Enquêtes Ménages Déplacements montre une stabilisation, voire une inflexion de la part modale de la voiture dans les grandes agglomérations en France. A Nantes par exemple, la part modale de la voiture est passée de 62% en 2002 à 57% en 2010 (Seguin et al. 2009). L'hypothèse de l'influence forte d'offres modales alternatives semble se confirmer lorsque l'on observe les résultats d'EMD d'agglomérations ayant développé leur offre de solutions alternatives ces dernières années, comparées à celles ayant pris du retard dans ce développement (l'EMD de l'Etang de Berre montre une part modale toujours croissante de la voiture et une offre modale alternative peu développée (Berthet et al. 2012)). En milieu rural par exemple, hors des grandes agglomérations, la voiture reste tout de même reine (Duprat 2010). Si l'ENTD⁸ ne parle pas encore

⁸ L'Enquête Nationale Transports Déplacements (ENTD), réalisée par l'INSEE tous les dix ans environ, a pour objectifs de mieux connaître les déplacements des ménages en France et la façon dont ils usent des moyens de transports (collectifs et individuels). Elle observe de plus les trafics interrégionaux et internationaux.

d'inversion, elle confirme néanmoins l'infléchissement de l'augmentation de la part de l'automobile dans les déplacements (Trégouët 2010). Cette inflexion montre les prémices des adaptations à la pénurie annoncée des ressources fossiles (et l'augmentation des prix du carburant qui y est liée), le gain d'attractivité et de compétitivité des solutions alternatives et, de façon moindre, la prise de conscience des enjeux environnementaux, notamment ceux liés au changement climatique.

Si la mobilité évolue peu de manière quantitative (nombre de déplacements et budgets-temps consacrés aux déplacements), elle est cependant en constante évolution qualitative, influencée par les changements dans la manière de se déplacer, comme par les évolutions sociales des populations. Réciproquement, la mobilité urbaine influence elle aussi les pratiques sociales.

I.2.2 La mobilité, et son rôle dans les pratiques sociales

Se déplacer revêt une importance sociale forte. Les sociologues mettent d'ailleurs la mobilité au cœur de l'étude des modes de vie, en tant que « support de la rencontre de l'autre et de la réalisation d'activités » (Orfeuil & Massot 2005; Preston & Rajé 2007; Kaufmann 2008). Le lien de causalité indirecte au bien-être est alors fait, puisque la capacité offerte de se déplacer mène au développement accru de liens sociaux et par conséquent au bien-être des populations (J. K. Stanley et al. 2011).

La mobilité et surtout la possibilité offerte de se déplacer influence directement le lieu de résidence. En cela, elle contribue à la création de zones d'habitat de résidence, laissant peu de place à la mixité sociale. Mais paradoxalement, elle demeure aussi la solution pour créer la rencontre, le vecteur qui permet la confrontation des populations et ainsi l'évolution sociale. Les évolutions de la mobilité, et notamment les choix stratégiques en matière de déplacements, ne devraient donc pas remettre en cause le fait de se déplacer, mais bien la façon de le faire (Kaufmann et al. 1999).

I.2.3 La mobilité, différente selon les personnes

Si des données moyennes de mobilité quotidienne des personnes existent, des différences notables selon les profils sont néanmoins observées. Ainsi les enquêtes de mobilité différencient en général les classes d'âge et parfois les catégories socioprofessionnelles (CSP). Dans les EMD, des différences apparaissent entre les CSP, notamment pour les choix modaux des déplacements domicile-travail (Dupré & Rigollet 2011). Des études spécifiques à certains types de personnes existent, des personnes âgées (Pochet 2003) à la mobilité adolescente (Oppenchaim 2011). Ainsi, selon les ménages et les personnes, la mobilité sera tout à fait différente.

Autre élément révélateur de la disparité de mobilité entre les ménages, le taux de motorisation qui varie selon (Vincent 2008) :

- la catégorie socioprofessionnelle ;

- la taille de la commune de résidence ;
- la catégorie d'habitat ;
- l'âge du chef de famille.

Des études spécifiques cherchent ainsi à trouver quels vont être les déterminants sociaux du choix modal pour la mobilité des personnes. Certains sont ainsi jugés comme déterminants quel que soit le motif de déplacement (F. Maurel et al. 2009) : niveau de vie du ménage, sexe, âge, occupation professionnelle, nombre de mineurs, nombre d'adultes actifs occupés, nombre d'adultes inactifs ou chômeurs, niveau de diplôme, sensibilité environnementale, zone d'habitation.

Outre la question des déterminants de choix modaux, une utilisation différente des modes selon les personnes peut être observée. Par exemple, l'utilisation de la voiture par un individu seul est plus fréquente chez les personnes plus âgées et chez les femmes. De même les trajets pendulaires⁹ réalisés en transports en commun couvrent de plus longues distances pour les individus aux hauts revenus et niveaux d'études (Dargay 2008).

Au-delà des influences réciproques des déplacements sur les individus et des populations sur les choix de mobilité, les possibilités offertes sont aussi un déterminant important dans la façon de réaliser ses déplacements. Notamment, la qualité des réseaux de transports peut guider les individus vers un choix de mobilité particulier, tout comme certains paramètres morphologiques davantage appropriés à l'utilisation de certains modes.

1.2.4 Les réseaux urbains et la morphologie urbaine, structurants pour la mobilité et structurés par les déplacements

L'urbanisme permet d'élargir la vision microsociologique du bâti fournie par l'architecture à l'échelle de la ville, dite macrosociologique (H. Lefebvre et al. 1967). Cette vision macroscopique inclut l'étude des réseaux qui sont définis selon les visions comme structurants pour la ville ou au contraire structurés par cette dernière. L'urbaniste va en effet donner sa vision de l'espace urbain avec pour objectif l'aménagement physique et social et à terme l'harmonie entre les acteurs et fonctions qu'il doit contenir (Larousse 2013c). Son travail vise à organiser l'habitat et la circulation autour des besoins des populations actuelles et attendues.

Deux courants principaux s'opposent en urbanisme. D'un côté, les progressistes ont une vision très moderne, parfois futuriste du domaine urbain. Ils entendent la ville de manière futuriste, anticipant l'évolution des technologies, des matériaux et des populations dans leurs plans. Au contraire, le courant

⁹ Les trajets pendulaires sont les trajets domicile-travail et domicile-études

culturaliste défend le respect de la ville « traditionnelle ». Elle se base sur une connaissance exhaustive (démographique, géographique, sociale, etc.) socle des aménagements urbains.

Au cœur de cette science, les transports occupent une place privilégiée, structurante, à l'instar des autres réseaux (eau, électricité, etc.). En desservant les parcelles, en définissant les règles de prospect (distance maximale autorisée entre les bâtiments) et nombre de règles d'aménagement, la voirie est la base du tissu urbain. Parmi ces réseaux, les routes occupent une place particulière, et plus encore l'automobile. En effet 90% de la voirie urbaine est dimensionnée pour l'automobile (Berthet et al. 2012). En observant les cas de 32 grandes agglomérations mondiales, le lien a été fait entre densité de population et utilisation de la voiture (Newman & Jeffrey R. Kenworthy 1999; Muñoz & Galindo 2005). Plus la zone observée est dense, plus les modes de transports alternatifs à la voiture deviennent compétitifs (du fait de la congestion induite et du meilleur développement de ces solutions alternatives). De plus, une forte densité permet de réduire les distances de déplacement, notamment les distances domicile-travail (Banister et al. 1993).

Plusieurs indicateurs, donnant une vision plus précise de la morphologie urbaine, sont étudiés pour expliquer les choix modaux. Par exemple, le fait que l'uniformité favorise les déplacements courts, réalisés majoritairement en automobile, est mis en avant en introduisant la notion d'entropie, observant les disparités de densité urbaine dans différentes cellules de la ville (Le Néchet & Aguilera 2011). Ils évaluent également les effets de l'acentrisme, rendant compte de la nature multipolarisée de certaines agglomérations (Le Néchet & Aguilera 2011), à opposer à la notion de monocentrisme (Le Néchet 2010). L'ensemble de ces définitions sera précisé en partie I.2.6.2.

Selon l'horizon temporel, la mobilité peut être vue comme déterminée par la localisation des différentes zones fonctionnelles (court terme) – notamment professionnelles et résidentielles – ou déterminante pour l'organisation urbaine (long terme) (Muñoz & Galindo 2005).

Bien que cette partie ait avancé l'influence de paramètres morphologiques sur la mobilité, certains considèrent que les paramètres sociaux économiques expliquent davantage les pratiques modales: par exemple, le revenu moyen d'un ménage ou le lieu de travail (Breheny 1997).

I.2.5 L'organisation urbaine et la mobilité, sujets phares d'intérêt et d'investissement des collectivités

D'une manière générale, les politiques publiques tendent à afficher un souhait d'encourager l'utilisation de modes « doux » de transport. Cela peut se faire à l'échelle globale, au moyen de fiscalités incitatives sur les émissions de polluants. A l'échelle locale, des campagnes de sensibilisation ou des mesures incitatives (péage urbain, stationnements payants, etc.) s'efforcent de favoriser les modes doux. Dans une volonté d'aider au développement économique, l'Etat intervient aussi dans la construction

d'infrastructures de transport. Il prend en charge les investissements lourds, tels que la construction d'infrastructures routières.

I.2.5.1 Les Plans de Déplacements Urbains

Aujourd'hui, chaque agglomération de plus de 100 000 habitants¹⁰ a obligation de se munir d'un Plan de Déplacements Urbains (PDU) par le biais de son Autorité Organisatrice de Transports Urbains (AOTU) (LAURE 1996). Apparus dans le cadre de la loi LOTI en 1982 (Loti 1982), les PDU doivent être compatibles avec les documents d'urbanisme déjà en place (notamment le Schéma de Cohérence Territoriale (SCoT)), avec pour objectifs¹¹, extrait de (Certu 2011) : «

- *L'équilibre durable entre les besoins en matière de mobilité et de facilités d'accès, d'une part, et la protection de l'environnement et de la santé, d'autre part ;*
- *Le renforcement de la cohésion sociale et urbaine, notamment l'amélioration de l'accès aux réseaux de transports publics des personnes handicapées ou dont la mobilité est réduite ;*
- *L'amélioration de la sécurité de tous les déplacements, en opérant, pour chacune des catégories d'usagers, un partage de la voirie équilibré entre les différents modes de transport et en effectuant le suivi des accidents impliquant au moins un piéton ou un cycliste ;*
- *La diminution du trafic automobile ;*
- *Le développement des transports collectifs et des moyens de déplacement les moins consommateurs d'énergie et les moins polluants, notamment l'usage de la bicyclette et la marche à pied ;*
- *L'amélioration de l'usage du réseau principal de voirie dans l'agglomération, y compris les infrastructures routières nationales et départementales, par une répartition de son affectation entre les différents modes de transport et des mesures d'information sur la circulation ;*
- *L'organisation du stationnement sur la voirie et dans les parcs publics de stationnement, notamment en définissant les zones où la durée maximale de stationnement est réglementée, les zones de stationnement payant, les emplacements réservés aux personnes handicapées ou dont la mobilité est réduite, la politique de tarification des stationnements sur la voirie et dans les parcs publics corrélée à la politique de l'usage de la voirie, la localisation des parcs de rabattement à proximité des gares ou aux entrées de villes, les modalités particulières de stationnement et d'arrêt des véhicules de transport public, des taxis et des véhicules de livraison de marchandises, les mesures spécifiques susceptibles d'être prises pour certaines catégories d'usagers, notamment tendant à favoriser le stationnement des résidents et des véhicules bénéficiant du label " autopartage " tel que défini par voie réglementaire ;*
- *L'organisation des conditions d'approvisionnement de l'agglomération nécessaires aux activités commerciales et artisanales, en mettant en cohérence les horaires de livraison et les poids et dimensions des véhicules de livraison au sein du périmètre des transports urbains, en prenant en compte les besoins en surfaces nécessaires aux livraisons pour limiter la congestion des voies et aires de stationnement, en améliorant l'utilisation des*

¹⁰ Pour les plus petites agglomérations, une alternative simplifiée existe, le Plan Global (ou Local) de Déplacements (PG(L)D).

¹¹ Des objectifs ont été ajoutés aux PDU dans le cadre de la loi Solidarité de Renouvellement Urbain (SRU) (SRU 2000).

infrastructures logistiques existantes, notamment celles situées sur les voies de pénétration autres que routières et en précisant la localisation des infrastructures à venir, dans une perspective multimodale ;

- *L'amélioration du transport des personnels des entreprises et des collectivités publiques en incitant ces dernières à prévoir un plan de mobilité et à encourager l'utilisation par leur personnel des transports en commun et le recours au covoiturage ;*
- *L'organisation d'une tarification et d'une billettique intégrées pour l'ensemble des déplacements, incluant sur option le stationnement en périphérie et favorisant l'utilisation des transports collectifs par les familles et les groupes ;*
- *La réalisation, la configuration et la localisation d'infrastructures de charge destinées à favoriser l'usage de véhicules électriques ou hybrides rechargeables. »*

A l'échelle des établissements publics ou privés, des démarches de réduction de l'usage de l'automobile se développent également depuis une dizaine d'années. Par exemple, les Plans de Déplacements en Entreprises (PDE) ont pour objectifs d'optimiser l'ensemble des déplacements liés aux activités de l'entreprise (déplacements domicile-travail des salariés, livraisons de marchandises, accueil de visiteurs, etc.) (ADEME 2010b).

I.2.5.2 La gestion administrative des transports

Comme vu en partie I.1.1.3, plusieurs découpages administratifs existent pour définir le milieu urbain. Si à l'échelle de la commune (communautés de communes, syndicats intercommunaux, communes), mettre en place un plan de gestion des transports urbains reste un choix, les communautés d'agglomération et les communautés urbaines en ont l'obligation (définissant le Périmètre des Transports Urbains (PTU)), ce qui fait d'elles l'Autorité Organisatrice des Transports Urbains (AOTU). Elles peuvent cependant confier l'exploitation du réseau urbain à un tiers (qui peut être un exploitant privé ou une régie de transports). En revanche, seules les agglomérations urbaines ont en charge la gestion de la voirie, ceci étant optionnel dans les autres cas. Le stationnement sur voirie, quant à lui, doit être organisé et géré à l'échelle communale.

La coordination entre les différents PTU, ainsi que les transports ayant lieu hors d'un PTU, sont à la charge des conseils généraux, qui peuvent également déléguer l'exploitation. Ces transports vont généralement être réalisés par des cars, réalisant des liaisons intercommunales ou encore des transports scolaires. Sauf exceptions, les liaisons TER sont elles à la charge des conseils régionaux.

I.2.5.3 Un investissement croissant dans les alternatives à l'automobile

Les dernières décennies avaient vu la création importante d'infrastructures routières et autoroutières en France, avec notamment l'allongement du réseau autoroutier de 5 300 km en 1980 à 8 300 en 1995, puis 11 054 en 2008, et de façon moindre du réseau TGV passant de 1 574 km en 1994 à 1 847 en 2008 (Trégouët 2010).

Cependant, ces dernières années marquent une volonté des pouvoirs publics de promouvoir les alternatives à la voiture individuelle et en particulier les transports en commun. Par exemple, les investissements dans les TCU ont progressé de 4,5% en 2009 en Ile-de-France.

I.2.6 Les déterminants de choix modaux

L'ensemble des paramètres évoqués jusqu'ici participent à l'élaboration de listes de déterminants pouvant directement ou indirectement influencer les choix modaux. Une nouvelle fois, la détermination de ces paramètres fait appel à divers champs d'étude, traités jusqu'à présent de manière inégale.

Le choix d'un mode de transport est déterminé par de nombreux paramètres qui peuvent être socio-économiques, morphologiques, voire idéologiques ; c'est souvent la combinaison de plusieurs de ces paramètres (De Witte et al. 2013). Ces déterminants ont largement été étudiés et en particulier ceux amenant au choix de l'automobile. La très répandue corrélation entre densité urbaine et utilisation de l'automobile (Newman & Jeffrey R. Kenworthy 1999) est certainement l'une des plus connues, mais différentes catégories d'indicateurs sont aujourd'hui étudiées, mêlant les choix personnels des usagers aux différentes contraintes que leur impose chaque mode. Certains modes de transport sont ainsi plus efficaces que d'autres, en termes de ponctualité, de temps de trajet, d'autres coûteront moins cher à l'utilisateur à trajet identique. Les thèmes sont abordés de façon assez inégale dans la littérature. Cette partie propose de mettre en avant les différents déterminants de mobilité qui y sont observés.

La suite se base essentiellement sur une publication récente proposant une revue de littérature d'un corpus de 76 articles sur les déterminants de mobilité (De Witte et al. 2013). Elle les classe en différentes catégories. D'autres publications appuieront celle-ci, et permettront de creuser davantage certaines problématiques (Dargay 2008; Le Néchet & Aguilera 2011). La littérature utilisée regroupe des publications internationales, qui peuvent porter sur des territoires très variés (pas uniquement le cas de la France mais tout de même une majorité de pays dits développés). Des déterminants spécifiques à la France (géographiques, culturels, politiques) peuvent donc exister et ne pas être explicités et développés ici. Cependant, certaines de ces spécificités peuvent être mises en avant indirectement par les déterminants retenus à l'échelle internationale.

I.2.6.1 Déterminants sociaux-démographiques

Bien que cela soit difficile à quantifier, la catégorie probablement la plus étudiée est celle des paramètres sociaux-démographiques :

- **L'âge** : il est influent pour deux raisons. Tout d'abord, l'âge va informer sur le statut social de l'individu et donc sa propension sociale à posséder un véhicule, à effectuer tel trajet plutôt qu'un autre, à se déplacer en famille. Il renseigne également sur la capacité physique à se déplacer, d'une manière ou d'une autre. S'il n'existe pas de consensus, l'âge est pointé comme déterminant pour environ la moitié des publications (De Witte et al. 2013). Certaines publications pointent avant tout l'âge du chef de maison, qui sera un critère de motorisation des

ménages. La période entre 25 et 55 ans pour le chef de famille sera la plus propice à un taux de motorisation élevé pour le ménage (Dargay 2008).

- **Le sexe** : si, à nouveau, il n'y a pas consensus, le sexe apparaît souvent comme un élément déterminant pour le choix modal (environ un tiers des publications observées par De Witte et al (2013). Le plus grand nombre de chaînes de déplacements (dues notamment aux achats, ou encore à la dépose et à la reprise des enfants à l'école) peut impliquer une utilisation accrue de la voiture chez les femmes, car plus pratique pour enchaîner ces déplacements. En revanche, d'autres avancent la dépendance des femmes aux transports en commun, du fait notamment d'une part plus faible d'entre-elles possédant le permis de conduire. Les différentes technologies sont également comparées et il apparaît que les femmes semblent plus sujettes à opter pour les solutions alternatives au véhicule à combustion interne (VCI), notamment le véhicule électrique (VE) (Dagsvik et al. 2002).
- **L'activité professionnelle (ou occupation)** est jugée déterminante pour près de la moitié des publications. C'est avant tout le fait de travailler ou non qui est ici en jeu. Bien que la nature du travail occupé aura un effet indirect sur la mobilité (notamment à cause du revenu) (De Witte et al. 2013), les plus grandes différences se verront entre les actifs et les inactifs. Une différence apparaît également entre travailleurs à temps plein, pour lesquels la carte d'abonnement aux transports en commun présente un avantage, et travailleurs à temps partiel, dont les trajets peuvent être moins réguliers et la carte d'abonnement moins avantageuse.
- **Le niveau d'éducation** : les effets du niveau d'éducation sont davantage indirects. En effet, le niveau d'éducation va directement impacter le niveau de revenu, l'occupation professionnelle. De manière encore plus indirecte, il peut également être lié à l'âge ou au sexe, déjà évoqués (certains diplômes ne se passent plus aujourd'hui et leur plus grande occurrence peut donc refléter une population vieillissante). Ici encore, pas de consensus entre ceux qui corréleront le niveau d'éducation au revenu, puis le revenu à la motorisation (Asensio et al. 2001; Nolan 2002) et ceux qui avancent qu'un niveau d'éducation plus élevé équivalra préférentiellement à une vie dans une grande ville, où les transports en commun sont plus compétitifs. Ainsi, certains avancent que plus le niveau d'étude du chef de maison est élevé, moins il est probable qu'il ait une voiture (Bhat & Koppelman 1993).
- **Le revenu** : ses effets ont été étudiés et démontrés, notamment sur la motorisation des ménages (Train 1980; Thobani 1984; Dargay & Gately 1999) et plus largement sur le choix modal (Schafer 2000; Dargay 2008). Dans environ la moitié des cas, le revenu est identifié comme paramètre influent. Chaque fois, cette corrélation est positive. Plus le revenu est haut (que ce soit pour le chef de famille, le ménage, l'individu), plus il est susceptible d'accéder à la propriété d'une voiture, et en conséquent à son utilisation. Cette tendance semble encore plus marquée dans les pays à bas salaires où les inégalités sont plus fortes.
- **Composition du ménage** : elle va influencer notamment le nombre de voitures disponibles. De manière indirecte, la composition du ménage est par exemple liée à l'âge. De manière

directe, plus un ménage comptera d'individus, plus il sera sujet à posséder (Train 1980) et utiliser la voiture (De Abreu e Silva et al. 2012). En particulier, la présence d'enfants tend à privilégier l'utilisation de la voiture, vu comme un moyen plus commode pour les enfants en bas-âge que les TC ou les deux-roues par exemple (De Witte et al. 2013).

- **Le taux de motorisation** : la possession d'une (ou plusieurs) voiture(s) sera logiquement déterminante dans le choix modal (De Witte et al. 2013). L'achat d'une voiture se fait soit suivant un besoin établi, soit, dans de plus rares cas, suivant une envie. A nombre de personnes égal, un plus faible taux de motorisation pousse le ménage à organiser ses déplacements, tandis qu'une motorisation plus importante poussera à utiliser plusieurs véhicules pour plus d'indépendance, même dans les cas de trajets conciliables.

1.2.6.2 Déterminants spatiaux et morphologiques

Les déterminants spatiaux sont de plusieurs ordres. Ils peuvent avoir trait à la morphologie de la ville considérée et influent sur les possibilités de déplacements. Sont aussi répertoriées ici les notions d'accessibilité aux transports en commun par exemple.

- **Densité de population** : c'est peut-être le paramètre le plus usité dans l'étude de l'utilisation de l'automobile (Dimitriou 1991; Newman & Jeffrey R. Kenworthy 1999; Cameron et al. 2003; De Witte et al. 2013). La comparaison de plusieurs grandes agglomérations dans le monde avait établi le lien entre densité urbaine et utilisation de la voiture (Newman & Jeffrey R. Kenworthy 1999). L'étude avait conclu qu'une population plus dense implique souvent une offre de transports en commun plus développée et, en revanche, un taux de congestion supérieur sur les routes. Par conséquent, en zone urbaine dense, les solutions alternatives à l'automobile gagnent en compétitivité.
- **La diversité spatiale et la proximité aux infrastructures et services** : bien que peu étudiées, elles sont déterminantes pour plus de la moitié des cas où elles sont prises en compte (De Witte et al. 2013). Elles représentent la possibilité pour chacun d'accéder à son lieu de travail, ses loisirs, des espaces verts, des lieux d'achats. L'idée de minimiser les trajets en rendant tous les lieux d'activité proches pour chacun, sans nécessairement chercher à rendre chacun proche de chacun est défendue sous le concept de « la ville cohérente », qui relativise celui, longtemps défendu de « la ville compacte » (Korsu 2012). Egalement la distance à l'arrêt de transport en commun le plus proche sera déterminante (Hensher 2008).
- **La fréquence de passage des TC** (De Witte et al. 2013) : au-delà de la présence d'un arrêt de TC proche du lieu de départ d'un trajet, la question de la fréquence de passage est primordiale. Une grande fréquence de passage ôte une grande part de l'incertitude liée à l'utilisation des TC (et notamment au fait de ne pas être maître de son véhicule et par conséquent de son temps).
- **Les places de stationnement** disponibles sont un frein observé à l'utilisation de la voiture particulière (De Witte et al. 2013). En effet, notamment en zone urbaine dense, les places de

stationnement peuvent être rares. De plus, le prix des places sera un élément important, notamment pour un employé souhaitant stationner son véhicule chaque jour de la semaine, toute la journée. Une utilisation accrue de la voiture est notamment observée dans les entreprises proposant un stationnement gratuit à ses employés. Pour palier à cette problématique du stationnement en ville, en permettant tout de même aux usagers de se rendre en voiture jusqu'à un lieu de desserte acceptable en TC (typiquement jusqu'à ce qu'il rentre dans le PTU), des parkings en périphéries apparaissent ces dernières années, combinant, à moindre coût, un stationnement quotidien et des tickets de TC, à l'instar des parking-relais en France.

En ce qui concerne plus précisément le cas français, Florent Le Néchet et Anne Aguiléra ont récemment étudié les déterminants spatiaux de la mobilité domicile travail dans 13 aires urbaines (Le Néchet 2010). Plusieurs indicateurs sont définis et testés comme pouvant avoir une influence sur la mobilité pendulaire, en particulier sur la distance domicile-travail et sur la proportion de trajets en automobile. Outre la densité, déjà évoquée, sont définis :

- **L'entropie** : elle se présente sous la forme d'un indice allant de 0 à 1 et représente le niveau de désordre de la population. L'aire urbaine est divisée en cellules de même taille et l'entropie va de 0 si la population est concentrée dans une seule cellule à 1 si elle est uniformément répartie sur le territoire. Les résultats montrent qu'une ville entropique (proche de 1) aura des distances pendulaires et une part de trajets en automobile inférieures à une ville concentrée en une seule cellule.
- **La hiérarchie** : elle traite du respect de la loi rang-taille impliquant une relation mathématique entre les populations de villes classées par rang. La hiérarchie est le coefficient « a » dans la formule reliant les populations entre elles : $P_k = P_1 \cdot k^{-a}$ (où P_k est la population de la ville de rang k, P_1 celle de la plus grande ville). Les résultats montrent que plus « a » est élevé, moins la distance domicile-travail et la part de voiture sont grandes.
- **La distance moyenne entre deux individus** : elle est plus importante pour une population dispersée sur tout le territoire que pour une population concentrée en un point. Une faible distance moyenne entre deux individus impliquera une distance domicile-travail également plus faible, ainsi qu'une part de l'automobile faible dans la répartition modale.
- **L'indice de Moran** permet de tester le degré de polycentrisme d'une agglomération (Y. Tsai 2005). L'indice de Moran n'a semble-t-il pas d'effet sur la distance domicile-travail. En revanche, plus une agglomération est polycentrique, plus la part d'automobile sera grande.
- **L'acentrisme** est également un indicateur de polycentrisme. Il diffère de l'indice de Moran par sa signification. En effet, il ne quantifie pas directement le polycentrisme, mais plutôt l'éloignement au modèle monocentrique traditionnel (Le Néchet 2010). Les conclusions sur son utilisation sont en revanche les mêmes : plus une ville est polycentrique, plus la voiture est présente dans la répartition modale.

I.2.6.3 Déterminants propres au trajet

Ont été évoqués jusqu'à présent des traits caractéristiques des personnes voyageant et des lieux dans lesquels elles voyagent. Le trajet en lui-même est caractérisé par certains indicateurs susceptibles d'être déterminants pour la mobilité.

- **Motif de déplacement** : les personnes se déplacent pour différents motifs, qui vont impliquer des attentes différentes en termes de temps de trajet, adaptabilité des horaires, sécurité, confort ou coût (Flamm 2004; Kaufmann 2008; De Witte et al. 2013). Ces différentes attentes vont contraindre le choix de mode et la façon d'utiliser ces moyens de transport (en termes de taux d'occupation des véhicules par exemple (Le Féon et al. 2012)).
- **La distance** à parcourir influence le choix du mode. Respectant la loi de Zahavi du budget-temps constant (Yacov Zahavi & Ryan 1980), des modes de transport plus rapides seront utilisés pour effectuer des distances plus longues (Monzón & Rodríguez-Dapena 2006; Scheiner 2010). Chaque tranche kilométrique aura ainsi sa répartition modale préférentielle, les longues distances préférant l'automobile ou des modes de transport en commun rapides (Avion, TGV), lorsqu'une place plus importante est faite aux modes doux sur courte distance ou encore ce qu'on appelle les transports actifs (faisant appel à l'énergie musculaire) (Millward et al. 2013). La distance, comme le temps, est utilisé comme indicateur de compétitivité des modes (Kreutzberger 2008). Ce paramètre « distance » est considéré comme prédominant dans les déterminants modaux. Des études prospectives existent sur l'évolution des distances de déplacement et notamment l'impact sur l'environnement (Böcker et al. 2013) si bien que certaines politiques publiques en la matière se dirigent vers une taxation des trajets automobile en fonction de la distance (Dargay 2008).
- **Le temps de trajet**, à l'instar de la distance, est un paramètre primordial dans le choix d'un individu. La loi de Zahavi (Yacov Zahavi & Ryan 1980) stipule un budget-temps constant dans le temps. L'amélioration des modes de transports, plus rapides a mené à l'allongement des distances, mais avance également l'importance du paramètre temps pour les choix de mobilité. Deux éléments sont à considérer ici : le temps effectif de trajet (le temps en mouvement) et les autres moments (l'attente à l'arrêt de TC, la marche entre la place de parking et le bureau). Les individus sont davantage sensibles à ces autres moments, où le déplacement n'est pas effectif (Bhat 1998; De Witte et al. 2013). Le temps de transport peut aussi être perçu comme utile par certains individus, comme un temps de réflexion, de repos et certains sont également désireux de ne pas le voir diminuer (Ory et al. 2004).
- **Le coût du trajet** est aussi un élément déterminant de choix modal. Une grande part de la compétitivité des TC tient dans les subventions allouées, réduisant la part à la charge de l'utilisateur. Certaines agglomérations tendent même vers des transports publics gratuits, au travers

d'expérimentations¹². Depuis 1982, les employeurs, en région parisienne, ont obligation de participer aux frais de transports en commun des employés (Auroux 1982). Certaines études montrent néanmoins que seule une faible part des individus déclare actuellement qu'une baisse des prix des TC leur ferait moins utiliser la voiture (Mackett 2003; De Witte et al. 2013).

- **L'heure de départ** : certains modes de transport ne sont pas disponibles tout le temps, ou du moins, pas de la même manière. Notamment, les TC ont une grille d'horaire permettant de répondre à la majorité des déplacements, mais avec, en général, un arrêt complet la nuit. Cela peut être contraignant dans certains cas de déplacements réalisés hors des horaires de desserte (travail de nuit, sorties). Egalement, les TC sont moins fréquents et donc moins attractifs, en heures creuses. En outre, en heure de pointe, la congestion automobile rend souvent les TC, qui bénéficient de voies réservées, plus compétitifs (Lavielle et al. 2008).
- **Le chaînage de déplacements et les facilités d'intermodalité** : les déplacements sont parfois réalisés en chaîne (Vande Walle & Steenberghen 2006). Par exemple, un individu partira de chez lui le matin, déposera un enfant à l'école, avant de se rendre au travail. Les choix modaux sont ainsi contraints par ces chaînes de déplacement. Tout d'abord, le motif de déplacement pouvant être déterminant, une chaîne de déplacement pourra être contrainte par un seul de ses déplacements (par exemple, un individu peut choisir de prendre sa voiture pour tous les déplacements de la journée, simplement parce qu'il souhaite faire des achats importants le soir, qu'il ne pourra pas transporter facilement en utilisant un autre mode). Ensuite, ce sont les facilités d'intermodalité qui entrent en jeu. Un individu sera plus enclin à utiliser un mode alternatif à l'automobile si la correspondance entre ses différents déplacements n'est pas trop contraignante (Currie & Delbosc 2011).
- **Les conditions météorologiques** sont un frein à l'utilisation de certains modes. Des conditions hivernales, notamment, dissuadent l'utilisation du vélo ou de la marche (Carre 1998; De Witte et al. 2013). Plus précisément, des études ont été menées sur les déplacements pendulaires montrant l'impact de la météo sur l'utilisation du vélo (Nankervis 1999; Flynn et al. 2012).

I.2.6.4 Déterminants sociaux-psychologiques

La dernière catégorie est assez peu étudiée dans la littérature. Elle sera uniquement évoquée ici, sans détailler chaque indicateur proposé par (De Witte et al. 2013) et comprend :

- L'expérience désignant le fait d'avoir vécu une expérience ponctuelle positive ou négative dans le passé, déterminante pour les choix modaux présents ;

¹² C'est par exemple le cas d'Aubagne, dans les Bouches du Rhône : <http://www.actu-environnement.com/ae/news/reportage-transports-en-commun-gratuit-18687.php4>

- La familiarité : les expériences ponctuelles conduisent à la familiarité, permettant de simplifier l'utilisation d'un mode et donc de passer outre certains freins évoqués précédemment ;
- Le style de vie peut influencer le choix d'un mode, qui peut être le reflet d'un statut social, la marque d'appartenance à un groupe ;
- Les habitudes : au-delà de la familiarité, et même de l'expérience, les habitudes font parfois en sorte que l'individu ne prend même pas connaissance de solutions alternatives à son fonctionnement actuel ;
- La perception personnelle : liée aux éléments évoqués précédemment, la perception est l'interprétation que fait l'individu d'une expérience. Cette perception, personnelle, influencera la manière d'appréhender cette expérience passée, et donc la façon dont elle sera déterminante pour les choix.

Certains déterminants possibles ne sont pas évoqués dans (De Witte et al. 2013) mais peuvent tout de même constituer de bons indicateurs. Par exemple, le rapport qu'a l'individu aux considérations environnementales peut le pousser vers certains modes privilégiés (Dargay 2008).

1.2.6.5 Synthèse des déterminants de mobilité urbaine relevés dans la littérature

Finalement, l'ensemble des déterminants évoqués dans les parties précédentes est résumé dans les tableaux 1 à 4. Dans la première colonne sont relevés les déterminants principaux, mis en perspective, en seconde colonne avec les différentes manières de les appréhender dans la littérature.

Tableau 1 : Les déterminants socio-démographiques de la mobilité urbaine

Revenu	- revenu moyen - tranches de revenus
Age	- âge moyen - tranches d'âges
Niveau d'éducation	- part des diplômés par catégorie - part des diplômés/non diplômés - taux d'analphabétisme
Sexe	- proportion homme/femme
Occupation	- taux de chômage - part temps plein/partiel - part de chaque catégorie professionnelle
Composition des ménages	- nombre d'enfants - part de familles monoparentales - part de célibataires
Motorisation des ménages	- nombre de véhicules particuliers par ménage - nombre de VP par individu

Tableau 2 : Les déterminants spatiaux de la mobilité urbaine

Densité de population	- nombre de personnes par km ²
Diversité spatiale	- part de chaque typologie de zone
Fréquence des TC	- temps moyen séparant deux passages - temps moyens séparant deux passages, par tranche horaire (prise en compte des pointes)
Proximité des infrastructures et services	- Distance du logement (ou lieu de travail) à l'arrêt de TC le plus proche - Distance du logement aux commerces, écoles, loisirs
Places de stationnement	- Nombre de places disponibles par catégorie (payante/gratuite, sur voirie/parking)
Entropie	- Description précise dans le texte
Hiérarchie	- Description précise dans le texte
Distance moyenne entre deux individus	- Description précise dans le texte
Indice de Moran	- Description précise dans le texte
Acentrisme	- Description précise dans le texte

Tableau 3 : Les déterminants propres aux trajets de la mobilité urbaine

Motif	- Part de chaque motif de déplacement - Motif du déplacement
Distance	- Distance moyenne de déplacement - Distance exacte
Durée	- Durée moyenne - Durée exacte
Coût	- Coût moyen - Coût exact
Horaire de départ	- Horaire de départ du déplacement - Heure moyenne de départ de déplacement
Châinage des déplacements	- Part des déplacements en chaîne
Intermodalité	- Nombre de plateformes intermodales - Nombre de lignes par zone
Conditions météo	- Température / température moyenne - Pluviométrie annuelle / pluviométrie moyenne mensuelle - Taux d'ensoleillement moyen / nombre de jours de soleil annuel

Tableau 4 : Les déterminants socio-psychologiques de la mobilité urbaine

Expérience	- Donnée qualitative (ex : mauvaise / neutre / bonne)
Familiarité	- Donnée qualitative
Style de vie	- Donnée qualitative
Habitudes	- Donnée qualitative
Perception personnelle	- Donnée qualitative
Appréciation personnelle des problématiques environnementales	- Donnée qualitative

L'ensemble des déterminants recensés va donc impacter la mobilité et plus précisément la manière de se déplacer. Ils auront donc, supposément, un impact sur le bilan environnemental associé. Les impacts environnementaux liés aux transports sont multiples. Ils sont introduits dans la partie I.3.

I.3 Les enjeux environnementaux des transports et de la mobilité

Les dernières décennies du XX^{ème} siècle ont vu l'émergence du concept de développement durable. Il naît du constat que, si la Terre est limitée en ressources, la demande ne cesse de croître. Cela est accentué par la croissance de la population mondiale (Shaw 1992). Daly définit le développement durable comme le respect de trois principes (Daly 1990) :

- les ressources renouvelables ne doivent pas être utilisées plus rapidement qu'elles ne se renouvellent ;
- les ressources non renouvelables ne doivent pas être utilisées avant de pouvoir être substituées par une ressource renouvelable ;
- déchets et pollutions ne doivent pas être émis plus rapidement que les capacités d'absorption des systèmes naturels.

Chaque domaine d'étude a des problématiques environnementales propres. La partie suivante propose de dresser un panorama des enjeux environnementaux induits par les transports et plus précisément par la mobilité urbaine.

Comme cela a été abordé précédemment, le domaine des transports est un système complexe mettant en jeu de nombreux et divers acteurs. Il ne se réduit pas à l'action de se déplacer ou de transporter. Pour aboutir à cette action de déplacement, d'autres étapes auront été nécessaires, générant également des impacts environnementaux (fabrication et entretien des véhicules, construction et entretien des infrastructures). A la suite de cette action, d'autres étapes seront également nécessaires (gestion de la fin de vie des véhicules et infrastructures et des matériaux les composant). En conséquent, les enjeux environnementaux ne se limitent pas aux émissions de polluants issues du pot d'échappement des véhicules. Cette partie propose de dresser un panorama des enjeux environnementaux liés aux transports et à la mobilité. Dans un premier temps, elle abordera la problématique des gaz à effet de serre (GES). Ensuite, elle présentera les polluants réglementés des transports, qui sont essentiellement émis pendant la phase d'usage des véhicules. Enfin elle tâchera de décrire les autres enjeux soulevés par le secteur des transports.

I.3.1 Les émissions de gaz à effet de serre

L'origine anthropique du changement climatique, du fait de l'émission de gaz à effet de serre (GES), fait consensus dans la communauté scientifique (R. K. Pachauri et al. 2008). Le GIEC (Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat) créé par l'ONU travaille spécifiquement sur cette problématique. Entre 1970 et 2004, les émissions de GES ont augmenté de 70%. La hausse de température imputable aux émissions de GES depuis le début du XX^{ème} siècle est estimée à $0,74^{\circ}\text{C} \pm 0,18^{\circ}\text{C}$ (Bernstein et al. 2008). Les dernières prévisions font état d'une très probable augmentation des températures de surface de la planète de 1,1 à $6,4^{\circ}\text{C}$, mettant en garde sur la nécessité de réduire

drastiquement les émissions de GES. Outre l'augmentation de la température, un certain nombre de phénomènes sont imputables au changement climatique tels que l'augmentation du niveau de la mer, la fonte des glaces, l'augmentation des précipitations, les changements de circulation de courants marins ou atmosphériques ou certains phénomènes climatiques ou météorologiques extrêmes (Bernstein et al. 2008).

Les GES sont multiples, incluant des gaz présents à l'état naturel – dioxyde de carbone (CO_2), méthane (CH_4), protoxyde d'azote (N_2O), ozone (O_3) ou encore la vapeur d'eau (H_2O) – ou des gaz fluorés produits par l'industrie – tels que les chlorofluorocarbures (CFC) ou les hydrocarbures fluorés (HFC) – et non présents naturellement dans l'atmosphère. Il existe également un certain nombre de GES dits indirects comme par exemple le monoxyde de carbone (CO) – qui s'oxyde pour former du CO_2 . Chaque GES possède un pouvoir de réchauffement global (PRG) particulier (Tableau 5). Le CO_2 est par convention utilisé comme référence et a donc un PRG égal à 1. Les émissions de GES sont ainsi souvent exprimées en équivalent- CO_2 . Le PRG d'un gaz décroît dans le temps. Un calcul d'émissions de GES se fait donc en choisissant (et précisant) un horizon temporel. Le plus généralement, les émissions de GES sont calculées à 100 ans, la durée de vie du CO_2 dans l'atmosphère.

Tableau 5 : PRG à 100 ans des principaux GES (Bernstein et al. 2008)

Gaz	PRG (à 100 ans)	Durée de vie
Dioxyde de Carbone (CO_2)	1	100
Méthane (CH_4)	23	12
Protoxyde d'azote (N_2O)	296	114
Perfluorocarbures (PFC)	5 700 à 11 900	2 600 à 50 000
Hydrofluorocarbures (HFC)	12 à 12 000	0,3 à 260
Hexafluorure de soufre (SF_6)	22 200	3 200

Le CO_2 est le principal gaz à effet de serre produit par les activités humaines, représentant 59,4% des émissions, en équivalent- CO_2 . Ses émissions ont augmenté de 80% entre 1970 et 2004 (R. K. Pachauri et al. 2008), avec pour cause principale l'utilisation de combustibles fossiles (95% des émissions de CO_2 d'origine anthropique).

Dans cette problématique inquiétante, le secteur des transports est particulièrement montré du doigt. A lui-seul, il pourrait empêcher la France de remplir les objectifs nationaux de réduction des émissions de GES assignés par le protocole de Kyoto (Cornut & Louchard 2007). Dans le Monde, le domaine des transports est responsable de 13,1% des émissions de GES (Figure 4). En France, il représente même jusqu'à 26% des émissions de GES (plus particulièrement 34% des émissions de CO_2), du fait notamment d'une production d'électricité moins carbonée que la moyenne mondiale. La mobilité urbaine en émet environ la moitié, ce qui représente 64 millions de tonnes de CO_2 (Verdon et al. 2008).

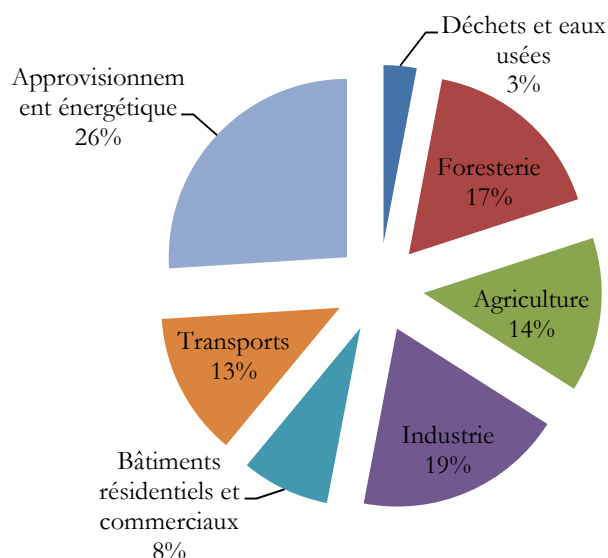


Figure 4 : Répartition sectorielle des émissions mondiales de GES (Bernstein et al. 2008)

I.3.2 Les polluants réglementés des transports

Les polluants réglementés du secteur des transports sont essentiellement ceux issus de la combustion de carburant dans les véhicules à combustion interne (VCI). Ils ont des effets à la fois sur l'environnement et sur la santé humaine. Ce sont des polluants atmosphériques, souvent appelés « polluants réglementés du transport ». Cette appellation découle du fait que ce sont effectivement les polluants ciblés par les normes d'émissions (par exemple les normes EURO). Ils se classent généralement en quatre groupes : les oxydes d'azote (NO_x)¹³, le monoxyde de carbone (CO), particules (ou poussières en suspension) et les composés organiques volatils (COV). La Figure 5 décrit plus précisément l'ensemble de ces polluants. Cette partie offre une description de ces polluants, les enjeux qu'ils soulèvent en termes environnementaux et sanitaires, ainsi que quelques données chiffrées. La partie I.3.3 ouvrira la discussion vers d'autres enjeux environnementaux.

¹³ A titre d'exemple, les seuils réglementaires en termes de concentration de polluants dans l'air sont donnés pour les NO_x en annexe 1.

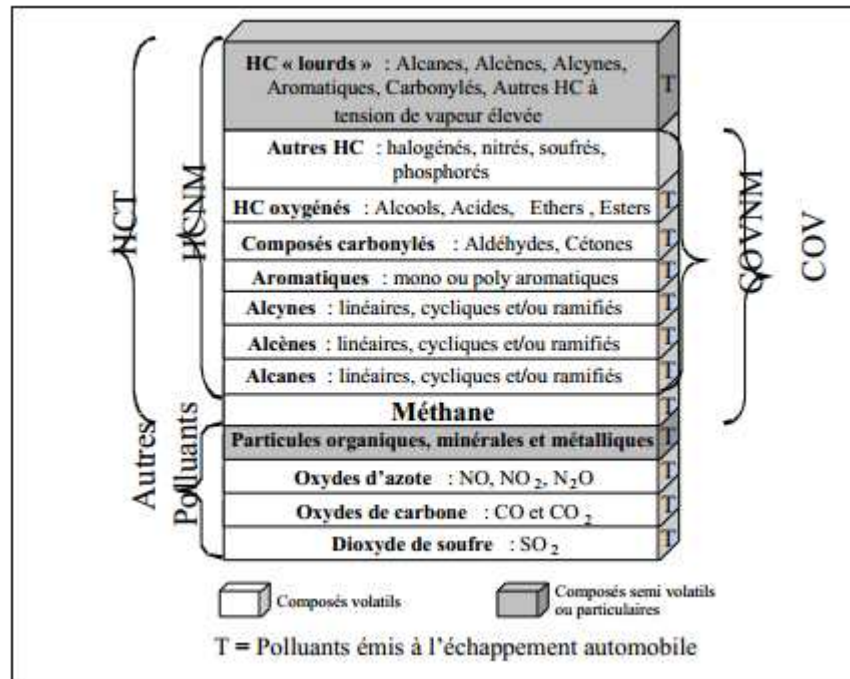


Figure 5 : Description des polluants réglementés des transports (Flandrin 2002) – HC : Hydrocarbures ; HCT : Hydrocarbures Totaux ; HCNM : Hydrocarbures non méthaniques ; COV : Composés organiques volatils ; COVNM : Composés organiques volatils non méthaniques

1.3.2.1 Les oxydes d'azote (NO_x)

La combustion de carburant produit directement du monoxyde d'azote ($N_2 + O_2 \rightarrow 2NO$ (à haute température)). Au contact de l'air, une partie du NO s'oxyde pour former le dioxyde d'azote (NO₂). Il s'oxyde en particulier au contact du dioxygène ($2NO + O_2 \rightarrow 2NO_2$) ou de l'ozone ($NO + O_3 \rightarrow NO_2 + O_2$). Monoxyde et dioxyde d'azote se regroupent sous la dénomination NO_x, exprimée en équivalent-NO₂.

Les NO_x sont impliqués dans la formation de l'ozone troposphérique, plus communément connu sous la dénomination « smog » (Mavroidis & Chaloulakou 2011). Ce phénomène est jugé responsable d'impacts importants sur la santé humaine – maladies respiratoires chroniques – ou sur l'agriculture – du fait des pluies acides (Delfino 2002).

Le NO₂ est également un gaz irritant responsable de maladies respiratoires et/ou cardiovasculaires (Kley et al. 1999; Curtis et al. 2006). Les enfants – par l'accroissement de la sensibilité des bronches à l'infection – les personnes âgées, les asthmatiques – du fait d'une hyperréactivité bronchique – et les insuffisants respiratoires sont particulièrement touchés. Le monoxyde d'azote, quant à lui, perturbe l'oxygénation des organes en limitant la fixation de l'oxygène sur l'hémoglobine (Air Pays de la Loire 2006; Lacour 2011). Les seuils réglementaires sont décrits en annexe 1.

L'origine des NO_x peut être aussi bien naturelle (orages, éruptions volcaniques) qu'anthropiques (chauffage, incinération, production thermique d'électricité ou transports). En Europe, en 2008, le secteur des transports est responsable d'environ 40% des émissions de NO_x (Beevers et al. 2012). En France, en 2010, il représentait à lui seul environ 55% des émissions de NO_x (Citepa 2011), loin devant l'industrie manufacturière (14%) ou le secteur résidentiel et tertiaire (10%). Les émissions de NO_x sont réglementées à l'échelle nationale (par la directive européenne NEC) et des objectifs à moyen terme sont fixés (réduction de 50% des émissions entre 2005 et 2020).

I.3.2.2 Le monoxyde de carbone (CO)

Le CO résulte d'une combustion incomplète de composés carbonés (bois, butane, charbon, essence, fuel, gaz naturel, pétrole, propane). Dans le cas des transports, c'est principalement la combustion des carburants qui émet du CO (Flachsbarth 1999).

Il se mélange à l'air pour ensuite perturber le transport d'oxygène par les globules rouges, après avoir pénétré le sang par les poumons (Flachsbarth 1999). Cela mène au manque d'irrigation des organes en oxygène pouvant conduire à des maux de têtes, nausées, vertiges et, dans les cas extrêmes, à la mort. On parle d'intoxication au monoxyde de carbone. Les catégories les plus sujettes à cette intoxication sont les personnes anémiques, les personnes âgées, les femmes enceintes, les fœtus et les jeunes enfants. Les personnes souffrant de problèmes sanguin, cardiovasculaire et/ou respiratoire sont également particulièrement sensibles (Flachsbarth 1999).

En France, 22% des émissions de CO proviennent du secteur du transport (dont 17% pour le transport routier) (Citepa 2011). Du fait de l'apparition de normes environnementales sur les véhicules, cette part a largement diminué depuis les années 60 (où le transport représentait près de 60% des émissions de CO).

I.3.2.3 Les particules (ou poussières en suspension)

Plus communément appelées particules, les poussières en suspension se divisent en trois groupes, fonctions de leurs tailles : les PM₁₀, dont le diamètre est inférieur à 10 microns, les PM_{2,5}, de diamètre inférieur à 2,5 microns et enfin les PM_{1,0}, d'un diamètre inférieur à 1 micron. Cette dernière catégorie représente plus de 85% de la masse totale de particules (Flandrin 2002). Il existe un indicateur regroupant toutes les particules, indépendamment de leur taille, les Particules Totales en Suspension (PTS) (Citepa 2011).

Les effets sur la santé dépendent de la taille des particules considérées (Schwartz et al. 1996; Klemm et al. 2000). Les particules les plus grosses (diamètre > 10 µm) ne pénètrent pas dans le système respiratoire, retenues par les voies aériennes supérieures, tandis que les particules de taille moyenne (diamètre compris entre 2,5 et 10 µm) demeurent dans la partie haute du système respiratoire, bloquées par les cils de l'arbre respiratoire et rejetées par la toux. En revanche, les particules fines (diamètre inférieur à 2,5 µm) pénètrent profondément dans le système respiratoire, pouvant véhiculer un certain

nombre de composés nocifs (toxiques, allergènes, mutagènes ou cancérigènes) à l'organisme, via le système sanguin (Dockery & Pope 1994; Boezen et al. 1999).

Les effets sur l'environnement ont été largement étudiés. Les particules interviendraient au travers de diverses réactions photochimiques dans la formation du smog d'une part et participeraient au changement climatique, aux pluies acides et enfin à la destruction de la couche d'ozone d'autre part (Xiu et al. 2004).

Le secteur des transports est responsable en France d'environ 9% des émissions totales de particules (PTS). Cependant, la contribution des transports monte à 19% pour les particules fines, le plaçant au troisième rang, derrière le résidentiel/tertiaire (39%) et l'industrie manufacturière (29%) (Citepa 2011). En particulier, les véhicules diesel sont particulièrement émetteurs (jusqu'à 40 à 85 fois plus que les véhicules essence équivalents) (Flandrin 2002). A noter, qu'outre les émissions dues à la combustion, l'usure des pneumatiques, de la chaussée, ou encore la mise en suspension lors du passage d'un véhicule de particules déposées sur la route, représentent une part non négligeable des émissions de particules (Thorpe & R. M. Harrison 2008; Aatmeeyata et al. 2009).

I.3.2.4 Les composées organiques volatils (COV)

L'association d'un atome de carbone (minimum) à des atomes d'hydrogène, oxygène, azote, soufre, phosphore, silicium ou d'un halogène, conduit à la formation d'un composé organique volatil. Sont exclus de cette définition les oxydes de carbone, carbonates et bicarbonates inorganiques. Ils sont, avec les oxydes d'azote, à l'origine de l'ozone troposphérique et contribuent à ce titre aux émissions de GES. Ils sont notamment issus des phénomènes de combustion ou de l'évaporation de composés organiques (de carburants d'essence par exemple).

Les effets des COV sur la santé sont multiples. Ils peuvent aller de la gêne (notamment olfactive) à des effets cancérigènes, tératogènes ou mutagènes (benzène), en passant par l'entraînement de troubles cardiaques, digestifs, rénaux et nerveux (Riga-Karandinos & Saitanis 2005; Parra et al. 2008). Ils jouent également un rôle secondaire dans les réactions chimiques dans l'atmosphère (Atkinson 2000), conduisant notamment à la création d'ozone troposphérique.

En 2010, 42% des émissions des COV étaient imputées au transport routier en France, s'ajoutant à cela 5% pour les autres transports, et ce malgré une diminution de 90% des émissions depuis les années 1990, avec notamment l'apparition des pots catalytiques ou encore la part croissante de véhicules diesel (Citepa 2011).

I.3.3 Les autres enjeux environnementaux

Comme cela a été évoqué en introduction, le domaine des transports soulève d'autres enjeux que ceux, classiques, décrits jusqu'ici. Ces enjeux peuvent être liés aux constructions d'infrastructures

(nécessaires au déplacement). Ce sera le thème du premier point. Mais des enjeux particuliers apparaissent tout au long du cycle de vie, et seront décrits ensuite.

1.3.3.1 Infrastructures de transport

La mise en place d'infrastructures de transport cause un certain nombre d'impacts environnementaux, dont certains différents de ceux engendrés par les polluants réglementés évoqués précédemment. Ces enjeux environnementaux font davantage référence aux problématiques dans le domaine de la construction. Ainsi, des enjeux tels que la consommation de ressources ou d'espace entrent par exemple ici en jeu. L'implantation d'une route (ou de toute autre infrastructure de transport) dans un territoire est potentiellement génératrice de perturbations de l'hydrologie (en polluant les effluents ou modifiant les écoulements), des écosystèmes (faunistique et floristique) et des paysages. Elle peut de plus mener à perturber l'environnement des résidents, notamment du fait de nuisances sonores qu'ils n'avaient pas à supporter précédemment (Sayagh 2007). Différentes méthodes d'évaluation multicritère pour l'aide à la décision dans le domaine routier existent. Sayagh (2007) propose quelques exemples de ces méthodes, prenant chacune en compte, parmi les familles de critères définies, l'impact sur l'environnement. Ainsi sont observés l'étalement humain et ses manifestations sur l'environnement, la protection des eaux de surface et souterraines, de la faune et la flore, des sols, tout comme les impacts sur les productions agricole et forestière.

Fernández-Sánchez et Rodríguez-López (2010), en travaillant à l'élaboration d'indicateurs de développement durable pour le management de projets de construction, avancent une liste de problématiques environnementales qui leur sont liées, classées en trois catégories, représentant les trois piliers du développement durable (environnement, social, économique). Les indicateurs environnementaux sont représentés (Figure 6). Certaines études mettent ainsi en évidence l'importance de considérer une batterie de plusieurs indicateurs, mais également la difficulté engendrée pour tirer des conclusions (Krippendorff 2004). Ainsi, l'utilisation de plusieurs indicateurs peut amener une certaine confusion lorsqu'une solution proposée est meilleure que l'autre seulement sur une partie des indicateurs. Une méthode de hiérarchisation de ces indicateurs est alors parfois nécessaire (CIRAIG 2009). Après consultations d'experts, Fernández-Sánchez and Rodríguez-López (2010) hiérarchisent ainsi les enjeux identifiés. Une liste des 30 indicateurs les plus pertinents est dressée. Les indicateurs environnementaux appartenant à cette liste sont marqués d'une astérisque sur la Figure 6. Ces indicateurs sont regroupés en neuf catégories principales et se composent autant d'indicateurs d'émissions de polluants, de consommations de ressources (matérielles ou énergétiques) que d'indicateurs qualitatifs sur l'adaptabilité au changement climatique ou encore l'impact visuel induit par un projet.

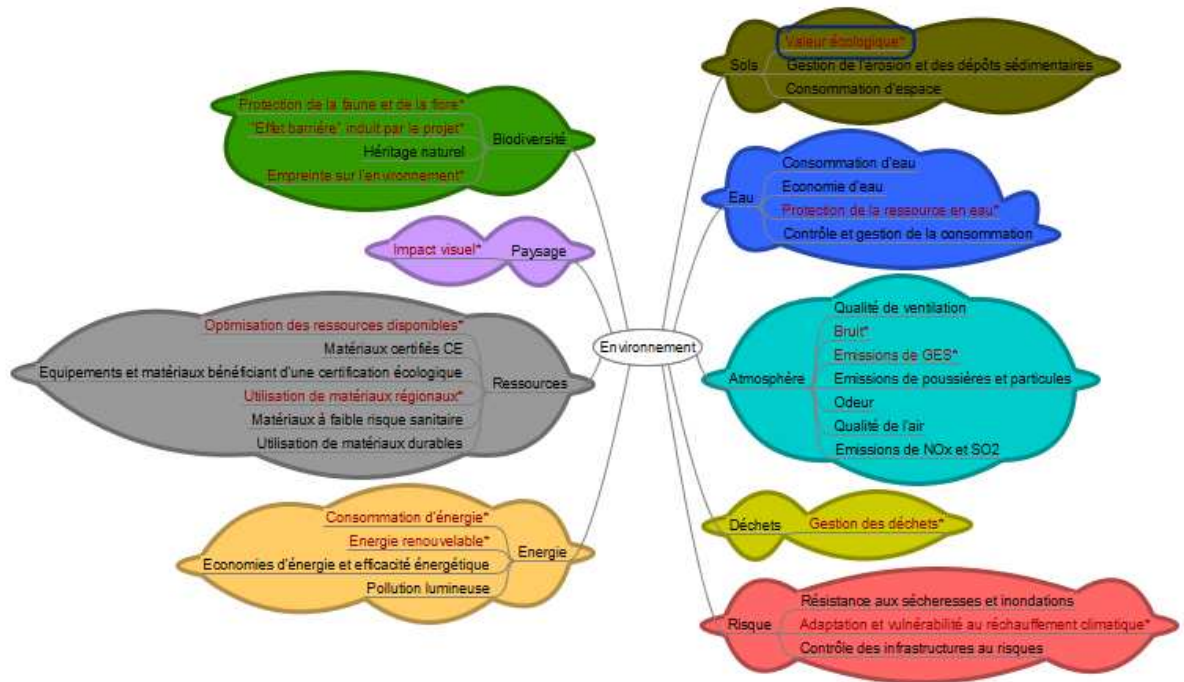


Figure 6 : Carte des indicateurs relevés pour évaluer la partie environnement dans une évaluation de l'impact sur le développement durable d'un projet d'infrastructure – adapté de (Fernández-Sánchez & Rodríguez-López 2010). En rouge, les indicateurs figurant parmi les 30 plus pertinents définis par consultation d'experts.

En premier lieu, la construction routière nécessite de grandes quantités de matériaux. En France, chaque année, 100 millions de mètres cubes de granulats sont extraits, engendrant, outre la raréfaction des ressources naturelles, un certain nombre d'impacts sur les écosystèmes en place ou encore sur le paysage (CIMBéton 2005). Fernández-Sánchez and Rodríguez-López (2010) distinguent six enjeux liés à la consommation de ressources, avec en premier lieu l'optimisation des ressources disponibles et l'utilisation de matériaux locaux. Ces problématiques sont assez largement traitées dans la littérature, notamment dans des études comparatives de matériaux tenant compte de la distance au lieu d'approvisionnement (CIMBéton 2005; CIRAIG 2009; Sayagh et al. 2010) ou par des industriels évaluant la possibilité de valoriser certains de leurs déchets en technique routière (sédiments, cendres) (Anger et al. 2012).

L'idée de « valeur écologique » d'un sol évoquée ici reflète la contamination possible du média sol par différents polluants, tout au long de la durée de vie de l'infrastructure. Ces pollutions sont notamment transmises par l'infiltration d'eau de pluie drainant les substances déposées en surface dans les chaussées (Silvestre 1986). Différents indicateurs existent pour caractériser cette pollution des sols, décrits dans la littérature (Agnès Jullien & François 2006) qui peut dépendre à la fois de la nature des sols où l'infrastructure est implantée et de celle des matériaux utilisés pour la chaussée. Bien que non sélectionnée parmi les indicateurs les plus pertinents dans la publication de Fernández-Sánchez et Rodríguez-López (2010), la consommation d'espace est primordiale dans tout projet d'infrastructure. La construction d'une infrastructure va ainsi modifier l'espace dans lequel elle s'implante. Notamment, elle

va rendre inexploitable la surface au sol qu'elle va occuper, qui pouvait par exemple être précédemment une surface agricole. Ce changement d'affectation des sols est donc également un enjeu fort. Outre les aspects sociaux souvent évoqués lors des discussions autour de tels projets (notamment de possibles expropriations), une infrastructure pourra également induire des impacts environnementaux indirectement, en modifiant la nature des sols où elle s'implante (déforestation par exemple).

Les mêmes phénomènes de transfert de polluants sont observés concernant la ressource en eau. Les polluants, drainés en surface, peuvent être conduits vers la nappe phréatique et vers des ruisseaux ou rivières et ainsi contaminer la ressource. En plus de ces impacts sur la qualité de la ressource, l'eau doit être également considérée de manière quantitative. En effet, des mesures doivent être prises pour minimiser la consommation en eau au moment de la construction, mais également pour la suite. Par exemple, cela peut impacter le choix de certains matériaux, dont l'entretien requiert plus ou moins d'eau, mais également plus ou moins de contaminants potentiels pour cette eau.

Les impacts sur la biodiversité sont bien étudiés dans le cadre des études d'impacts (OEET 2011). En cas d'atteinte à une espèce et d'impossibilité technique de relocaliser le projet, des mesures compensatoires doivent être proposées, comme la réimplantation de cette espèce dans un environnement approprié. Au-delà de l'implantation d'infrastructures, des impacts sur la biodiversité sont aussi remarquables après la construction. En effet, la littérature démontre assez largement la perte de densité faunistique aux abords des infrastructures. L'impact des infrastructures routières sur les mammifères et les oiseaux est ainsi décrit dans une méta-analyse sur une cinquantaine d'études spécifiques (Benítez-López et al. 2010). La notion « d'effet barrière » rapporte au fait qu'une infrastructure de transport peut couper en deux une zone qui était homogène et utilisée entièrement par les espèces y habitant. L'infrastructure constitue alors un obstacle pour les espèces, les empêchant de rejoindre certains points de leur zone d'habitat ou les exposant au risque d'être percutées. Ce possible effet barrière doit être analysé lors de la mise en place d'un projet et géré, le cas échéant. Par exemple, certains projets mettent en place des chemins privilégiés sécurisés, en entourant la route de remparts, mais en proposant, par endroits, des ponts ou tunnels qu'emprunteront les espèces présentes sur la zone.

La pollution atmosphérique est une problématique majeure du domaine des transports (comme vu dans la partie précédente). Parmi les enjeux non-cités précédemment, Fernández-Sánchez et Rodríguez-López (2010) évoquent notamment la gestion du bruit et de l'odeur engendrés par l'infrastructure et pouvant être sources de nuisances et, à termes de problèmes sanitaires pour les populations voisines. Est également citée la qualité de la ventilation. Cette notion s'applique tout particulièrement dans des environnements clos, où la qualité de l'air est très observée. C'est le cas notamment des tunnels (Mak & Hung 2008).

La gestion des déchets est particulièrement observée lors de projets d'infrastructures, notamment leur évacuation vers les centres de valorisation ou traitement adaptés (OEET 2011). En termes de volume, ces déchets sont constitués en grande partie des matériaux excavés pour construire l'infrastructure, et qui ne sont pas utilisés sur place (comme remblai ou autre). En particulier, une

attention particulière est portée à la gestion de la terre excavée, stockée avec soin afin de pouvoir être valorisée par la suite.

L'infrastructure est soumise à un certain nombre de risques, susceptibles d'évoluer dans le temps. Notamment, Fernández-Sánchez et Rodríguez-López (2010) parlent de la vulnérabilité et l'adaptabilité aux changements climatiques. Dans une hypothèse de changements climatiques futurs, largement admise par la communauté scientifique, cette question doit être traitée. En effet, les projets d'infrastructures sont mis en place pour du relativement long terme (de 20 à 30 ans (Agnès Jullien & François 2006)). Il doit donc être prévu qu'ils puissent s'adapter aux évolutions possibles de l'environnement, parmi lesquelles, celle annoncée du climat. Le risque naturel est également observé, notamment la résilience à la sécheresse ou aux précipitations.

Directement liée à diverses autres problématiques évoquées (pollution, consommation de ressources), la consommation d'énergie est très largement étudiée, notamment du fait qu'elle semble constituer un fort levier économique. En particulier, Fernández-Sánchez et Rodríguez-López (2010) avancent la pertinence de deux indicateurs : la consommation totale d'énergie et celle d'énergie provenant de sources renouvelables. Cette différenciation entre énergies renouvelables et non-renouvelable est cruciale, notamment aux vues des directives et objectifs nationaux et européens en la matière (Vial et al. 2009).

Enfin, l'impact visuel de la mise en place d'une infrastructure n'est pas négligeable. Celui-ci peut-être évalué à l'aide, par exemple de photomontages, permettant de pré-visualiser l'implantation de l'infrastructure et parfois également à l'aide de logiciels de SIG permettant également une simulation visuelle en trois dimensions (Hernández et al. 2004).

1.3.3.2 Autres enjeux environnementaux des transports

Cette partie recensera et explicitera un certain nombre d'enjeux non ou partiellement évoqués précédemment.

Déjà évoqué dans le contexte de la mise en place d'infrastructures, la problématique de l'utilisation de sols agricoles à d'autres fins que la production de denrées alimentaires est un sujet de controverse important dans le domaine des agro-carburants. En effet, l'un des reproches fait aux agro-carburants est cette utilisation d'espace agricole à des fins autres que la production alimentaire, malgré les problématiques d'accès à la nourriture présentes et annoncées. Egalement, la production d'agro-carburants est pointée du doigt sur les questions de déforestation. Cette dernière a également des enjeux indirects en matière d'émissions de GES, les forêts constituant des puits de carbone. En outre, ces questions d'affectation des sols à la production d'agro-carburants est apparue critique lors de l'ACV menée sur le sujet en 2010 en France. Il a en effet été jugé primordial en revue critique de prendre en compte cette notion (BIO Intelligence Service & ADEME 2010).

La problématique des déchets n'est pas traitée dans l'évaluation environnementale se concentrant sur la phase d'usage. Pourtant, elle est cruciale dans les transports. La partie précédente a évoqué la

problématique des déchets pour la partie infrastructures. Cependant, différents scénarios sont également évoqués pour la fin de vie des véhicules. Certaines pièces sont particulièrement étudiées. C'est notamment le cas des pneumatiques, pour lesquels plusieurs scénarios peuvent être proposés (Clauzade et al. 2010; Lecouls & Klöpffer 2010). Plus largement, la fin de vie est également observée à l'échelle des véhicules, essentiellement dans des études utilisant l'analyse de cycle de vie (Giannouli et al. 2007; Spielmann et al. 2007; M. Chester & Horvath 2008). Les scénarios de fin de vie ne sont pas seulement observés pour la problématique des déchets. Par exemple, certains évaluent l'influence sur les émissions de CO₂ de mesures telles que la prime à la casse (Smith & Tate 2012).

L'émergence annoncée sur le marché des véhicules électriques soulève la question de l'épuisement de certaines ressources, notamment nécessaires à la fabrication des batteries (Andersson & Råde 2001). La ressource en Lithium (dont les batteries sont particulièrement performantes (Grosjean et al. 2012)) est observée de près, tant au niveau des ressources disponibles et de la pression qu'elle subit (Grosjean et al. 2012; Kushnir & Sandén 2012) que des potentiels de recyclabilité (Miedema & Moll 2013). Outre l'aspect environnemental, la disparition d'une ressource, en induisant une hausse des prix, apparaît être un frein possible au développement d'une technologie et au marché associé (Will 1996; Gruber et al. 2011).

Outre la problématique des ressources engendrée par la production en masse de batteries pour VE se pose également la question des déchets qui en découlent. L'un des objectifs principaux annoncés concernant le Plan National pour le développement des véhicules électriques et hybrides est d'ailleurs la prise en compte par les constructeurs, dès la conception, le cycle de vie complet de la batterie et donc sa fin de vie. La prolongation de la durée de vie des batteries est recherchée tout comme la recyclabilité des ressources rares, en fin de vie (MEEDDM 2009).

Ce panorama des enjeux environnementaux liés aux transports pose la question de leur évaluation. La partie I.4 propose d'explorer les méthodes d'analyse existantes.

I.4 Les méthodes d'évaluation et leur application à la mobilité et aux transports

Comme cela a été abordé dans la partie précédente, les activités humaines et notamment les activités de transport, sont génératrices de problématiques environnementales présentant une menace pour les équilibres écologiques, mais également pour la santé humaine ou encore la préservation des ressources naturelles. Dans ce contexte, la nécessité de disposer de méthodes permettant d'évaluer ces impacts environnementaux est apparue.

De nombreuses méthodes d'évaluation des problématiques environnementales et de multiples indicateurs sont dénombrés pouvant décrire une pression sur l'environnement, le changement d'état engendré, les impacts pour la santé, les écosystèmes ou les ressources en découlant, les réponses apportées ou encore les outils mis en place (Smeets & Weterings 1999). L'Agence Européenne de l'Environnement (EEA) propose une typologie pour classer les indicateurs – certains pouvant être utilisés à différentes fins – (Smeets & Weterings 1999) :

- descriptifs (que se passe-t-il pour l'environnement ou les humains ?) ;
- de performance (est-ce grave ?) ;
- d'efficacité (la solution proposée améliore-t-elle le bilan ?) ;
- de bien-être global (améliore-t-on l'environnement ou le système dans sa globalité ?).

Dans un premier temps, cette partie présentera les méthodes les plus classiquement utilisées pour mesurer les enjeux environnementaux de la mobilité en France. Ces méthodes se basent essentiellement sur les émissions de polluants atmosphériques et de GES pendant la phase d'usage des véhicules. Cependant, il a été montré dans la partie précédente que cette évaluation classique peut être trop restrictive et notamment le périmètre retenu. Ainsi, il est parfois préconisé de tenir compte des émissions indirectes comme par exemple, celles intervenant lors de la fabrication des véhicules ou la construction des infrastructures (M. V. Chester & Horvath 2009). Cet élargissement du périmètre d'étude peut permettre de prendre en compte une part d'émissions supplémentaire, mais également mener à élargir l'évaluation à d'autres enjeux, qui seront évoqués au travers d'une revue de méthodes d'évaluation existantes.

I.4.1 L'évaluation environnementale « classique » de la mobilité : les émissions issues de la phase d'usage

Les impacts environnementaux liés à la mobilité et *a fortiori* aux modes de transport se restreignent souvent au moment du déplacement, à l'action de se déplacer : la phase d'usage. Ainsi, les normes d'homologation EURO ou encore l'étiquette CO₂-énergie sont basées sur cette unique phase

d'utilisation. Cette partie propose de présenter les différentes manières d'appréhender les impacts environnementaux liés à cette phase d'usage, au niveau du véhicule d'abord, puis à l'échelle du territoire. L'exhaustivité ne sera pas visée dans cette partie. Cependant, le choix des méthodes abordées vise à représenter la diversité des méthodes existantes.

I.4.1.1 Evaluer les émissions de la phase d'usage d'un véhicule

Il existe deux moyens principaux pour connaître les émissions de polluants liées à la phase d'usage d'un véhicule : la mesure et l'estimation (à l'aide par exemple de logiciels de modélisation). Cette partie présentera ces deux notions, ainsi que quelques méthodes d'évaluation qui leur sont liées.

I.4.1.1.1 La mesure sur banc à rouleaux

Le moyen le plus précis d'obtenir les émissions de la phase d'usage d'un véhicule est de les mesurer. Pour cela les véhicules sont soumis à des tests de laboratoires sur banc à rouleaux¹⁴. Le véhicule est placé sur un banc à rouleaux qui va simuler un cycle de conduite. La pièce est équipée d'un certain nombre de capteurs qui vont mesurer en direct les polluants que l'on recherche (Flandrin 2002).

Il existe deux types de cycles de conduite :

- les cycles réels : ils sont établis à partir de trajets réels. Un véhicule, équipé de capteurs, va rouler dans des conditions réelles choisies (sur l'autoroute par exemple) et les données relatives au trajet vont être effectuées (vitesse, phases d'accélération, de freinage, etc.). Puis ces cycles sont simulés en laboratoire. A l'échelle européenne, le cycle ARTEMIS a été développé pour rendre compte des émissions réelles sur le continent (André 2004; André et al. 2006).

- les cycles d'homologation : dans une volonté de simplification et de normalisation, ils ont été créés, visant notamment à fournir aux constructeurs une méthodologie standardisée pour mesurer leurs émissions (dans le cadre des normes EURO par exemple). Ces cycles ne sont cependant pas nécessairement représentatifs de situations réelles. A l'échelle européenne, le cycle NEDC (New European Driving Cycle) sert pour évaluer le bon respect des normes EURO (Pacheco et al. 2013).

Ces mesures ne sont pas à proprement parler une méthode d'évaluation environnementale. Elles fournissent en revanche les données d'émissions nécessaires à l'homologation des véhicules pour être mis sur le marché. Des outils ou logiciels permettant de calculer ces émissions de polluants atmosphériques ont été développés, à l'usage notamment des experts nationaux chargés de dresser chaque année les inventaires d'émissions de polluants atmosphériques. La partie qui suit présente ces

¹⁴ Bien que moins usité (pas du tout dans le cadre réglementaire), il existe également un test sur banc moteur, simulant différents régimes supportés par un moteur et leur influence sur l'arbre de transmission et les émissions résultantes (Flandrin 2002).

logiciels.

1.4.1.1.2 L'estimation

Différentes méthodologies ont été proposées, ainsi que des mises à jour, permettant d'estimer les émissions de polluants survenant au cours de la réalisation d'un déplacement. Elles se concentrent sur les gaz à effet de serre, les émissions de polluants atmosphériques réglementés des transports et parfois sur les consommations d'énergie induites par le déplacement¹⁵, avec, en premier lieu, les émissions issues du pot d'échappement du véhicule. Les trois outils – COPERT IV (COmputer Programme to calculate Emissions from Road Transport), MEET (Methodologies for Estimating air pollutant Emissions from Transport), IMPACT-ADEME – relevés dans le tableau fourni en annexe 2 y ajoutent les émissions supplémentaires liées à un démarrage à froid et celles dues à l'évaporation d'une partie du carburant. COPERT IV et l'application au cas français proposé par l'ADEME (IMPACT-ADEME dérivé de COPERT III) évaluent également les émissions de particules liées à l'usure des pneumatiques et des freins. Enfin, la méthodologie MEET propose également de prendre en compte la pente de la route et la charge des véhicules sur les trajets analysés. Si les logiciels COPERT IV et IMPACT se limitent aux véhicules routiers, MEET élargit son champ d'étude aux transports ferroviaire, maritime et aérien. Les trois outils présentés dans cette partie sont tous des variantes de COPERT, dont la partie qui suit propose de présenter les lignes directrices.

1.4.1.1.2.1 Focus sur COPERT IV (COmputer Program to calculate Emissions from Road Transport)

L'ensemble des outils pré-cités est assez proche méthodologiquement. Il a été décidé de faire un focus sur le logiciel COPERT IV, développé à l'échelle européenne (financé par l'Agence Européenne de l'Environnement) et agréé, en France, par l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME). La description de COPERT est une bonne approche des différentes méthodes de cette catégorie qui sont soit des méthodes approchantes, soit directement des variantes. En outre, COPERT IV est largement utilisé¹⁶ à l'échelle européenne (Leonidas Ntziachristos et al. 2009). COPERT est un logiciel initialement développé dans le but de fournir un cadre commun à l'ensemble des Etats de l'Union Européenne afin de réaliser leurs inventaires d'émissions de polluants dans l'air. Il constitue une partie du guide d'inventaires d'émissions dans l'air développé par l'Agence Européenne de l'Environnement (EMEP/CORINAIR). Plus précisément, il en constitue la partie dédiée aux transports sur route. Depuis 2005, la version IV est régulièrement mise à jour.

¹⁵ C'est le cas par exemple de MEET

¹⁶ A noter que les résultats de COPERT sont utilisés pour les parties « phases d'usage » dans la base de données référence en ACV, Ecoinvent.

COPERT IV établit des inventaires d'émissions de polluants dans l'air pour différentes catégories de transport sur route : voitures, véhicules utilitaires légers, poids lourds, deux-roues motorisés (classés en deux catégories principales : plus ou moins de 50 cm³ de cylindrée). Ces inventaires couvrent deux catégories principales de polluants (D Gkatzoflias et al. 2012) :

- les gaz à effet de serre (CO₂, N₂O, CH₄) - en cohérence avec les recommandations méthodologiques de l'IPCC ;
- les polluants conventionnels des transports (CO, NO_x, COV, particules, NH₃, SO₂ et métaux lourds).

En premier lieu, les émissions en sortie de pot d'échappement sont évaluées. Ensuite, COPERT IV évalue également les émissions supplémentaires au démarrage à froid du moteur (Andre et al. 2004), dont la part a notamment grandi pour les véhicules à pot catalytique et peut avoir une influence, notamment lors de temps d'arrêts courts entre les démarrages (Favez et al. 2009). Plusieurs types d'émissions hors pot d'échappement sont calculées, à commencer par celles dues à l'évaporation d'une partie du carburant. Enfin COPERT IV évalue également la quantité de particules émises du fait de l'usure des pneumatiques et des freins.

La méthodologie COPERT a diverses variantes. Il existe notamment sa version australienne (COPERT Australia) fournissant le même type d'inventaires pour ce pays. En France, l'ADEME a développé le logiciel IMPACT, adaptation de COPERT III à la situation française pour la mise en place d'inventaires nationaux. L'Allemagne, la Suisse et l'Autriche ont également développé leurs propres inventaires, décrits dans le HBEFA¹⁷. Malgré un cadre méthodologique similaire, de légères différences peuvent mener à des résultats disparates (Borge et al. 2012).

Différents projets ont contribué et contribuent à la mise à jour de COPERT IV. C'est par exemple le cas du projet européen MEET¹⁸. La méthodologie développée dans le cadre de MEET propose de prendre en compte la pente de la route et la charge des véhicules sur les trajets. Egalement, MEET fournit des inventaires pour le transport sur route, mais également pour les secteurs ferroviaire, maritime et aérien, élargissant ainsi le champ d'étude de COPERT.

Si cette partie traitait essentiellement des émissions à l'échelle d'un véhicule ou d'une flotte de véhicules, certaines méthodes permettent de les évaluer pour une population sur un territoire. Ces différentes méthodes peuvent être basées sur ces données issues de mesures directes sur bancs à rouleaux ou sur des émissions calculées à l'aide de simulations logicielles. Cette partie propose de présenter certaines de ces méthodes, permettant d'obtenir des panoramas des émissions des phases d'usage des véhicules, à grande échelle (territoire).

¹⁷ Handbook of Emission Factors for Road Transport

¹⁸ Methodology for Calculating Transport Emissions and Energy Consumption

1.4.1.2 La phase d'usage des véhicules, à l'échelle du territoire

1.4.1.2.1 La mesure locale de la pollution de l'air

A plus grande échelle, les Agences Agréées de Surveillance de la Qualité de l'Air (AASQA) mesurent et publient en continu les concentrations de certains polluants : particules, dioxyde d'azote, ozone et dioxyde de soufre. Pour chacun de ces polluants, une note est attribuée, en fonction de la moyenne mesurée sur l'ensemble des stations de mesure de l'aire d'étude. Enfin, chaque jour, la pire note des ces quatre mesures sert d'indice pour la qualité de l'air, c'est l'indice *atmo*. Le calcul et la diffusion quotidienne de cet indice est obligatoire pour les agglomérations de plus de 100 000 habitants.

Cependant, si des estimations par secteur sont possibles, la mesure sur le terrain ne peut se restreindre ou même isoler les émissions dues au transport. En effet, les polluants présents dans l'air peuvent aussi bien provenir du transport que d'un autre secteur émetteur (industrie, tertiaire). Egalement, ces mesures sont très dépendantes des conditions météorologiques et notamment des facteurs pouvant perturber la dispersion (Flandrin 2002).

1.4.1.2.2 L'estimation des pressions exercées par le trafic

Si la mesure instantanée de la concentration de l'air en polluants atmosphériques peut permettre d'agir en temps réel (prévention pour les personnes à risques, limitations temporaires de vitesse, incitation à ne pas utiliser la voiture), des estimations des pressions exercées par le trafic sont souvent recherchées, permettant d'obtenir une photographie des émissions d'un territoire et de sa population, comparable à d'autres territoires ou d'années en années.

Une nouvelle fois, différentes manières d'évaluer ces émissions existent. D'une manière générale, les émissions dues aux transports sur un territoire sont obtenues par croisement de données dites *primaires* et de facteurs d'émissions (Jean-Pierre Nicolas 2013).

- Les **données primaires** peuvent être obtenues par :
 - o comptages routiers (il s'agira de placer des capteurs sur certains tronçons routiers et d'observer le nombre exact de véhicules qui y passent en un temps donné, ainsi que leurs caractéristiques) ;
 - o enquêtes : enquêtes ménages-déplacements (EMD) (Certu 2009), enquêtes nationales transport déplacements (ENTD) (Trégouët 2010), recensements de population ;
 - o estimations statistiques (pouvant par exemple être obtenues à l'aide de logiciels de simulation).

- Les **facteurs d'émissions** permettent d'associer à chaque véhicule recensé, un impact sur l'environnement. Ces facteurs d'émissions découlent souvent des méthodes évoquées en partie précédente (évaluation à l'échelle des véhicules).

Les Associations Agréées de Surveillance de la Qualité de l'Air (AASQA) publient régulièrement des cadastres des émissions, réalisés à l'échelle de leur région ou encore sur les principales agglomérations. Ces cadastres contiennent un volet transport, calculé de la manière évoquée précédemment. Par exemple, Atmo Rhône Alpes croise un certain nombre de données primaires aux facteurs d'émissions délivrés par COPERT IV.

A l'initiative de Jean-Pierre Orfeuil en 1984, des méthodes ont été proposées visant à évaluer les bilans énergétique et environnemental des déplacements sur un territoire donné. Les premières sont fondées sur le croisement des données des enquêtes ménages-déplacements (EMD) à des données unitaires de consommations d'énergie, les Budgets Energie Transport (BET) (Orfeuil 1984), pour s'élargir aux impacts environnementaux avec les Budgets Energie Environnement Déplacements (BEED) (Gallez 1995) prenant en compte les émissions de GES, en utilisant les facteurs d'émission de COPERT. A l'échelle nationale, les données de l'Enquête Nationale Transport de 1994 ont été croisées aux données développées dans le cadre de MEET (Raux et al. 2005). Plus récemment, les émissions de GES et consommations d'énergie liées aux déplacements dans l'agglomération de Lille ont été évaluées à l'aide de la méthodologie EEAT (Environment Energy Assessment of Trips) utilisant également les facteurs d'émissions fournis par MEET (Dupont-Kieffer et al. 2010). Jean-Pierre Nicolas a cherché à élargir ces méthodologies, et l'utilisation des EMD, à la mise en place d'indicateurs de développement durable, prenant en compte, en plus des consommations d'énergie et des émissions de GES, des problématiques locales (J. Nicolas et al. 2002). Dans un cas d'application, les données de l'EMD de l'agglomération de Lyon sont croisées aux données de MEET.

Les différentes méthodes (ou logiciels) de modélisation présentées ici permettent d'obtenir des inventaires d'émissions pour le transport et, à plus grande échelle, des cadastres d'émissions sur un territoire (en croisant les inventaires à des données de terrain). Elles se concentrent sur la phase d'utilisation, responsable de la plus grande part de l'impact. Cependant, il existe d'autres méthodes, proposant de prendre en compte un périmètre plus large.

I.4.2 Les différents périmètres pour le calcul d'émissions de polluants

I.4.2.1 Les différentes phases du cycle de vie

Une évaluation environnementale peut s'effectuer à différents périmètres. Comme cela a été vu précédemment, pour le cas des modes de transport, il se restreint souvent aux émissions du pot d'échappement, qui peuvent parfois être élargies à celles de la phase d'usage. Cependant, les autres étapes nécessaires au déplacement (par exemple le fait que le véhicule a dû être préalablement fabriqué) sont moins largement considérées.

Les approches proposant d'élargir le périmètre d'étude incluent par exemple l'extraction et l'approvisionnement en carburant et même la fabrication des véhicules, la construction des infrastructures et la fin de vie des véhicules et infrastructures (ACV, empreinte carbone). Ces méthodologies prennent donc en compte la phase d'usage et y ajoutent les autres phases du cycle de vie d'un véhicule. Plusieurs périmètres existent ainsi pour le cycle de vie d'un véhicule, représentés sur la Figure 7 ¹⁹ dans la partie I.4.2.2. Les différents périmètres sont ensuite explicités dans le Tableau 6, proposé par Picherit (Picherit 2010).

I.4.2.2 Le véhicule, à périmètre élargi

Pour la phase d'utilisation, les données utilisées sont celles provenant des méthodes citées précédemment. Par exemple, la base de données de référence en Analyse de Cycle de Vie (ACV), Ecoinvent, utilise COPERT IV pour caractériser les émissions de la phase d'usage. Ces méthodes ne sont donc pas restrictives par rapport aux précédentes, mais ajoutent au contraire de l'information. L'ACV évalue également les émissions dues à la fin de vie des véhicules et infrastructures. Cette fin de vie, n'est pas directement prise en compte dans les méthodologies évoquées dans la partie précédente. Cependant, elle fait l'objet d'intérêts particuliers lors des projets de mise en place de méthodes d'évaluation. Par exemple, à l'échelle européenne, le projet TERM²⁰ qui vise à collecter annuellement des indicateurs relatifs aux transports et à l'environnement contient un volet sur la fin de vie, comptabilisant le nombre de véhicules en fin de vie chaque année, mais également la quantité de pneumatiques usagers à traiter.

Les enjeux environnementaux couverts par ces méthodes sont assez variés. L'analyse Well to Wheel (WtW) n'inclut en principe que les émissions de GES et les consommations d'énergie. Il faut noter que l'expression WtW est également largement utilisée pour renseigner le périmètre de certaines études ACV, si bien qu'il est fréquent de trouver des articles utilisant le périmètre WtW sur un champ d'indicateurs plus large. L'empreinte carbone ne rend compte que des émissions de GES. Enfin, l'ACV est une méthodologie dite multicritère. En effet, elle propose diverses méthodes permettant de caractériser les flux de polluants en impacts potentiels sur l'environnement, à différents niveaux de caractérisation. La quantité totale émise de chaque polluant (notamment les polluants couverts par COPERT) est ainsi obtenue, pouvant être ensuite caractérisée en impacts potentiels sur le changement climatique, l'acidification, l'eutrophisation, etc.

¹⁹ A noter que le périmètre « well to tank » (du puits au réservoir) ne considère pas directement le véhicule, mais plutôt le carburant. Cependant, rentrant directement en jeu dans le cycle de vie du véhicule, il est tout de même explicité ici.

²⁰ Transport Environment Reporting Mechanism

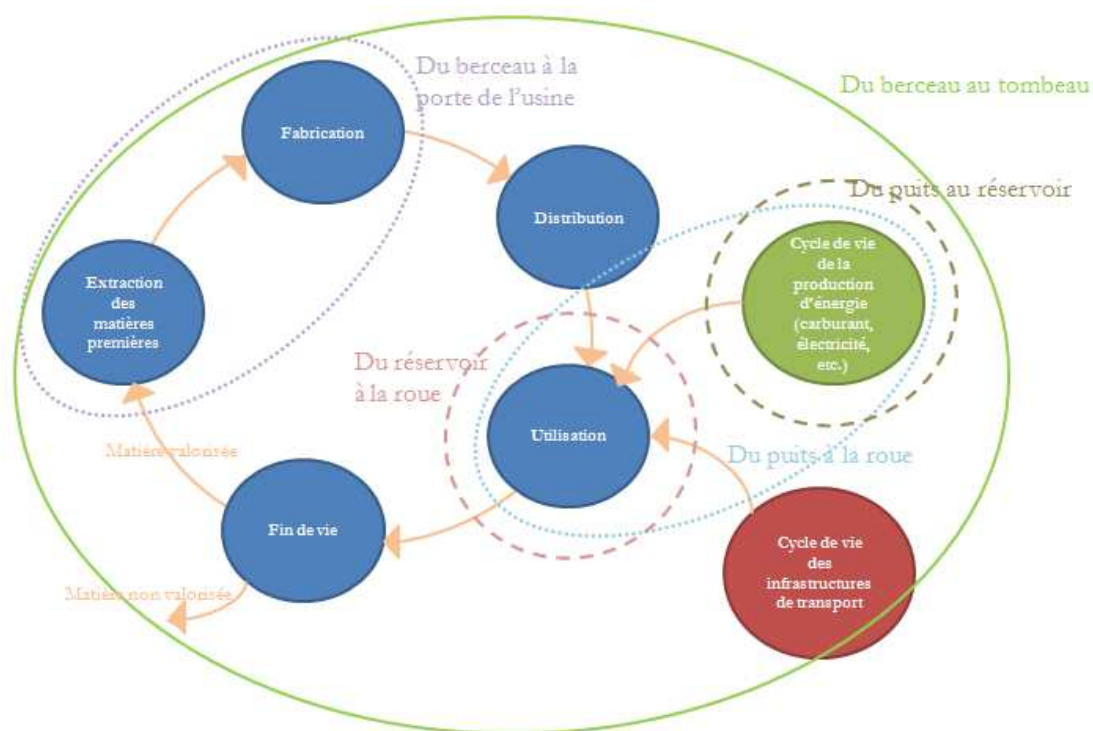


Figure 7 : Schéma descriptif des périmètres existants dans l'étude des véhicules

Tableau 6 : Description des différents périmètres existants dans l'étude des véhicules, d'après (Picherit, 2010)

Périmètre	Phases du cycle de vie prises en compte
Well to Tank (WtT) <i>Du puits au réservoir</i>	- production de l'énergie - transport jusqu'au lieu de distribution (pompe à essence, borne de recharge de VE)
Tank to Wheel (TtW) <i>Du réservoir à la roue</i>	- usage dans le véhicule
Well to Wheel (WtW) <i>Du puits à la roue</i>	- production de l'énergie - transport jusqu'au lieu de distribution (pompe à essence, borne de recharge de VE) - usage dans le véhicule
Cradle to Gate <i>Du berceau à la porte (de l'usine)</i>	- extraction des matières premières - fabrication du véhicule
Cradle to Grave <i>Du berceau à la tombe</i>	- extraction des matières premières - fabrication, maintenance et fin de vie du véhicule - production et acheminement de l'énergie - construction, maintenance et fin de vie des infrastructures

Dans le corpus d'études ACV des modes de transports, l'automobile domine assez largement, suivie du bus, puis d'études plus rares sur d'autres modes ou de comparaisons de plusieurs modes (trolleybus,

tram, train, etc.). Ces différentes études permettent de connaître la part d'impact supplémentaire évaluée en se plaçant au périmètre cycle de vie. C'est ce que propose cette partie en s'appuyant sur un certain nombre d'études relevées dans la littérature.

1.4.2.3 ACV de véhicules

Les impacts environnementaux de la voiture individuelle ont largement été étudiés par l'analyse de cycle de vie. Comme vu précédemment, différents périmètres sont possibles et retenus pour ces études. L'objectif de cette partie est avant tout de déterminer l'intérêt d'un périmètre élargi, par rapport à la plus classique phase d'usage. Ce sera donc avant tout cette différence dans les résultats qui sera étudiée, sans nécessairement détailler chaque étude. Cette partie ne cherchera pas à donner une valeur précise à cette part d'impact, mais plutôt des ordres de grandeur, largement observés dans la littérature.

Les différentes technologies de véhicule sont à considérer. En effet, la part d'émissions hors phase d'usage ne sera pas la même pour un véhicule à combustion interne (VCI) et un véhicule électrique (VE). Le VE est parfois appelé véhicule « zéro émissions », en référence à l'absence de combustion, de pot d'échappement et par conséquent d'émissions lors de la phase d'usage. Cependant, l'évaluation par l'ACV a pour objectif de prendre en compte, non seulement la fabrication et la maintenance du véhicule et des infrastructures en plus de la phase d'usage, mais également, les impacts environnementaux liés à la production d'électricité.

Certains constructeurs automobiles utilisent l'ACV à des fins d'éco-conception permettant parfois, par la même occasion, d'obtenir une description des impacts sur l'ensemble du cycle de vie (Finkbeiner & Hoffmann 2006). Par exemple, différents flux de polluants sont évalués (les polluants conventionnels des transports, ainsi que le CO₂), ainsi que certains impacts potentiels sur l'environnement. Quatre phases sont observées : la phase d'usage, la fabrication de la voiture, ainsi que la fin de vie de ses composants, et enfin, la production de carburant. La phase d'usage apparaît comme la plus impactante pour seulement deux flux de polluants (le CO₂ (environ 80%) et le monoxyde de carbone (55%)), tandis que davantage de NO_x (55%), de composés organiques volatiles (90%) et de méthane (70%) sont produits pendant la phase de production de carburant. Le dioxyde de soufre est majoritairement produit pendant la phase de fabrication de la voiture (60%). Pour certains polluants, la majorité des émissions n'est donc pas à imputer à la phase d'usage. Les polluants les plus étudiés dans les ACV de véhicules sont les GES. Pour la majorité des études observées, la phase d'usage est la plus émettrice de GES. Cependant la part des émissions de GES hors de cette phase gravite autour des 20% (Kakudate et al. 2002; Schmidt et al. 2004; Spielmann & H.-J. Althaus 2007; Hawkins et al. 2012). Pour les autres impacts la part des phases hors usage est plus importante encore (Spielmann & H.-J. Althaus 2007; Hawkins et al. 2012).

La part d'impacts hors phase d'usage est encore plus importante dans le cas des véhicules électriques même si d'assez grandes disparités rendent difficile l'obtention d'ordres de grandeur consensuels. Les constructeurs automobiles utilisent depuis l'apparition sur le marché des VE, l'argument environnemental, en annonçant des véhicules « zéro émissions ». Cette affirmation perd de son sens dans un contexte d'ACV. En effet, l'ACV prendra en compte l'ensemble des émissions et notamment

celles dues à la production d'électricité nécessaire au chargement de la batterie. Il existe des différences assez marquées entre les choix méthodologiques. Par exemple, certaines études considèrent la batterie séparément, lorsque d'autres la considèrent comme une partie du véhicule. Les résultats seront également très dépendants du mix énergétique considéré pour la charge de la batterie et donc du pays choisi pour l'étude (Faria et al. 2013). S'il est donc assez difficile d'obtenir une donnée aussi consensuelle que les 80% du VCI, les études montrent à l'unanimité le besoin de considérer les impacts du VE tout au long de son cycle de vie dans le cadre d'études spécifiques à cette technologie, comme dans le cadre de comparaisons entre technologies (Bartolozzi et al. n.d.; Schuckert 1996; Rantik et al. 1999; Zackrisson et al. 2010). Les études insistent notamment sur les batteries (Notter et al. 2010; Zackrisson et al. 2010; Ma et al. 2012), sur l'importance du mix électrique considéré (Faria et al. 2013), ou encore sur la mise en place des infrastructures nécessaires (bornes de recharges) (Nansai et al. 2001; Lucas et al. 2012; Traut et al. 2012).

Bien que moins répandues, les études sur les autres modes confirment l'importance de considérer toutes les étapes du cycle de vie. Les conclusions des études sur les bus sont assez analogues à celles sur l'automobile, comparant notamment différentes technologies de bus (Paravantis & Georgakellos 2007; García Sánchez et al. 2012; Hodgson et al. 2012). Pour les autres modes de transport, les études sont plus rares, mais la base de données Ecoinvent permet d'obtenir une première estimation de la part des émissions dues aux phases hors usage, qui n'apparaît jamais comme négligeable (Spielmann et al. 2007) tout comme les quelques études recensées comparant plusieurs modes (K. He et al. 2005; M. Chester & Horvath 2008).

L'idée de cette partie n'était pas de fournir des résultats quantitatifs précis sur l'ACV des modes de transport, mais bien de confirmer par la littérature l'importance de considérer l'ensemble du cycle de vie des modes de transports lors d'une évaluation environnementale. Une publication récente porte d'ailleurs sur ce sujet puisque les auteurs y recommandent la prise en compte des infrastructures dans les études d'impact d'un transport de personnes (M. V. Chester & Horvath 2009).

I.4.2.4 Prise en compte des infrastructures

Parmi les différentes étapes évoquées dans la partie précédente, l'une est particulièrement étudiée : la mise en place d'infrastructures de transport. Les projets d'infrastructures de transport sont particulièrement évalués et notamment leurs impacts sur l'environnement. Il faut distinguer deux types d'études lorsque ces projets sont évoqués : celles visant à en faire le bilan environnemental, indépendamment de ses conséquences potentielles sur le trafic (il s'agit alors de regarder seulement l'impact de l'implantation d'un tel projet sur la zone concernée) et celles visant à déterminer l'impact d'un projet d'infrastructure sur le trafic et les effets induits sur l'environnement. Enfin, certaines méthodes partent d'une évaluation socio-économique des projets d'infrastructures et cherchent à y intégrer le coût des nuisances, notamment environnementales. C'est par exemple le cas du rapport Boiteux, paru en 2001 (Boiteux et al. 2001). Cela suppose cependant d'être capable de fixer une valeur tutélaire aux externalités environnementales. Cela existe sur certaines problématiques (GES, pollution atmosphérique), mais pas sur l'ensemble des enjeux environnementaux relevés (perte de biodiversité,

pollution des eaux par exemple). Cela suppose également d'être capable d'évaluer ces enjeux, ce qui rejoint l'idée de disposer de méthodologies d'évaluation performantes.

La première partie se concentre sur les études d'impact sur l'environnement, inscrites au code de l'environnement et obligatoires en France pour tout nouveau projet de construction, dont les projets d'infrastructures de transport. Ensuite, d'autres méthodes d'évaluation sont présentées, en tachant une nouvelle fois de présenter *a minima* les différents courants méthodologiques, sans rechercher à tout prix l'exhaustivité.

I.4.2.4.1 Les études d'impact sur l'environnement (EIE)

Tout nouveau projet d'infrastructure de transport est soumis à l'obligation de réaliser une étude d'impact afin d'éviter un effet néfaste sur l'environnement. Cette obligation est formulée dans la loi n°76-629 du 10 Juillet 1976 et inscrite au code de l'environnement. Ces études doivent évaluer les impacts écologiques potentiels depuis le stade du chantier jusqu'à celui de la déconstruction et proposer des mesures conservatoires et/ou compensatoires en cas d'atteinte à l'environnement. Ces études doivent comprendre (Code de l'environnement 1976) :

- Une analyse de l'état initial du site et de son environnement portant sur : les richesses naturelles et les espaces (agricole, forestier, maritime ou de loisirs) affectés par le projet ;
- Une analyse des effets directs et indirects, temporaires et permanents sur : la faune et la flore, les sites et les paysages, l'eau, l'air et les sols, le climat, les milieux naturels et les équilibres biologiques, la protection des biens et du patrimoine culturel, la commodité du voisinage, l'hygiène, la santé, la sécurité et la salubrité publique ;
- Une présentation des partis retenus par le maître d'ouvrage et les raisons de ces choix ;
- Une présentation des mesures envisagées pour réduire, supprimer ou compenser les atteintes à l'environnement ;
- Une analyse des méthodes utilisées pour évaluer les effets du projet sur l'environnement ;
- Un résumé non technique facilitant l'accès au contenu par les particuliers.

Dans le cas spécifique d'études d'impacts liées aux infrastructures de transport, il est demandé en plus de fournir :

- Une analyse des coûts collectifs des pollutions et nuisances et des avantages induits pour la collectivité ;
- Une évaluation des consommations énergétiques résultant de l'exploitation du projet (comprenant notamment les effets positifs et/ou négatifs sur les déplacements).

Sont regardés les enjeux territoriaux, tels que la préservation de la biodiversité, des espèces protégées, des ressources naturelles ou encore des paysages, mais également des enjeux globaux, tels que la réduction de gaz à effet de serre.

Dans le cadre de l'engagement n°13 du Grenelle de l'Environnement, un élargissement de ces études d'impacts a été proposé, prenant en compte l'ensemble du cycle de vie des infrastructures par l'observatoire énergie-environnement des infrastructures de transport (OEET 2011).

1.4.2.4.2 Les autres méthodes d'évaluation

L'évaluation du cycle de vie des infrastructures de transport est particulièrement étudiée permettant par exemple la comparaison de différentes structures routières, en termes de matériaux notamment. Par exemple, l'utilisation de différents matériaux recyclés pour construire les infrastructures routières est souvent étudiée (gravats, cendres de charbon, ou encore sédiments) (CIMBéton 2005; Sayagh 2007; Forum international des transports. et al. 2008; CIRAIG 2009). Le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC), rattaché depuis 2011 à l'Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux (IFSTTAR), propose un logiciel permettant de calculer l'impact de la mise en place d'infrastructures routières, tenant compte par exemple des matériaux utilisés, de la localisation du chantier (sa distance aux carrières par exemple) ou encore de leur durée de vie estimée (logiciel ECORCE²¹).

Le volet sur l'évaluation environnementale des Plans de Déplacements Urbains (PDU) observe également l'impact de nouvelles infrastructures potentielles sur l'environnement. Cependant, une nouvelle fois, il est rare que les effets induits sur le trafic soient observés. De plus, cette observation est généralement qualitative, ne comprenant pas de calculs d'émissions ou de mesures de concentrations de polluants (Certu 2011). Certains PDU sont désignés comme modèles à suivre, pour la manière de prendre en compte certains enjeux ou de présenter les résultats. Mais l'absence de cadre méthodologique strict pour l'évaluation environnementale du PDU la rend relativement difficile à appréhender et analyser. Surtout, elle empêche la comparaison entre les PDU de différentes agglomérations.

La mise en place d'infrastructures de transport est donc en soi émettrice de polluants et consommatrice de matière. Cependant, elle va également avoir des effets sur les déplacements, les trafics et donc des effets induits sur l'environnement. Ceux-ci sont notamment observés par Joumard et Nicolas (2010), qui ont cherché à établir un jeu d'indicateurs de développement durable analysant les effets directs et indirects sur l'environnement de la mise en place d'infrastructures (Robert Joumard & Jean-Pierre Nicolas 2010). Onze indicateurs ont été jugé pertinents pour la partie environnement, tant au niveau global (émissions de gaz à effet de serre, consommation de matières premières non renouvelables), régional (qualité de l'air régional (smog)) que local (qualité de l'air, qualité de l'eau, risque technologique et naturel, maintien de la biodiversité et respect des zones protégées, pollutions sonores et visuelles, conservation du paysage, occupation d'espace et sécurité des résidents et utilisateurs).

²¹ Les détails sur ce logiciel peuvent être obtenus à l'adresse suivante : http://www.lcpc.fr/utls/division/div_ddgc/result/logiciels.php

1.4.2.5 A l'échelle du territoire

Il a été évoqué précédemment les évaluations à échelle du territoire, tenant compte uniquement de la phase d'usage des véhicules (en croisant par exemple des données d'EMD à des inventaires issus de COPERT). Cette partie vise à étudier ce qui peut exister à cette échelle territoriale, en ne se restreignant pas à la phase d'usage.

Les méthodologies évoquées jusqu'ici dans cette partie sont principalement utilisées pour l'évaluation de configurations existantes, à partir de données réelles collectées. De manière analogue au cas des infrastructures, des méthodes cherchent à évaluer certains projets, certaines décisions politiques ou encore de planifications urbaines. Ainsi, à l'échelle européenne, le programme COMMUTE propose une méthodologie et un logiciel (du même nom) permettant cette évaluation, en tâchant de prendre en compte la notion de cycle de vie. Cependant, ce programme se place à l'échelle internationale et n'est pas adapté au cas précis de la mobilité urbaine. La méthodologie EFECT (Evaluation Framework of Environmental impact and Costs of Transport initiatives), développée en Grèce propose une évaluation qualitative des projets, localement, régionalement ou nationalement. Elle propose différents indicateurs environnementaux et économiques pour chacun desquels une échelle de notation est fixée (Tsamboulas & Mikroudis 2000). Aux Pays-Bas, suivant l'exemple de l'évaluation économique des programmes politiques des candidats aux élections nationales, une méthodologie d'évaluation des implications des programmes liés aux transports sur l'environnement a été proposée. Les effets directs, et parfois indirects (reports de trafic) des différentes mesures sont quantifiés, en termes d'émissions de CO₂, de NO_x et de coût supporté par les citoyens (sous la forme d'impôts ou de taxes) (Annema & Van Wee 2008).

L'empreinte écologique a été appliquée à l'échelle du territoire, pour les transports (Louafi Bouzouina & Jean-Pierre Nicolas 2007). Cette méthode propose une estimation des surfaces de terre productive et d'écosystèmes aquatiques permettant de produire les ressources utilisées et d'assimiler les déchets produits (W. E. Rees 1992; Williams E. Rees et al. 1998). Plus spécifiquement, dans le cas des transports, elle prend en compte les émissions de CO₂ dues à la combustion de carburant, à la construction et à l'entretien des véhicules ainsi que l'espace occupé par les infrastructures (Gondran & Boutaud 2009). Différentes façons d'appréhender les déplacements sont possibles pour l'empreinte écologique :

- Calculer la surface de forêt nécessaire pour absorber le CO₂ émis (la plus largement acceptée et utilisée) ;
- Calculer la surface nécessaire pour produire une quantité équivalente de bio-carburant ;
- Calculer la surface nécessaire pour reconstruire le capital naturel consommé lors de l'utilisation de ressources fossiles.

Dans le cas du Grand Lyon, les émissions de CO₂ ont été converties en surface nécessaire en forêts pour absorber le CO₂ émis. Dans ce cas d'étude également, les émissions de CO₂ sont estimées à l'aide des facteurs d'émission de MEET. Cependant, la méthode n'a pas été largement utilisée sur ce sujet. La

relative facilité de compréhension et d'appréhension par le grand public font de l'empreinte écologique un indicateur très répandu, notamment dans le cadre de communications environnementales des collectivités ou institutions (Observatoire de l'environnement - Mairie de Toulouse 2008; Institut de la statistique du Québec 2009) bien que non adopté internationalement comme indicateur de développement durable, du fait de certaines limites (Defra 2007; Institut de la statistique du Québec 2009; SOeS 2010). En effet, l'aspect didactique n'empêche pas certaines critiques méthodologiques : difficultés à traiter les ressources marines, utilisation de rendements moyens dans certains cas, assignation d'une ressource unique par terrain (même si plusieurs ressources sont effectivement produites) (Costanza 2000; Lenzen & S. A. Murray 2001; Muñoz & Galindo 2005; Nathan 2008).

L'analyse de cycle de vie a, quant à elle, été très peu utilisée pour observer les impacts environnementaux de la mobilité, à l'échelle du territoire. La revue de littérature a pu identifier de rares cas utilisant l'ACV à l'échelle du territoire, mais soit dans le cas d'études d'émissions de villes à une échelle plus large (Heinonen & Junnila 2011) ou dans le cas de l'étude spécifique d'un quartier, d'avantage axée sur les bâtiments (Colombert et al. 2011). La première évalue l'empreinte carbone de deux villes finlandaises en prenant en compte l'ensemble des activités des individus (chauffage et électricité, construction, transports, services, etc.). La seconde est réalisée à l'échelle du quartier. Une évaluation approximative de l'impact du transport des individus est faite, de manière à comparer ce poste aux autres (chauffage, électricité, etc.) mais il n'est pas question d'évaluation spécifique de la mobilité. Cette absence d'utilisation de l'ACV à l'échelle territoriale est confirmée dans une publication cherchant justement à proposer une piste d'adaptation du cadre méthodologique de l'ACV au territoire (Loiseau et al. 2012). Par exemple, cette donnée doit être prise en compte dans le cas de comparaison de bâtiments impliquant un lieu d'implantation différent et donc une mobilité modifiée (B. L. . Peuportier 2001). Il n'a cependant pas été trouvé d'analyse de cycle de vie à proprement parler de la mobilité urbaine.

La partie suivante propose des comparaisons des différentes méthodologies présentées jusqu'ici, au regard de critères spécifiques tels que le périmètre couvert et les enjeux environnementaux traités.

I.4.3 Les méthodes d'évaluation environnementale

La revue de littérature sur les méthodes d'évaluation environnementale montre que le domaine des transports est un champ d'application déjà largement étudié. Cependant, les méthodes sont généralement applicables à des échelles différentes ou pour des objets différents. Ainsi, peuvent être évalués les impacts environnementaux générés par un véhicule, par un projet d'infrastructure de transport ou plus largement encore, pour l'ensemble des déplacements sur un territoire donné. Ces différentes échelles sont souvent directement liées. En effet, à l'échelle du territoire, les calculs d'impacts environnementaux sont souvent le croisement de données primaires sur les déplacements avec des facteurs d'émissions calculés à l'aide des méthodologies développées à l'échelle du véhicule. Ainsi, à titre d'exemple, les Budget Energie Environnement des Déplacements (BEED) croisent des données issues des Enquêtes Ménages-Déplacements (EMD) aux facteurs d'émissions calculés par le logiciel COPERT.

Les méthodes appliquées à l'échelle territoriale ont ensuite été représentées graphiquement (représentation inspirée de (Risch et al. n.d.)), selon deux paramètres (Figure 8) : les enjeux environnementaux considérés (en abscisse) et le périmètre couvert (en ordonnée). L'ACV a également été représentée.

Les différentes méthodologies ont donc été classées selon deux critères principaux :

- la méthodologie permet-elle de prendre en compte différents enjeux environnementaux ?
- la méthodologie est-elle centrée sur la phase d'usage ou s'applique-t-elle à un périmètre plus large ?

La figure 8 met en avant le manque d'applications à la mobilité urbaine d'outils d'estimation des impacts ayant une vision élargie en termes de périmètre considéré et en termes d'enjeux environnementaux pris en compte. Parmi les méthodologies relevées, l'ACV semble la plus pertinente pour répondre à ces problématiques. Sans tomber dans une définition idyllique de la méthode²², son caractère multicritère et l'essence même de la méthode considérant l'ensemble du cycle de vie ont conduit à la sélectionner pour la suite de ce travail de thèse. Parmi les interrogations de thèse apparaît donc la question de la pertinence de l'ACV pour évaluer la mobilité urbaine. Une première partie de réponse est donnée ici : l'ACV semble pertinente car considérerait une part d'impact non classiquement prise en compte et permet théoriquement l'estimation de divers indicateurs d'impacts potentiels pour l'environnement. Des conclusions supplémentaires pourront être dressées au vu des résultats des parties à venir.

²² Certaines limites seront évoquées dans la suite sur la prise en compte plus ou moins pertinente de certains enjeux notamment

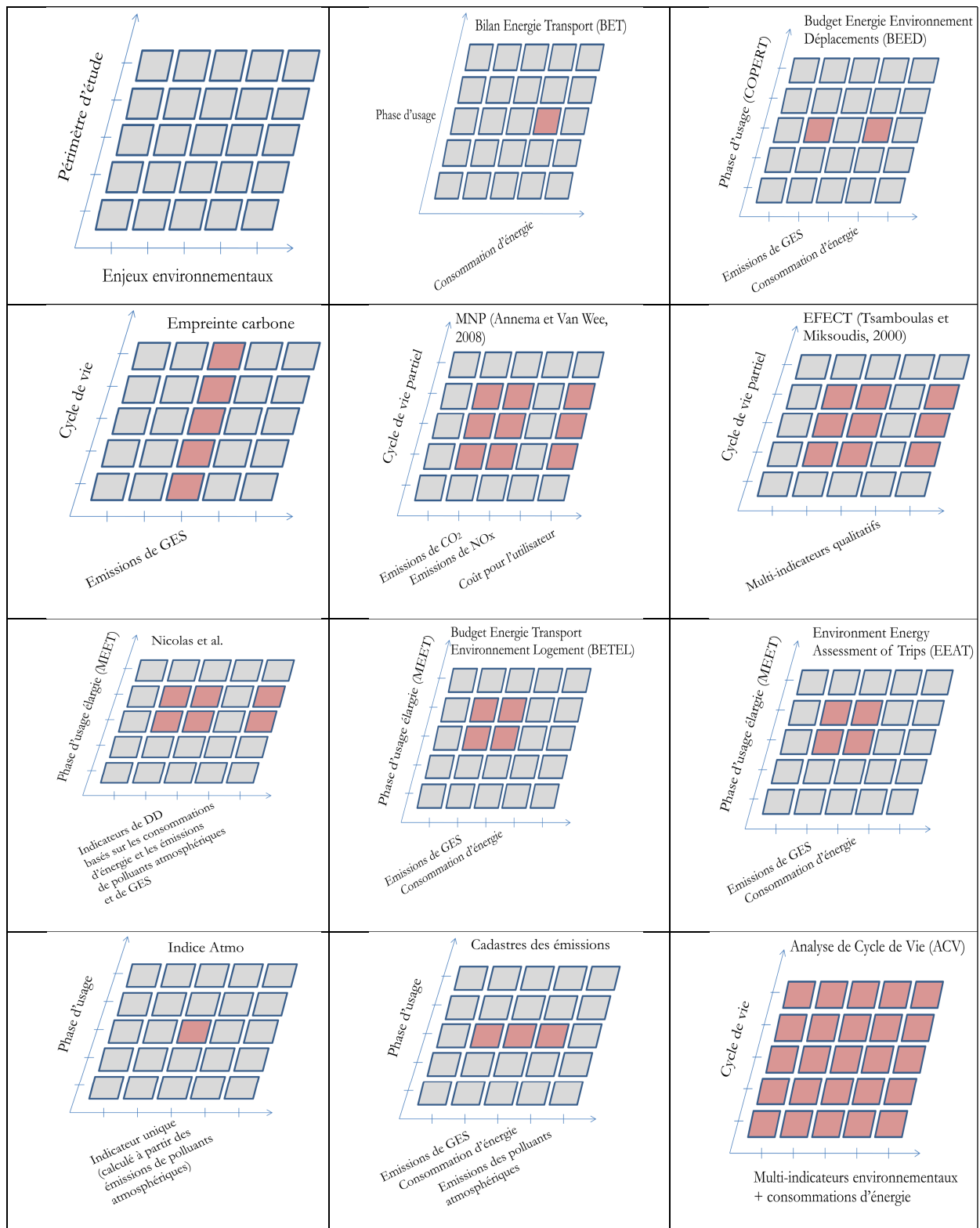


Figure 8 : Représentation graphique des différents outils d'évaluation selon deux paramètres : les enjeux environnementaux considérés et le périmètre couvert (inspiré de (Risch et al. n.d.))

I.4.4 Conclusion de partie

A l'échelle du véhicule, l'ensemble des impacts environnementaux n'est pas couvert par la simple mesure des émissions directes ou même des émissions de la phase d'usage. Pour une automobile à combustion interne, c'est environ 20% des émissions de GES qui ne sont pas prises en compte par exemple. Pour certains modes ou certains enjeux, cette part croît encore.

Bien que ces impacts environnementaux indirects soient assez bien connus à l'échelle du véhicule, il n'existe pas à ce jour d'étude à l'échelle de la mobilité urbaine, permettant de bien appréhender l'ensemble des émissions avec une vision cycle de vie.

Hypothèse de travail : Les impacts environnementaux des transports n'ont pas lieu uniquement lors du déplacement, mais tout au long du cycle de vie (fabrication, maintenance et fin de vie des véhicules, construction, maintenance et fin de vie des infrastructures, production et approvisionnement d'énergie (carburant, électricité), phases d'usage).

I.5 L'analyse de cycle de vie (ACV)

I.5.1 Introduction historique à la notion d'ACV

L'analyse de cycle de vie (ACV) est une méthode d'évaluation des impacts environnementaux applicable en premier lieu aux produits ou services. Elle permet de quantifier les flux de matières, d'énergie et de polluants pour les traduire en impacts potentiels sur l'environnement. Toutes les étapes du cycle de vie sont prises en compte, depuis l'extraction des matières premières jusqu'à la fin de vie.

A la suite du Club de Rome en 1972, la limitation des ressources devient une préoccupation grandissante. Le besoin de quantifier les flux de matières et d'énergie des activités humaines apparaît et s'y ajoute bientôt l'évaluation des flux de polluants dans l'air, l'eau et le sol. C'est la naissance des premiers écobilans qui se concentrent au départ sur les emballages (Blouet & Rivoire 1995). En 1993, la Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC) se réunit dans le but de définir le cadre méthodologique de ce qu'on va appeler l'Analyse de Cycle de Vie. Un premier guide de bonnes pratiques sort de ces discussions (Consoli 1993) puis, à partir de 1997, l'International Standardization Organization (ISO) publie une série de normes sur l'ACV, visant à harmoniser les différentes méthodologies jusque là utilisées (ISO 1997, p.14; ISO 1998; ISO 2000a; ISO 2000b) couvrant respectivement les principes et cadre de la méthode, l'analyse de l'inventaire, l'évaluation de l'impact du cycle de vie et son interprétation. Cette série de normes a été révisée en 2006 pour donner deux normes fixant les principes et le cadre de la méthode (ISO 14040 2006) et les exigences et lignes directrices (ISO 14044 2006).

I.5.2 Principes généraux

L'ACV est principalement utilisée pour remplir deux objectifs (Olivier Jolliet et al. 2005) :

- comparer les impacts environnementaux de différents produits, processus ou systèmes ;
- comparer les impacts environnementaux de chaque phase du cycle de vie d'un produit, service ou système.

Pour cela, la méthodologie se fonde sur quatre phases itératives (ISO 14040 2006) (Figure 9).

L'ACV est une méthode fonctionnelle, c'est-à-dire qu'elle va quantifier les impacts environnementaux d'une fonction rendue par un système. Pour cela, il est nécessaire de définir une unité fonctionnelle (UF) permettant la comparaison de différentes solutions rendant la même fonction.

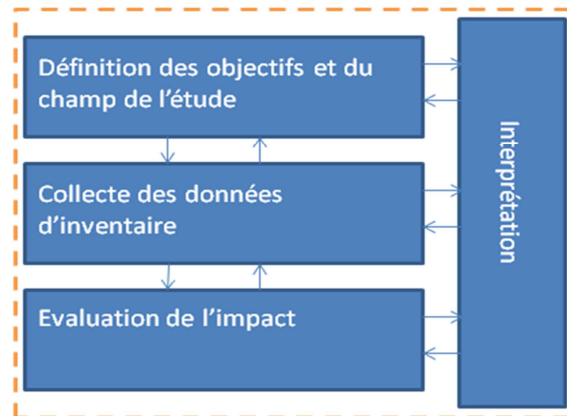


Figure 9 : Les quatre phases de l'ACV

I.5.3 Les quatre étapes de l'ACV

I.5.3.1 Etape 1 : Définition des objectifs et du champ d'étude

La première phase de l'ACV est aussi celle qui va conditionner tout le reste de l'étude. Elle consiste tout d'abord à décrire un certain nombre d'éléments tels que le but affiché de l'étude et les raisons qui ont poussé à la réaliser, le public destinataire ainsi qu'une spécification si l'étude est destinée à donner au grand public des éléments de comparaison entre produits. Ces différents éléments d'objectif vont donner une direction forte à l'étude et mener le prestataire vers certains choix ou hypothèses. Ainsi, une ACV réalisée à des fins de communication grand public d'impacts environnementaux ne couvrira pas nécessairement le même périmètre et n'observera pas les mêmes hypothèses qu'une ACV à des fins d'éco-conception.

Les éléments obligatoires de la définition du champ d'étude sont explicitement donnés par la norme (ISO 14040 2006) :

- les fonctions remplies par le ou les systèmes : dans le cas d'études comparatives, une description précise des différentes fonctions remplies par les systèmes comparés sera requise. En effet, il n'est possible de comparer que des alternatives remplissant des fonctions identiques. Si un produit remplit plusieurs fonctions, une allocation des impacts environnementaux sera nécessaire, avant comparaison avec d'autres produits.

- l'unité fonctionnelle (UF) : l'UF sert de base de comparaison entre des scénarios. C'est sur la base de cette unité fonctionnelle que seront ensuite mesurés l'ensemble des flux de référence. L'UF sera

directement liée aux objectifs de l'étude et pourra varier pour un même produit (Jolliet et al. 1994; Fleischer & Schmidt 1996)²³. Elle doit être mesurable et additive (Jolliet et al. 2005).

- le système à étudier : le système est appréhendé, théoriquement, de manière globale, en tenant compte des théories de la systémique : considérer l'ensemble plutôt que les parties (Bertalanffy 1968), étudier les relations et interactions entre les éléments et avec l'environnement (De Rosnay 1977; Watzlawick et al. 1979), prendre en compte la complexité (Mélèse 1982; Le Moigne 1999). Cependant, dans la pratique, le manque de données ou de temps dans la réalisation d'une ACV conduit à négliger les interactions entre les parties et à considérer le système comme une boîte entrées-sorties (Jolliet et al. 2005).

- les frontières du système : elles offrent la description des processus inclus dans l'analyse. Une nouvelle fois, cela va fortement dépendre des objectifs affichés.

- les règles d'affectation (ou allocation) : si le système étudié est multifonctionnel ou conduit à la fabrication de coproduits, il est nécessaire d'allouer une part des impacts environnementaux à chacun des produits. Les règles d'allocation doivent être spécifiées dans cette première partie car susceptibles d'avoir une influence forte sur les résultats, tel que le montrent de nombreux cas d'étude (Van Zeijts et al. 1999; C. Chen et al. 2010).

- les catégories d'impact sélectionnées, ainsi que les méthodologies d'évaluation associées

- les exigences relatives aux données : les données nécessaires à l'étude sont ici listées de manière générale.

- les exigences initiales de qualité des données : la qualité des données fournit des informations sur la fiabilité des résultats de l'étude et donne des clés pour leur interprétation. Chaque donnée sera décrite en termes de portées temporelle et géographique, limites (étapes du cycle de vie couvertes), forme (agrégées ou non), qualité, sources considérées.

- les limites : tous les processus utiles à la réalisation de la fonction étudiée seront pris en compte. A ces fins, un arbre des processus est souvent créé, visant à couvrir l'ensemble des étapes du cycle de vie, en respectant trois règles :

- les limites du système doivent recouvrir la même réalité fonctionnelle dans les différents scénarios ;
- un critère de coupure est fixé, qui représentera le pourcentage de la masse des intrants à considérer, de la consommation d'énergie finale ou encore des émissions de polluant ;

²³ A titre d'exemple, si le but est de d'afficher le bilan environnemental d'un gobelet en plastique l'UF pourra être « un gobelet en plastique PET de contenance 20 cL », mais si l'idée est de comparer différentes solutions pour contenir un liquide (en volume, forme, matière, etc.), l'UF sera du type « contenir 20 cL de liquide ».

- lorsque deux scénarios contiennent des étapes identiques, ces dernières peuvent être exclues de l'étude.

- le type de revue critique, le cas échéant : elle a pour but de réviser et valiser l'étude et est réalisée par un expert (ou un collège d'experts) indépendant dont les commentaires et modifications apportées sont inclus dans le rapport final. Elle permet d'assurer le respect de l'étude vis-à-vis d'un certain nombre d'éléments : la méthodologie, les données, l'interprétation et la communication des résultats. Elle est rendue obligatoire dans le cas d'une étude visant à communiquer au grand public des résultats de comparaison entre scénarios.

- le type de format du rapport spécifié pour l'étude

1.5.3.2 Etape 2 : Collecte des données d'inventaire

La deuxième phase de l'ACV consiste à quantifier les flux de matière, énergie et polluants traversant le système. La démarche se déroule de la manière suivante. L'arbre des processus établi en première partie permet d'associer à chaque processus unitaire les intrants et émissions directes nécessaires. A l'aide de facteurs d'émission ou d'extraction (obtenus sur le terrain ou dans des bases de données génériques), les émissions et extractions totales liées à chaque intrant sont alors calculées. Afin de faciliter la phase d'inventaire accompagnée d'une collecte souvent fastidieuse, des bases de données existent²⁴. Elles peuvent couvrir de multiples domaines d'application (Frischknecht & Rebitzer 2005) ou être spécialisées dans un champ particulier²⁵. Il est conseillé de privilégier des données spécifiques pour les flux amenant potentiellement une forte variabilité dans les résultats.

Afin de simplifier les calculs, toutes les émissions d'une même substance seront ensuite agrégées (étape 3). Cette agrégation suppose l'hypothèse très simplificatrice que l'environnement dans lequel est émise la substance n'influence pas son impact potentiel. La phase d'analyse des résultats, présentée ensuite, peut permettre d'alerter sur une partie de ces simplifications. Par ailleurs, les évolutions actuelles de la recherche en ACV vont vers une spatialisation des impacts et par conséquent, vers une prise en compte de l'environnement dans lequel est émise une substance (Potting 2000; M. Hauschild 2006; Dresen & Jandewerth 2012). Ce point fera l'objet d'un développement particulier dans le chapitre IV de ce manuscrit.

Comme vu précédemment, si une première condition de réussite d'une étude est d'obtenir un jeu exhaustif de données, la seconde est de s'assurer de la qualité de ces données, notamment par rapport aux objectifs fixés. Il convient alors de fournir un certain nombre d'informations sur :

- les portées géographique et temporelle des données ;

²⁴ Une liste de ces bases de données est proposée par le JRC, Centre de Recherche de la Commission Européenne : <http://lca.jrc.ec.europa.eu/lcainfohub/databaseList.vm>

²⁵ Par exemple, PlasticsEurope propose une base de données propre à l'industrie du plastique en Europe : <http://lca.jrc.ec.europa.eu/lcainfohub/database2.vm?dbid=131>

- les limites du système couvert par les données ;
- la forme des données (elles peuvent être agrégées, moyennées, sous forme de distributions, etc.) ;
- la qualité et les lacunes (comparaisons à d'autres jeux de données, bilans de masses, etc.) ;
 - les intrants et sortants considérés ;
 - les sources considérées (notamment si les données sont génériques ou spécifiques, de littérature ou de terrain).

La vérification de la qualité des données est une phase primordiale. En effet, si l'incertitude liée aux données pour le résultat total de l'ACV est plus grande que la différence en valeur absolue entre les différents scénarios, il n'est pas fiable de comparer ces scénarios.

I.5.3.3 Etape 3 : Evaluation de l'impact environnemental

La troisième phase de l'ACV consiste à calculer des impacts potentiels sur l'environnement à partir des flux de matière, d'énergie et de polluants précédemment inventoriés (Bilan Energie-Matière et Mass Flow Analysis (MFA)). Pour cela des méthodes sont utilisées pour agréger ensemble les émissions susceptibles de provoquer un même impact environnemental. Par exemple, les différentes émissions de gaz à effet de serre inventoriées seront agrégées pour former une catégorie d'impact sur le changement climatique. Il est ensuite possible d'agréger plusieurs catégories d'impacts potentiels ensemble afin de créer des indicateurs de dommages potentiels (sur l'écosystème, la santé humaine, les ressources, etc.) et même de parvenir à l'obtention d'un indicateur unique. Les différents niveaux d'agrégation sont présentés sur la Figure 10.

Certaines substances ont un potentiel d'impact plus fort que d'autres pour une catégorie donnée. Des facteurs de caractérisation sont utilisés, multipliés aux flux inventoriés pour chaque substance. Les méthodes de caractérisation d'impact sont définies et discutées par des experts du domaine. L'utilisation, elle, est plus triviale puisqu'elle ne consiste qu'à multiplier les flux de substances inventoriés par les facteurs de caractérisation des méthodes choisies. Ainsi avec S_j le score pour l'impact j , M_i la masse présente de substance i et CF_i le facteur de caractérisation de la substance i pour l'impact j , l'agrégation peut s'écrire :

$$S_j = \sum CF_i * M_i$$

Les méthodes de caractérisation mettent en œuvre de nombreuses hypothèses et de fait chaque caractérisation supplémentaire ajoute une part d'incertitude aux résultats (Heijungs 2010). Ainsi, dans certains cas, une comparaison des scénarios étudiés à l'échelle des flux est recommandée, lorsque l'utilisateur fait peu confiance à la méthode de caractérisation ou, au-delà, qu'une substance n'est pas caractérisée en un impact quelconque (Joliet et al. 2005).

De nombreuses méthodes de caractérisations existent, qui proposent pour certaines uniquement des catégories d'impacts potentiels (Bare 2011; Laurent et al. 2011) et pour d'autres seulement des catégories de dommages (Goedkoop & Spriensma 2001). Enfin, certaines méthodes combinent catégories d'impacts et de dommages (Joliet et al. 2003; Gabathuler 2006). Le choix de la méthode de caractérisation est un premier choix méthodologique qui peut mener à des résultats sensiblement différents (Dreyer et al. 2003).

La récente question de la spatialisation des impacts implique l'apparition de méthodes permettant de prendre en compte ces composantes spatiales (Impact World+) et de méthodes ne s'appliquant que dans une région donnée (Toffoletto et al. 2007; Bare 2011). Pour certaines catégories d'impacts, un même volume de substance émise n'aura pas le même impact dans des environnements différents. Par exemple, l'émission de phosphates dans un milieu lambda n'aura pas le même impact que dans un milieu déjà eutrophe (Helmes et al. 2012).

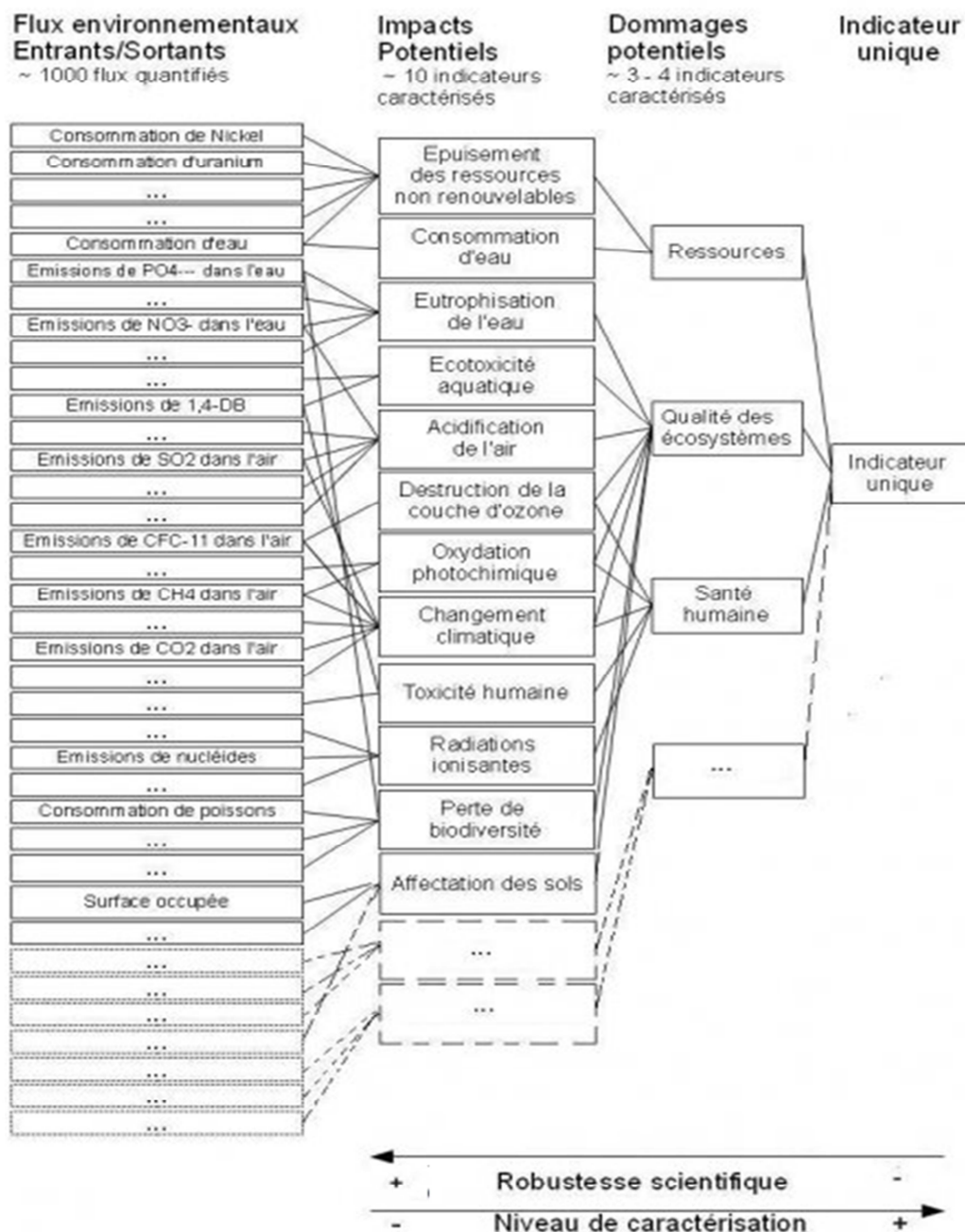


Figure 10 : caractérisation des flux élémentaires en catégories d'impacts ou dommages potentiels sur l'environnement (Réthoré & Le Féon 2010 adapté de Joliet et al. 2005)

Cette étape d'évaluation de l'impact permet d'obtenir un certain nombre d'indicateurs d'impacts, de dommages ou encore uniques. La non-consensualité sur les méthodes à employer et le fait que ces pratiques font intervenir des éléments économiques, sociaux ou sociétaux, pas nécessairement maîtrisés dans le cadre d'une évaluation environnementale participent à rendre optionnel ce classement. Mais si

cela reste optionnel, il est tout de même possible de comparer ces impacts, de différentes manières (De Haes et al. 2002) :

- la normalisation permet de ramener les impacts obtenus à des indicateurs sans unité (Réthoré & Le Féon 2010). L'idée est de diviser chaque impact obtenu par celui d'un habitant de la zone géographique de l'étude, pendant un temps donné ;
- la monétarisation propose de convertir chaque impact en indicateur économique, représentant par exemple son coût de rémediation (Réthoré & Le Féon 2010). A noter que la monétarisation n'est pas à proprement parler une méthode visant à hiérarchiser les impacts et est utilisée parfois uniquement pour traduire les impacts environnementaux dans le langage économiste (Hofstetter & Müller-Wenk 2005) ;
- la distance à une valeur cible permet de comparer les résultats d'impact obtenus à un référentiel qui peut être politique, administratif ou environnemental et dans lequel des objectifs à atteindre ont été définis pour chaque catégorie d'impact (Joliet et al. 2005) ;
- il est simplement possible de regrouper entre elles certaines catégories d'impacts. Il est commun de les regrouper par matrice impactée (air, eau, sol), par échelle géographique (locale, régionale, globale) ou encore par genre (consommation de ressource, émission de pollution).

La non-consensualité sur les méthodes de hiérarchisation à employer et le fait que ces pratiques font intervenir des éléments économiques, sociaux ou sociétaux, non nécessairement maîtrisés dans le cadre d'une évaluation environnementale entretient le caractère optionnel de ce classement.

1.5.3.4 Etape 4 : Interprétation des résultats

La quatrième et dernière phase de l'ACV consiste à interpréter les résultats précédemment obtenus. Elle consiste à identifier les points critiques du bilan environnemental et après discussion, à tirer les conclusions par rapport aux objectifs de l'étude (comparaison de produits, proposition d'amélioration d'un produit, éco-conception, etc.). En fonction des objectifs fixés, différentes analyses sont possibles (contributions de chaque phase du cycle de vie, de chaque composant, etc.). Cette phase permet de définir des actions à mener prioritairement pour améliorer la qualité environnementale d'un produit, service ou scénario.

Cette phase d'interprétation permet d'effectuer des contrôles, vérifications, analyses, visant à valider définitivement le système. La cohérence des unités sera vérifiée, les résultats d'inventaire seront comparés à des études similaires, etc. Enfin seront également effectuées des analyses de sensibilité et, parfois, un calcul de l'incertitude. Les premières servent à tester la sensibilité des résultats aux paramètres d'entrée (données, hypothèses, etc.).

Pour tester la sensibilité aux données, on fait varier chaque paramètre du système (en gardant les autres constants) et on observe la variation des résultats induite. Le test de certaines hypothèses peut

être réalisé en observant la variation des résultats si une autre hypothèse avait été préférée. Il est ainsi possible de tester la variation entre différentes hypothèses d'allocation ou encore les choix de méthode de caractérisation d'impacts.

Il convient de mesurer l'incertitude et la variabilité des résultats obtenus. En effet, dans le cas de comparaison de scénarios par exemple, si l'incertitude sur les résultats est de l'ordre de grandeur de la différence entre les résultats, il ne sera pas possible de conclure sur la pertinence d'un scénario par rapport à l'autre. Egalement, lors de la communication d'un résultat, il est important de justifier sa pertinence en le comparant à l'incertitude qui lui est liée. Concernant la variabilité aux valeurs d'entrée (définis par la distribution de leurs valeurs – généralement log-normales), elle est estimable à l'aide de méthodes statistiques telles que l'analyse Monte-Carlo. On répète le calcul de l'impact un grand nombre de fois (plusieurs milliers), en tirant une valeur pour chaque paramètre, au hasard dans sa distribution. Une distribution statistique des résultats est ainsi obtenue.

1.5.3.5 Analyse critique de l'ACV

Malgré un cadre méthodologique normalisé, le praticien ACV bénéficie d'une marge de manœuvre assez grande, concernant par exemple le choix de certaines hypothèses, l'exclusion ou l'inclusion de certains éléments dans le périmètre, la définition de l'unité fonctionnelle, etc. Ainsi, il peut arriver que des études sur un même produit ou service mènent à des résultats sensiblement différents, voire contradictoires. Cela peut mener notamment les décideurs politiques à considérer l'ACV comme une méthode non conclusive (Reap et al. 2008). Le second point de critique récurrent est la difficulté de hiérarchiser les impacts environnementaux. La hiérarchisation, décrite précédemment, est un processus relativement subjectif. Conceptuellement d'abord, il peut sembler peu pertinent de comparer et hiérarchiser des impacts qui peuvent ne rien avoir en commun. Pratiquement ensuite, les méthodes de hiérarchisation, décrites précédemment, font intervenir un certain nombre d'hypothèses, appartenant parfois à des champs disciplinaires différents et peu maîtrisés des environnementalistes. De ce fait, une connaissance précise du champ d'application d'une étude sera indispensable à une bonne analyse des résultats, afin de ne pas comparer des scénarii sur des indicateurs d'impacts peu révélateurs du cas d'étude.

La méthodologie ACV fournit des résultats fiables et directement exploitables à l'échelle globale. En effet, elle comptabilise les émissions tout au long du cycle de vie et les agrège pour obtenir des indicateurs d'impact potentiel. Elle va donc par exemple additionner les émissions de CO₂ produites lors de la fabrication d'un véhicule en Chine à celles produites par la combustion du carburant pendant qu'il roulera à Paris. Si cela ne pose pas problème pour les enjeux globaux, il est plus délicat de tirer des conclusions pour des enjeux locaux ou régionaux. En effet, si des phosphates sont émis lors de la fabrication d'un pesticide en un lieu A, ils n'auront pas d'effet direct sur l'eutrophisation d'un lieu B, où ils seront épandus. Seuls les phosphates présents dans le produit et épandus en auront un. En outre, ces phosphates n'auront pas le même effet d'un milieu à l'autre (puisque la nature eutrophe initiale d'un milieu sera déterminante dans l'effet final d'un apport d'amendement). Une quantification globale peut donc être obtenue comme première approximation, mais à l'heure actuelle, pas d'évaluation fiable d'un

effet local. Un pan de la recherche actuelle en ACV va vers l'élaboration de moyens de prise en compte de problématiques locales.

Ainsi, la lecture des résultats d'une ACV doit obligatoirement se faire en connaissance des hypothèses (de méthodologie et de modélisation) et du champ d'application de l'étude.

1.5.3.6 Applications au domaine des transports

L'ACV a été largement appliquée au domaine des transports, comme cela a déjà été évoqué précédemment.

Tout d'abord les impacts environnementaux de l'automobile ont été particulièrement étudiés par l'ACV. Les études peuvent être faites à but d'éco-conception. Il s'agit alors de présenter de nouveaux outils d'aide pour le design automobile (Teulon et al. 1995), des comparaisons de différentes solutions technologiques (Bartolozzi et al. n.d.; Schuckert 1996; Leduc et al. 2010; Leduc et al. 2010; Hawkins et al. 2012) ou l'exposé de données générales sur le bilan environnemental de l'automobile sur son cycle de vie (Sullivan et al. 1998). Enfin, des études concrètes permettent d'évaluer les gains environnementaux entre un modèle de voiture et son évolution temporelle (Finkbeiner & Hoffmann 2006).

Certaines études vont se placer au niveau de l'évaluation de scénarios plus globaux. Par exemple, le respect ou non d'un scénario aux objectifs de réduction des émissions qui lui sont fixées par le protocole de Kyoto (Kakudate et al. 2002), l'impact d'un prolongement de la durée de vie de la flotte automobile d'un pays sur le bilan environnemental (Spielmann & H.-J. Althaus 2007) ou encore l'impact de différents mix électriques sur le bilan du véhicule électrique (Bartolozzi et al. 2012) vont pouvoir être testés.

Malgré des objectifs différents, la majorité de ces études propose une évaluation des impacts par phase du cycle de vie. Ainsi, la phase d'usage est la phase la plus impactante pour la quasi-totalité des études et scénarios évalués, avec quelques disparités tout de même, notamment si l'on compare différentes solutions énergétiques. Pour le véhicule à combustion interne (VCI), la phase d'usage est responsable de 70% à 85% du total des émissions (Kakudate et al. 2002; Funazaki et al. 2003; Finkbeiner & Hoffmann 2006; Spielmann & H.-J. Althaus 2007; Hawkins et al. 2012). Cette part a tendance à décroître pour les technologies alternatives, allant de 30 à 50% des émissions pour le véhicule électrique (VE) (Bartolozzi et al. 2012; Hawkins et al. 2012) ou encore de 3 à 67% pour le véhicule à hydrogène (respectivement à pile et à combustion) (Bartolozzi et al. 2012).

Si l'automobile a fait l'objet du plus grand nombre d'études, les autres véhicules ont également été étudiés. Notamment différentes déclinaisons de bus ont été analysées (Paravantis & Georgakellos 2007), parfois comparées au tramway (Hodgson et al. 2012) mais également le train (Spielmann et al. 2008).

Certaines parties du cycle de vie des véhicules sont particulièrement étudiées, faisant l'objet d'analyses spécifiques. Notamment la question des carburants et des batteries pour, respectivement, les VCI et VE révèle des problématiques supplémentaires, qui ne sont pas nécessairement prises en compte

d'emblée lorsque sont considérés uniquement les polluants conventionnels des transports, dans une étude centrée sur le véhicule ou la mobilité. Ainsi, la diversité des solutions énergétiques proposées met en jeu de nouvelles questions environnementales, sociales et économiques. Par exemple, la question de l'utilisation de terres agricoles se pose pour les biocarburants, ou encore la consommation de ressources minières épuisables pour les batteries de VE. Ainsi diverses études spécifiques existent, tant sur les carburants (Koponen et al. 2012; Schäfer et al. 2006; D'Agosto & Ribeiro 2009; Arteconi et al. 2010; García Sánchez et al. 2012) que sur les batteries (Rantik et al. 1999; Matheys et al. 2007; Notter et al. 2010; Zackrisson et al. 2010). Les pneumatiques ont fait l'objet de nombreuses études et notamment la question de la gestion de leur fin de vie (Clauzade et al. 2010; Lecouls & Klöpffer 2010). Enfin, les infrastructures routières ont également largement été étudiées, notamment dans le cadre de comparaison de différents matériaux pour le remblai (routes (CIMBéton 2005; M. V. Chester & Horvath 2009; CIRAIG 2009; Fernández-Sánchez & Rodríguez-López 2010)).

1.6 Le besoin de déplacement

1.6.1 Le besoin et l'économie de fonctionnalité

L'action de se déplacer n'est jamais réalisée sans raison ; elle répond toujours à un besoin, qui peut être, par analogie aux théories de la motivation, qualifié de primaire (H. A. Murray 1938) (se procurer de la nourriture, se rendre chez le médecin, etc.) – ou encore physiologique (Maslow 1987) – ou secondaire (se rendre au cinéma, visiter un ami, etc.). Une personne va chercher à satisfaire en priorité ses besoins élémentaires, puis s'attachera à combler les autres besoins dans un ordre de priorité établi.

L'apparition de la société de consommation a été, tout au long du XX^{ème} siècle, une révolution des modes de vie. Acheter est petit à petit passé du statut de moyen de satisfaire un besoin primaire à celui de se différencier (Baudrillard 1996). La société a ainsi évolué vers la profusion d'objets, de produits et vers l'apparition de nouveaux besoins, non primaires, créés par les produits de consommation eux-mêmes. Déjà depuis les années 70, cette société de consommation a commencé à être décriée, jugeant l'abondance de produits « à posséder » dangereuse pour la nature humaine, se détachant de ses besoins primaires (Galbraith 1998).

Autant par opposition à cette dépendance à l'objet que par obligation (pénurie annoncée des ressources pétrolières (Guseo et al. 2007; Brandt et al. 2010), prix croissant des carburants (Bee 1993; Schubert & Turnovsky 2011) ou encore baisse du pouvoir d'achat), les théories du développement durable tendent ces dernières années à prôner la dématérialisation (Dumas 2012). La notion de service domine celle d'objet, et la propriété n'est plus la norme. C'est ce que l'on appelle l'économie de fonctionnalité (Bourg & Buclet 2005; Geng et al. 2011; Yoon et al. 2012). L'idée est de combler les besoins des utilisateurs, sans chercher à tout prix à vendre tel ou tel objet. Certains industriels commencent à se diriger vers ces concepts. Par exemple, Michelin propose une offre où sont vendus, non plus des pneumatiques, mais des kilomètres. Cette solution permet à l'utilisateur d'avoir en continu des pneumatiques en bon état, évitant les risques d'accidents mais également une part d'impact environnemental (pollution particulière due à l'usure des pneus). Elle permet au distributeur de mieux gérer la fin de vie des pneumatiques. En effet, puisque les pneus usagers sont remplacés dans l'offre, ils sont dans un même temps centralisés et dirigés plus facilement vers les filières de traitement. Un autre exemple est celui de Xerox, proposant de vendre un nombre de copie, plutôt que le matériel pour les réaliser. L'entreprise se charge ainsi de toutes opérations de maintenance, remplacement de pièce en garantissant un nombre annuel de copies.

L'exemple de l'automobile est certainement l'un des plus révélateurs. Devenu l'objet de masse par excellence pendant les Trentes Glorieuses, l'automobile est actuellement dans une phase de transition (comme en témoigne la relative mauvaise santé du marché), accentuée par les problématiques annoncées comme la pénurie de ressources pétrolières et les enjeux environnementaux et sanitaires croissants. C'est ainsi qu'apparaît une nouvelle vision de l'automobile, non plus considérée comme objet de consommation, mais pour sa fonction primaire : permettre le déplacement. La possession n'est plus alors une nécessité et cela ouvre la porte à de nouvelles utilisations telles que l'auto-partage et le covoiturage. La location gagne aussi du terrain et est désormais proposée par les concessionnaires eux-

mêmes, conscients de la nécessité de s'adapter à ces nouveaux modes de consommation. Le développement du véhicule électrique (VE) suit également cette idée de vente de service où certains proposent la location des batteries, moyen de réduire le coût du VE (Li & Ouyang 2011).

I.6.2 Du besoin au motif de déplacement

Si la manière d'effectuer un déplacement est différente selon les individus, elle l'est également selon le motif du déplacement. Ainsi, dans certains cas particuliers, les déterminants du choix modal agissent de manière contraire à l'ensemble des motifs de déplacement. Par exemple, la zone d'habitation située en milieu rural, annonce une utilisation accrue de la voiture particulière, hormis pour les motifs scolaires qui profitent du bon déploiement du ramassage scolaire (F. Maurel et al. 2009). Les données des Enquêtes Ménages Déplacements (EMD) des dernières années montrent une grande part modale de la marche pour se rendre au marché, tandis qu'on utilisera d'avantage l'automobile pour se rendre au supermarché (De Solere 2009). Ainsi le motif de déplacement est un déterminant fort de choix modal (Insee 2011; De Witte et al. 2013).

Certains motifs de déplacement, du fait de leur fréquence ou encore du volume total qu'ils représentent bénéficient d'une attention particulière. C'est le cas par exemple des déplacements pour le motif « achats » (Bacon 1995; Bhat 1998; Russo & Comi 2012). Les déplacements pendulaires (domicile-travail et domicile-études) sont également particulièrement étudiés (Chan et al. 1994; Talbot 2001; Baccaini et al. 2007; D.-H. Tsai et al. 2008; Sandow & Westin 2010; Heinen et al. 2011). Représentant environ un cinquième des déplacements (Trégouët 2010), ils ont l'avantage d'être quotidiens et fixes, permettant une bonne traçabilité et donc une analyse fine. Il est possible, en outre, de les traiter avec plus de précision en utilisant les données de recensement de la population, qui contiennent les localisations de résidence et d'emploi. Ils sont cependant nettement plus longs en moyenne et se déroulent aux heures de pointes. Ce dernier élément les rend structurant pour les réseaux et la voirie qui sont dimensionnés pour les pointes. Un déplacement va donc répondre à un besoin, être effectué pour un motif. Certains besoins de déplacement vont ainsi nécessiter de respecter des conditions de réalisation particulières en termes de sécurité, de ponctualité, etc. qui impacteront eux-mêmes la manière de se déplacer (choix du mode notamment) (Flamm 2004; Kaufmann 2008).

Cette notion de besoin permet en outre de considérer les solutions alternatives, apparues notamment avec l'avènement des technologies de l'information. En effet, en s'attachant à la fonction remplie par un déplacement, et non plus directement au déplacement, il est possible de considérer les solutions qui suppriment le déplacement traditionnel. Le développement par exemple de la visioconférence offre une possibilité de répondre au besoin classique de se réunir pour raison professionnelle, sans utiliser le déplacement physique traditionnel. Le même service est rendu, le même besoin rempli, mais avec des impacts environnementaux, économiques ou sociaux différents. Le télétravail se développe également (Bélanger 1999; Pulido & López 2005) où le besoin de déplacement domicile-travail est remplacé par l'utilisation des technologies de l'information notamment, avec souvent pour argument les considérations environnementales (Dissanayake & Morikawa 2008; H.-J. Rhee 2008; H.-J. Rhee 2009) ou les impacts positifs sur la congestion (Mitomo & Jitsuzumi 1999; De Borger & Wuyts 2011).

I.6.3 Les nomenclatures de besoins de déplacements

I.6.3.1 Déplacements d'individus

En France, une nomenclature des motifs de déplacements des individus est proposée par l'INSEE et utilisée dans le cadre des EMD. Elle se compose de 24 motifs de déplacements, réunis en 6 catégories principales décrites Figure 11. Les déplacements sont classés selon le motif « à destination », c'est-à-dire qu'un déplacement domicile-travail sera compté dans la catégorie « travail », quand un déplacement travail-domicile sera compté dans celle « vers le domicile » (qui comprend de facto de nombreux déplacements).

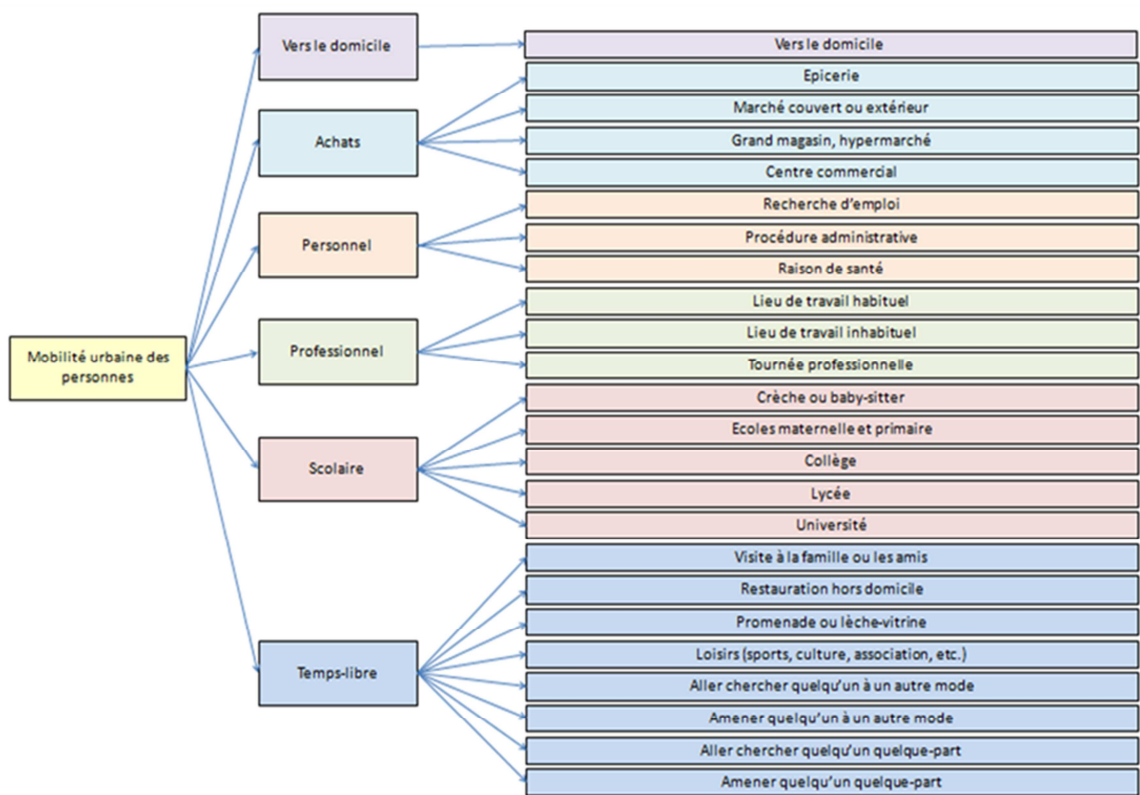


Figure 11 : Nomenclature des motifs de déplacement INSEE, EMD représentée par (Le Féon et al. 2012)

I.6.3.2 Déplacements de marchandises

Moins largement étudiés, les déplacements de marchandises sont classés selon trois grandes catégories (Routhier 2002; Segalou et al. 2002; Albergel et al. 2006; Chiron-Augereau 2009) :

- les échanges entre l'ensemble des établissements économiques : ce sont les flux de marchandises entre industriels et distributeurs (commerce de gros et de détail) ainsi que les

approvisionnement des artisans, services, bureaux ou administration. Ils représentent entre 35 et 40% des kilomètres UVP (unité de véhicule particulier) du total ;

- les enlèvements de marchandises générés par les achats : ce sont principalement les approvisionnements des ménages par leurs propres moyens. Ils représentent 50 à 55% du total ;

- les autres flux (qui représentent entre 10 et 15% du total) :

- approvisionnements des chantiers (voirie, bâtiment), remblai ou déblai de gros œuvre ;
- déménagements des particuliers et des entreprises ;
- entretien et/ou développement des réseaux urbains (gaz, électricité, eau, assainissement) ;
- approvisionnement des services municipaux par les magasins généraux ;
- collecte et acheminement des déchets ménagers et industriels ;
- livraisons à domicile ;
- services postaux (hormis la distribution).

Sont exclus les déplacements liés à des courriers de plis et au transport d'effets personnels ou professionnels comme l'outillage ainsi que les déplacements professionnels pour réparation ou maintenance technique lorsqu'il n'est pas objet de transport de matériel ou de pièces installées sur place.

I.6.4 Conclusion de partie

Comme vu précédemment, tout déplacement répond à un besoin particulier. Un besoin impliquera un certain nombre de contraintes propres telles que la nécessité d'être ponctuel, de pouvoir choisir son horaire, de voyager confortablement, etc.

Ces contraintes vont impliquer une manière de se déplacer différente selon le besoin. Le déplacement pourra différer en termes de choix modal, mais également dans la façon d'utiliser un mode. Il est ainsi remarquable que le taux d'occupation de l'automobile pour les déplacements domicile-travail est plus faible que le taux d'occupation moyen en France (tous motifs confondus).

L'hypothèse associée à cette notion est que le besoin de déplacement va non seulement impliquer une façon différente de le remplir, mais également, potentiellement, un impact environnemental différent. Dans la suite du travail, la mobilité urbaine sera donc subdivisée en catégories de déplacements, classés selon le besoin (ou motif) auquel ils répondent.

Hypothèse de travail : La mobilité urbaine peut être divisée en besoins de déplacement, qui ne seront pas nécessairement comblés de la même manière.

I.7 Conclusion du chapitre – hypothèses et questions de Recherche

Cette première partie avait pour but d'étudier les éléments constitutifs de la mobilité urbaine et plus précisément, ceux participant à en appréhender les enjeux environnementaux. Elle devait ainsi permettre d'identifier certains manques dans la littérature afin de poser nos hypothèses de travail et de proposer une méthodologie d'évaluation adaptée (en chapitre II).

Après avoir défini certains éléments constitutifs (notion de déplacement, espace urbain, les modes de transport), elle s'est attachée à décrire comment la mobilité urbaine est appréhendée dans différents domaines de recherche ou d'action (socio-économie, urbanisme, politique publique, statistiques). Cette étude a permis de construire une liste des déterminants de la mobilité urbaine, selon divers domaines d'étude. Ces déterminants permettront dans la suite du travail de mieux construire la réflexion, orientée par la littérature existante.

Puis, un panorama des enjeux environnementaux induits par la mobilité urbaine, de manière directe (émissions de polluants atmosphériques lors du déplacement) et indirecte (impacts liés à la construction d'une route par exemple) a été dressé. Une analyse comparative des méthodes d'évaluation environnementale appliquées au domaine des transports a ensuite été menée, à la recherche d'une méthode permettant à la fois la prise en compte des impacts tout au long du cycle de vie et la possibilité d'une évaluation sur plusieurs critères environnementaux. Cela a mené au choix de l'ACV.

Enfin, la notion de besoin de déplacement a été abordée. Si beaucoup d'études de la mobilité se basent sur des typologies d'individus de classes socio-professionnelles différentes par exemple, peu se penchent sur la notion de besoin de déplacement, en particulier pour la question des impacts environnementaux. Récemment, les émissions de NO₂ de différents besoins ont été comparées en Belgique (Beckx et al. 2013). Certaines étudient bien précisément certains motifs, mais les mêmes déplacements sont souvent privilégiés (déplacements pendulaires). Il a été décidé ici de proposer une comparaison des différents besoins de déplacement, au regard de leurs impacts environnementaux.

Il a donc été montré d'une part qu'il n'existe actuellement pas d'évaluation environnementale de la mobilité conjuguant les prises en compte des notions de cycle de vie et de besoin de déplacement. Cette partie a donc permis de proposer deux hypothèses de travail principales, basées sur ces notions de cycle de vie, et de besoin de déplacement. Ces hypothèses sont maintenant détaillées ainsi que les questions de Recherche en découlant.

I.7.1 Hypothèses de Recherche

I.7.1.1 L'évaluation environnementale tout au long du cycle de vie

A l'échelle du véhicule, l'ensemble des impacts environnementaux n'est pas couvert par la simple mesure des émissions directes ou même des émissions de la phase d'usage. Pour une automobile à combustion interne, c'est environ 20% des émissions qui ne sont pas prises en compte. Pour un véhicule électrique, cette part croît encore.

Bien que ces impacts environnementaux indirects soient assez bien connus à l'échelle du véhicule, il n'existe pas à ce jour d'étude à l'échelle de la mobilité urbaine, permettant de bien appréhender l'ensemble des émissions avec une vision cycle de vie.

Hypothèse 1 : Les impacts environnementaux des transports n'ont pas lieu uniquement lors du déplacement, mais tout au long du cycle de vie (fabrication, maintenance et fin de vie des véhicules, construction, maintenance et fin de vie des infrastructures, production et approvisionnement d'énergie (carburant, électricité), phases d'usage).

I.7.1.2 La subdivision de la mobilité en besoins de déplacements

Tout déplacement répond à un besoin particulier. Un besoin impliquera un certain nombre de contraintes propres telles que la nécessité d'être ponctuel, de pouvoir choisir son horaire, de voyager confortablement, etc.

Ces contraintes vont impliquer une manière de se déplacer différente selon le besoin. Le déplacement pourra différer en termes de choix modal, mais également dans la façon d'utiliser un mode. Il est ainsi remarquable que le taux d'occupation de l'automobile pour les déplacements domicile-travail est plus faible que le taux d'occupation moyen en France (tous motifs confondus).

L'hypothèse associée à cette notion est que le besoin de déplacement va non seulement impliquer une façon différente de le remplir, mais également, potentiellement, un impact environnemental différent. Dans la suite du travail, la mobilité urbaine sera donc subdivisée en catégories de déplacements, classés selon le besoin (ou motif) auquel ils répondent.

Hypothèse 2 : La mobilité urbaine peut être divisée en besoins de déplacement, qui ne seront pas nécessairement comblés de la même manière, impliquant des bilans environnementaux différents.

I.7.2 Questions de Recherche

Les questions de recherche auxquelles tâchera de répondre ce travail de thèse découlent directement de ces deux hypothèses.

Tout d'abord, **quel est l'apport de la subdivision en besoins de mobilité à l'évaluation ?** Les études d'impacts environnementaux des déplacements urbains se basent sur des statistiques de comptage, qui dénombrent les véhicules passant sur un tronçon de route donné et leur associent un impact environnemental, par le biais de facteurs de caractérisation. C'est donc un travail réalisé à l'échelle du véhicule, sans regard sur les individus présents dans le véhicule ou encore les raisons de leur déplacement. Certains paramètres moyens seront donc utilisés. La subdivision de la mobilité en fonction des besoins peut avoir deux types d'apport. Au niveau global, elle oblige à spécifier et différencier certains paramètres et il sera intéressant d'observer si ces changements influencent le bilan environnemental global. Mais cette subdivision apporte également la possibilité de comparer entre eux les bilans environnementaux de chaque besoin de déplacement et, le cas échéant, de déterminer si certains besoins impliquent des bilans moindres et d'en étudier les raisons.

Ensuite, la notion de cycle de vie permettra d'évaluer précisément la part d'impact non calculé lorsque seules les émissions directes sont observées. La majorité des enquêtes actuellement disponibles se concentrent justement sur ces émissions directes (c'est par exemple le cas des cadastres des émissions) et le calcul de la part d'impact non prise en compte pourra permettre certaines préconisations. On se posera donc la question de **l'intérêt d'une vision élargie par rapport aux évaluations plus classiques de la mobilité urbaine ?**

Enfin, les parties précédentes ont montré l'importance de comprendre et d'intégrer dans l'étude les déterminants de la mobilité et des choix modaux. L'enjeu de la thèse étant bien d'évaluer la mobilité urbaine en France, il sera pertinent de comparer entre elles différentes classes de villes (définies par les déterminants de mobilité évoqués) et d'observer les différences potentielles au niveau de l'impact environnemental. Sera alors observé si **ces déterminants de mobilité ont une influence notable sur la mobilité à l'échelle urbaine en France ?**

II. Chapitre II : Méthodologie et cas d'application

Ce chapitre présente la méthodologie de calcul des impacts environnementaux développée. Il se décline en quatre grandes parties :

- Une description générale autour de la méthodologie de quantification des impacts retenue, l'analyse de cycle de vie (ACV). Elle pose les bases de l'ACV, avec une première description du système : Unité fonctionnelle, périmètres temporel et géographique, frontières du système ou encore indicateurs retenus ;
- Une description plus précise du système. Cette partie traite notamment des différentes données utilisées (données de mobilité et données environnementales) : leur provenance, le travail nécessaire pour obtenir un jeu de données adapté à la méthodologie et ce jeu de données finalement retenu ;
- Une partie décrivant les résultats obtenus sur un cas d'application : l'Agglomération de Saint-Etienne Métropole ;
- Une partie conclusive relevant les avantages et les limites de la méthodologie proposée, intrinsèquement et au regard de paramètres extérieurs (données disponibles dans la littérature). Cette partie pose également les conditions d'applicabilité de cette méthodologie à d'autres cas.

Ce travail de thèse vise à fournir une méthodologie et *a fortiori* des informations sur les impacts potentiels sur l'environnement, de la mobilité dans les grandes aires urbaines de France (celles de plus de 250 000 habitants) ; 39 aires urbaines sont concernées²⁶. Afin de développer la méthodologie en cohérence avec les données existantes, disponibles et exploitables dans la réalité, un cas d'application a été utilisé : l'Agglomération de Saint-Etienne Métropole. Les données relatives aux déplacements des individus et marchandises ont été obtenues auprès de différents acteurs et observateurs de la mobilité locale (collectivité, gestionnaire de transports, bureaux d'études, urbanistes). Il servira à tester la méthodologie, en donnant des premiers résultats, sur un cas particulier. Ces résultats seront comparés à d'autres études d'impacts environnementaux de la mobilité, présentes dans la littérature.

²⁶ La liste des aires urbaines, sélectionnées sur les données du zonage en aires urbaines de 2002, sont disponibles en annexe

II.1 Description générale

II.1.1 Choix d'un cas d'application

Développer la méthodologie à l'aide d'un cas d'application a pour but de s'assurer de sa cohérence avec les données existantes dans la littérature et avec les études déjà réalisées sur les impacts de la mobilité sur l'environnement. Le cas d'application retenu est l'Agglomération de Saint-Etienne Métropole. Plusieurs arguments ont contribué à retenir ce cas d'étude :

- Représentativité en population des grandes aires urbaines françaises : s'il n'est pas envisageable de définir le cas le plus représentatif de la mobilité des grandes aires urbaines françaises, il est tout de même important de ne pas sélectionner une aire urbaine *a priori* trop particulière. L'aire urbaine de Paris, regroupant plus de 12 000 000 habitants, est par exemple reconnue et étudiée comme un cas particulier au niveau de sa mobilité (Le Néchet & Aguilera 2011). En France, 39 aires urbaines comptent plus de 250 000 habitants²⁷. Au sein de ces dernières, Saint-Etienne apparaît en 17^{ème} position en termes de population, proche donc de la médiane ;
- Offre modale relativement large : l'Agglomération de Saint-Etienne Métropole présente l'avantage de proposer une offre modale relativement large. Au niveau des transports en commun urbains notamment, Saint-Etienne propose un réseau constitué de bus, tramways et trolleybus. De plus, le pôle urbain de Saint-Etienne dispose de liaisons régionales TER avec d'autres villes de l'Aire Urbaine. Cela permet de tester la méthodologie sur un cas relativement complet et complexe ;
- Politique volontariste en matière de mobilité urbaine : Saint-Etienne Métropole a récemment montré une volonté relativement forte en matière de mobilité urbaine, avec par exemple l'interdiction d'une partie du centre-ville à l'automobile ;
- Contacts établis avec la collectivité : en outre, l'équipe d'encadrement de la thèse bénéficie d'ores et déjà d'une bonne connaissance des acteurs de la mobilité à Saint-Etienne et une porte d'entrée privilégiée.

²⁷ Un nouveau zonage en aires urbaines (ZAU) est régulièrement proposé par l'INSEE. Les classements peuvent donc être amenés à évoluer. Par exemple, l'aire urbaine de Saint-Etienne qui comptait environ 375 000 habitants en dénombre aujourd'hui 500 000, du fait de l'inclusion d'un certain nombre de nouvelles communes dans le périmètre de l'aire urbaine. Ce zonage est défini à l'aide de critères géographiques (continuité du bâti notamment) et peut donc différer d'un découpage administratif. Par exemple, une aire urbaine peut se trouver à cheval sur deux régions. Pour déterminer les aires urbaines de plus de 250 000 habitants, le zonage en aires urbaines de 2002 a été utilisé, garantissant une homogénéité, et laissant espérer une plus grande cohérence avec les études de mobilité présentes dans la littérature, dont certaines sont antérieures à 2009, date du dernier ZAU. La liste des aires urbaines de plus de 250 000 habitants est disponible en annexe 3.

II.1.2 Unité fonctionnelle (UF)

La première étape d'une ACV est de définir l'UF autour de laquelle va se baser l'étude. Quelle(s) fonction(s) va (vont) être (s) rendue(s) par le système ? Tous les flux seront ensuite rapportés à cette unité fonctionnelle.

Ici, l'unité fonctionnelle retenue pour le système est :

« Permettre la mobilité des personnes et marchandises d'une aire urbaine de plus de 250 000 habitants les jours ouvrés²⁸ pendant une année ».

Cependant, l'une des hypothèses de travail est que, selon le motif du déplacement effectué, ce dernier peut être réalisé d'une manière différente. L'UF principale a donc été subdivisée en autant d'UF qu'il existe de besoins de déplacement. Ainsi, par exemple, pour les déplacements de personnes, 25 UF intermédiaires (du type « permettre les déplacements de personnes d'une aire urbaine de plus de 250 000 habitants vers les super/hypermarchés les jours ouvrés pendant une année ») peuvent être agrégées en 6 UF intermédiaires (du type « permettre les déplacements de personnes d'une aire urbaine de plus de 250 000 habitants pour les achats les jours ouvrés pendant une année »). Il sera alors possible d'étudier la fonction rendue par le système global (UF de référence), mais également toutes les fonctions intermédiaires rendues. Ainsi, pourront être obtenus des résultats d'ACV de la mobilité urbaine, mais également tous les résultats intermédiaires, tels que l'ACV des déplacements domicile-travail par exemple (Figure 12 : Subdivision de l'unité fonctionnelle globale en UF intermédiairesFigure 12).

Dans un premier temps, le cas d'application de l'agglomération de Saint-Etienne a été étudié, avec pour unité fonctionnelle :

UNITE FONCTIONNELLE POUR LE CAS D'APPLICATION

« Permettre la mobilité des personnes et marchandises de l'agglomération de Saint-Etienne Métropole les jours ouvrés pendant une année ».

²⁸ Du lundi au vendredi

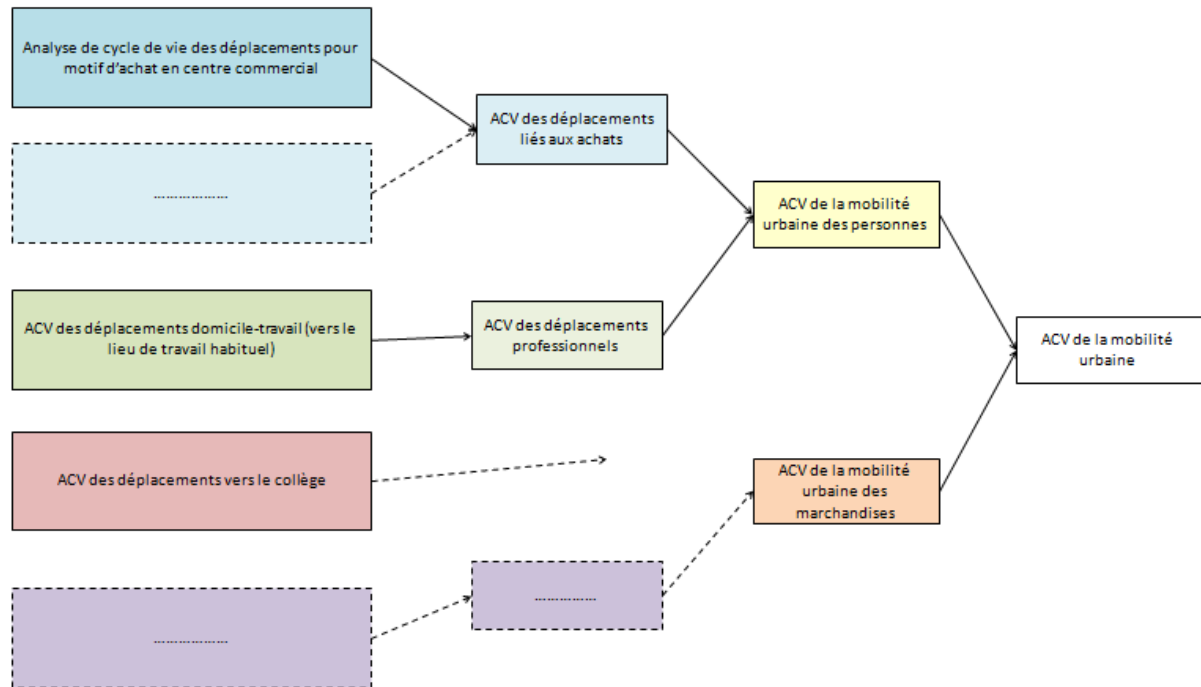


Figure 12 : Subdivision de l'unité fonctionnelle globale en UF intermédiaires

II.1.3 Système étudié

Le système étudié est constitué de l'ensemble des déplacements les jours ouvrés d'une aire urbaine française de plus de 250 000 habitants. Cette généralisation au cas français apparaîtra plus précisément dans le chapitre III. Ici, les informations seront données pour le cas général mais également pour le cas d'application de l'agglomération stéphanoise. Ce cas d'application a été utilisé pour développer la méthodologie (en permettant notamment de tester la disponibilité de données en situation réelle), la tester, et le cas échéant, la valider.

- Déplacements considérés : en premier lieu, il a été choisi d'étudier les déplacements ayant lieu les jours ouvrés. Cette décision est prise afin d'assurer la cohérence avec les études de mobilité des ménages en France (les EMD) qui observent justement ces déplacements. Sont considérés :
 - o Les déplacements de personnes : tous les déplacements d'individus les jours ouvrés, classés en 25 motifs de déplacement qui seront décrits dans la suite ;
 - o Les déplacements de marchandises : tous les déplacements de marchandises les jours ouvrés, classés en 17 motifs.
- Horizon temporel : les déplacements sont observés les jours ouvrés, pendant une année complète (cela permet de faire abstraction de possibles variations saisonnières). L'année

d'observation dépend directement de l'année de réalisation de la dernière EMD, source des données de déplacement ;

- Horizon géographique : le périmètre retenu est celui conseillé par les EMD relatives aux cas étudiés. Il n'existe pas de règle pour la définition de ce périmètre lors de la réalisation d'une EMD, mais des préconisations : *a minima*, celui-ci doit inclure le Périmètre des Transports Urbains (PTU), souvent, il se rapproche de celui de l'Aire Urbaine ;

Pour le cas de Saint-Etienne, le périmètre retenu est celui de l'Agglomération de Saint-Etienne Métropole, au moment de la réalisation de la dernière EMD (2009). Il correspond au PTU. L'Agglomération de Saint-Etienne Métropole est située dans le département de la Loire (42), en région Rhône-Alpes. Elle compte 43 communes²⁹ (Figure 13) et 374 500 habitants. La superficie totale du territoire est de 550 km² pour une densité de population d'environ 680 habitants au km² en moyenne.



Figure 13 : Territoire de Saint-Etienne Métropole (avec un pointeur : les deux communes rattachées à l'agglomération en 2013)
- (Office de tourisme de Saint-Etienne Métropole 2013)

²⁹ Depuis le 1^{er} Janvier 2013, elle en compte 45, avec le rattachement des communes d'Andrézieux-Bouthéon et La Fouillouse. La population est alors passée de 374 500 à 388 500 habitants. Ici, le périmètre étudié se restreint à 43 communes.

- Frontières du système : le système considère les étapes de cycle de vie suivantes :
 - Fabrication des différents modes de transport ;
 - Maintenance des différents modes de transport ;
 - Fin de vie des différents modes de transport ;
 - Construction des infrastructures de transport ;
 - Maintenance des infrastructures de transport ;
 - Fin de vie des infrastructures de transport ;
 - Utilisation des différents modes de transport : cette phase prend en compte les émissions lors du déplacement, mais aussi celles liées à la production et l'approvisionnement en énergie (carburant, électricité).

Ces étapes seront décrites plus précisément, pour chaque mode de transport considéré, dans la suite de ce chapitre. L'introduction de l'ACV se fait via l'utilisation d'une base de données environnementale, Ecoinvent version 2.2 pour les modes tenant compte de cette notion.

II.1.4 Indicateurs environnementaux considérés

Cette partie porte sur les indicateurs d'impact retenus. Le choix s'est tout d'abord porté sur la batterie d'indicateurs fournie par la méthode de caractérisation «IMPACT 2002+ » (Tableau 7). Parmi les méthodes de caractérisation se distinguent les méthodes orientées impacts (dites midpoint) et celles orientées dommages (dites endpoint). Certaines méthodes proposent à la fois des indicateurs midpoint et endpoint. Dans IMPACT 2002+, les résultats d'inventaire sont regroupés en 14 catégories d'impacts intermédiaires (Tableau 7). Dans une étape supplémentaire, qui n'est pas proposée dans le cadre de ce manuscrit, ils peuvent être regroupés dans quatre catégories de dommages visant : la qualité des écosystèmes, la santé humaine, le changement climatique et le poids exercé sur les ressources. Parmi les différentes méthodes de caractérisation, plusieurs raisons ont conduit au choix d'IMPACT 2002+ :

- Relative exhaustivité des indicateurs d'impact ;
- Possibilité offerte d'un calcul d'indicateurs de dommages (perspective pour la suite de ce travail) ;
- Arrivée prochaine de la méthode IMPACT World+, évolution d'IMPACT 2002+ offrant des possibilités de prise en compte de la différenciation spatiale ;
- Construction de la méthode sur le référentiel de l'Europe de l'Ouest adapté au cas d'étude (caractérisation des substances toxiques (Pennington et al. 2005), facteurs de normalisation (Jolliet et al. 2010), etc.).

Tableau 7 : Indicateurs midpoint de la méthode de caractérisation IMPACT 2002+

Impact potentiel	Unité
Réchauffement climatique	kg CO ₂ eq
Emission de substances cancérigènes	kg C ₂ H ₃ Cl eq
Emission de substances non-cancérigènes	kg C ₂ H ₃ Cl eq
Radiations ionisantes	Bq C-14 eq
Destruction de la couche d'ozone	kg CFC-11 eq
Substances organiques inhalées	kg C ₂ H ₄ eq
Substances inorganiques inhalées	kg PM _{2,5} eq
Ecotoxicité terrestre	kg TEG soil
Ecotoxicité aquatique	kg TEG water
Acidification/eutrophisation terrestres	kg SO ₂ eq
Occupation du territoire	m ² org.arable
Acidification aquatique	kg SO ₂ eq
Eutrophisation aquatique	kg PO ₄ ²⁻ eq
Consommation d'énergie non-renouvelable	MJ primaire
Consommation de ressources minérales	MJ surplus

II.1.5 Exigences relatives à la qualité des données

- Facteur temporel : les données doivent être représentatives de la situation actuelle. Pour le cas stéphanois, les données de déplacement proviennent de l'EMD de 2009. La base de données utilisée pour les données environnementales sur les modes de transport est Ecoinvent dans sa version 2.2, compilée en 2010. Elle a pu être modifiée (comme cela sera explicité dans la suite) en prenant soin de vérifier la cohérence temporelle des données de modification.
- Facteur géographique : la mobilité est étudiée à l'échelle d'une agglomération française. Pour le cas stéphanois, les données de déplacement sont des données locales. Pour les données environnementales, elles ont été adaptées si besoin à la situation géographique. En effet, la base de données d'origine, Ecoinvent 2.2, est suisse et basée, notamment pour les transports, sur des données suisses. Au-delà du cas français, les données doivent être adaptées, si besoin au cas étudié (Saint-Etienne par exemple pour le cas d'application).
- Facteur technologique : les données reflètent les technologies de transport actuelles. La méthodologie est basée sur les enquêtes de mobilité existantes et par conséquent, sur les technologies existantes. Les BDD ont donc parfois dues être modifiées afin de refléter la situation à Saint-Etienne.

II.2 Les données d'inventaire

Afin d'obtenir les impacts environnementaux de la mobilité urbaine au regard des indicateurs décrits dans le paragraphe 1, il est nécessaire de collecter les données utiles aux calculs. Cette étape d'inventaire doit être rigoureusement établie et suivie. Dans cette optique, une description de la démarche proposée est présentée (Figure 14). Plus précisément, les étapes pour la mobilité des personnes sont présentées, la méthodologie étant transposable pour la mobilité de marchandises (qui sera traitée plus tard).

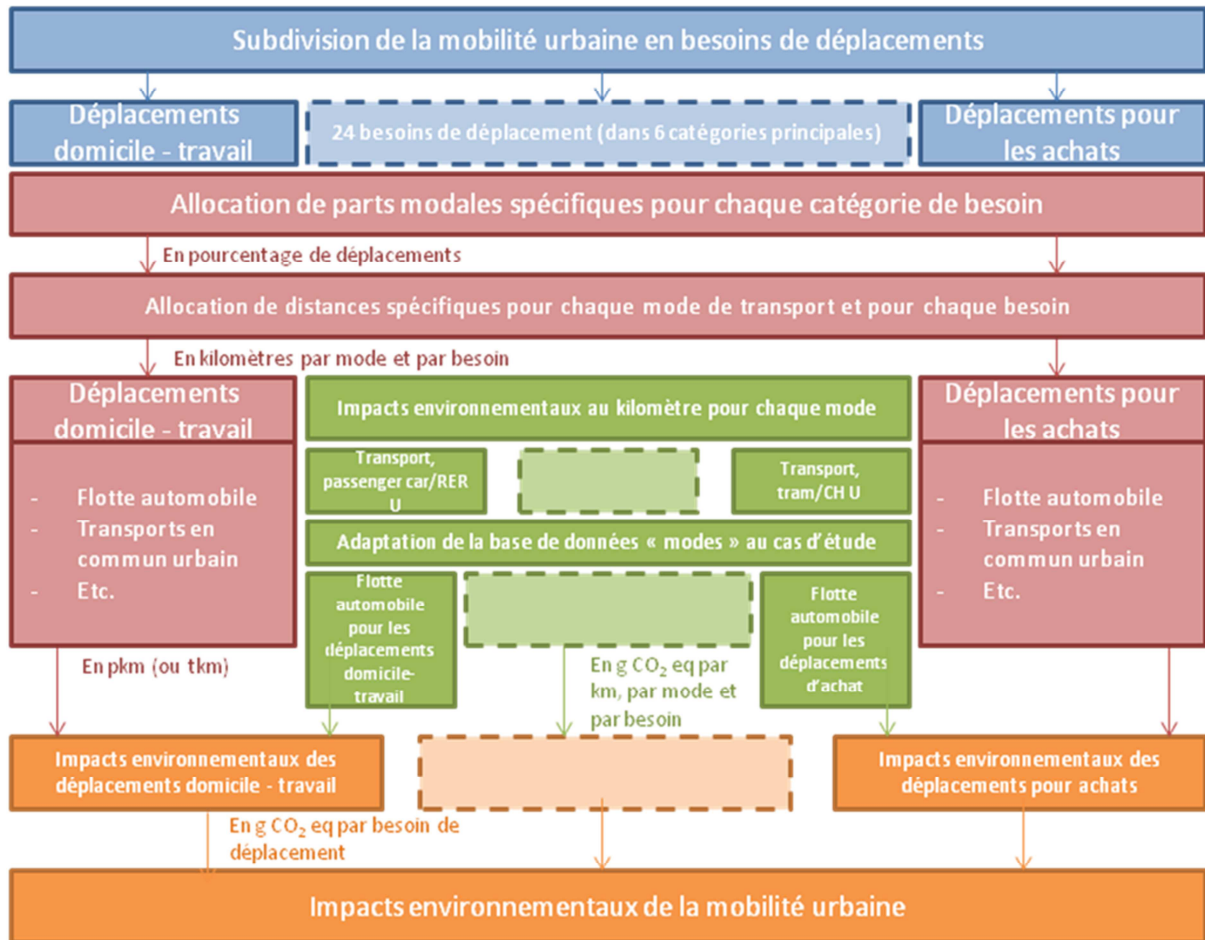


Figure 14 : Organisation générale de la méthodologie de quantification des impacts environnementaux de la mobilité des personnes (Le Féon et al. 2012).

« CH » signifie que la donnée correspond au référentiel suisse. « U » signifie « unit ». La notation « RER » est utilisée pour les données relatives au référentiel européen. Dans Ecoinvent, chaque inventaire est disponible sous deux formes : « S » comme « system », qui est une compilation de l'ensemble des flux de polluants appelés par le processus (après agrégation des différentes phases de cycle de vie) et « U », pour « unit », qui donne le détail des différentes phases. La forme « system » a pour but de réduire le temps de calcul.

Quatre grandes étapes, peuvent être identifiées :

- La première étape consiste à subdiviser la mobilité en différentes catégories de besoins de déplacements. Ces catégories sont déterminées en suivant la littérature, et notamment en gardant à l'esprit la cohérence entre le choix de nomenclature et la possibilité d'obtenir, en rapport à ce choix, des données de déplacement exploitables.
- La deuxième étape vise à renseigner les modalités de déplacement pour chacune des catégories de besoin identifiées. Cette étape se divise en trois sous-étapes réalisées en croisant les données de littérature, de terrain et des hypothèses de travail :
 - o Allouer à chaque catégorie de besoin une répartition modale spécifique (en nombre de déplacements) ;
 - o Allouer à chacun de ces modes, pour chacun des besoins, une distance moyenne (en kilomètres) ;
 - o Allouer à chacun des modes, pour chacun des besoins, des données d'utilisation spécifiques (ex : un taux d'occupation spécifique pour le véhicule particulier).
- La troisième partie consiste à croiser les données de déplacements à des données environnementales sur les modes. Sont alors utilisés les bilans élémentaires de modes de transports contenus dans les bases de données ACV, modifiés, complétés et adaptés au cas d'étude.
- La dernière partie est la partie de résultats pouvant se diviser en deux sous-parties :
 - o Des résultats peuvent être obtenus sur le système global « mobilité urbaine » et répondant à l'unité fonctionnelle globale « permettre les besoins de mobilité d'une aire urbaine de plus de 250 000 habitants les jours ouvrés pendant une année » ;
 - o Des résultats, discrétisés par besoin de déplacement, sont aussi obtenus. Pour chaque sous-unité fonctionnelle, des résultats sont obtenus, permettant une étude plus précise de chaque besoin de mobilité identifié, mais également une comparaison des bilans environnementaux des besoins de mobilité entre eux.

Données nécessaires

Nomenclatures de
besoins de
déplacements

Répartitions modales
par motif de
déplacement

Distances moyennes
par mode et par
motif

Données d'utilisation
(taux de remplissage,
consommations. etc.)

Base de données
environnementale

Chacune de ces étapes est détaillée dans la suite, notamment au travers d'un cas d'application.

II.2.1 Les données de déplacement

II.2.1.1 Les besoins de déplacements

Cette partie vise à répondre aux besoins exprimés dans la première étape de la méthodologie, décrite dans la partie précédente : subdiviser la mobilité urbaine en besoins de déplacements. Les études disponibles dans la littérature observent toujours séparément les mobilités de personnes et de marchandises. Dans de rares cas, le motif du déplacement pourrait être classé dans les deux catégories. C'est par exemple le cas des déplacements pour achats des individus (ils peuvent être considérés comme des déplacements d'individu pour le motif « achat » ou de marchandises : les achats). Mais, à l'échelle urbaine, le partage des modes entre personnes et marchandises est moins répandu qu'à une échelle plus grande où, par exemple, le transport maritime peut être utilisé pour ces deux usages simultanément. Il a donc été décidé ici, conformément aux données de littérature, de considérer dans deux parties distinctes la mobilité des personnes et celle des marchandises. La nomenclature retenue pour la mobilité des personnes sera tout d'abord évoquée, puis celle pour les déplacements de marchandises. Ces deux nomenclatures sont issues de littérature sur le sujet, en France, et choisies en cohérence avec les études de mobilité, productrices des données de déplacement utilisables dans la suite du travail.

II.2.1.1.1 La mobilité de personnes

Les Enquêtes Ménages Déplacements (EMD)

Apparues en 1973, les EMD ont pour objectif d'observer les pratiques de déplacements de la population, afin de fournir une aide à l'élaboration des politiques de transport. Réalisées à des intervalles différents sur une même agglomération, elles permettent également d'observer les effets de ces politiques. Chaque année, plusieurs agglomérations françaises font l'objet d'une EMD (voir carte en annexe 4), selon une méthodologie standardisée dont le cahier des charges est défini par le CERTU.

L'EMD s'intéresse à tous les déplacements des individus et donne ainsi une vision globale de la mobilité (contrairement à des études plus spécialisées : trafic automobile, fréquentation des TC, étude des déplacements pendulaires, etc.). Un échantillon représentatif de l'agglomération est tiré aléatoirement (sa taille étant choisie afin d'assurer la fiabilité des résultats). Toutes les personnes, âgées de 5 ans ou plus, habitant dans le logement sont interrogées. Tous les déplacements (tous modes confondus) réalisés la veille de l'enquête sont observés (du lundi au vendredi).

La standardisation de la méthode est une garantie supplémentaire de la fiabilité, mais permet surtout la comparabilité des enquêtes entre elles. L'annexe 4 présente une carte des EMD réalisées.

La mobilité de personnes en milieu urbain est très largement étudiée dans la littérature. Des enquêtes sont régulièrement effectuées par l'INSEE et les collectivités territoriales auprès des ménages pour connaître la mobilité des français, à l'échelle nationale (ENTD), des grandes aires urbaines (EMD) ou

encore des villes moyennes (EDVM). La périodicité est environ d'une dizaine d'années. Ces différentes enquêtes offrent un large éventail d'informations et de données relatives aux déplacements des ménages, classées selon différents critères (Catégories sociales professionnelles (CSP), zones de résidences dans la ville, occupation principale du répondant, etc.). Sont également renseignés les motifs de déplacement. A l'échelle des grandes aires urbaines, c'est donc l'Enquête Ménages Déplacements qui fait référence.

Les EMD proposent plusieurs classements des motifs de déplacements. Le plus classique est le motif à destination. Une catégorie peu représentative et informative apparaît alors : le motif « à destination du domicile » (Le Jeannic & Razafindranovona 2009). Ce motif regroupe le retour au domicile, venant du travail comme du magasin. Il est donc lié à des besoins différents mais leur attribue un motif identique et donc artificiel. Les EMD proposent également des données classées selon le motif à l'origine (la même limite apparaît pour le motif « à l'origine du domicile » très représenté). Enfin, il est possible de décrire les déplacements par les motifs au départ et à l'arrivée (par exemple, un déplacement domicile-travail, ou études-achats). La limite relevée de cette dernière solution est le nombre élevé de combinaisons et donc de catégories possibles. La première solution a été retenue, étant la manière dont sont traditionnellement communiqués les résultats des EMD au public.

A l'échelle des grandes aires urbaines, sélectionnée comme périmètre de ce travail, les déplacements sont classés en 6 grandes catégories de motifs, et 25 sous-catégories (Figure 15).

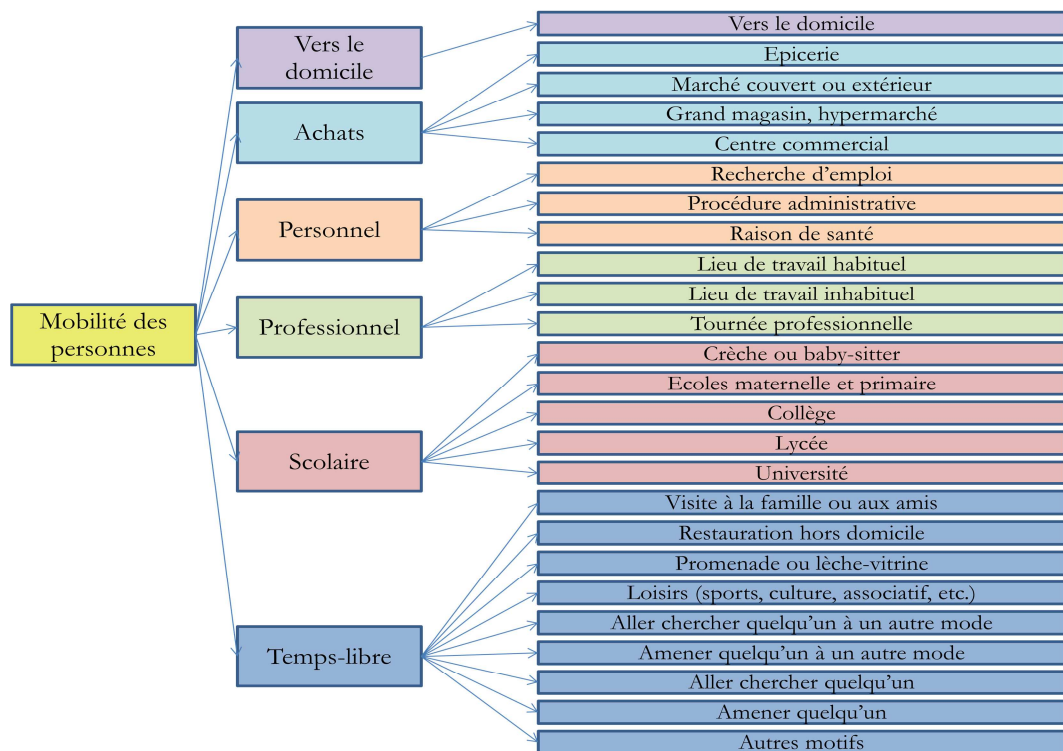


Figure 15 : Nomenclature des motifs de déplacement EMD d'après (Certu 2009)

II.2.1.1.2 La mobilité de marchandises

Historiquement, la mobilité des marchandises et ses enjeux ont été moins largement étudiés que celle des personnes et dans des cadres moins standardisés. A l'instar des EMD, l'enquête Transport de Marchandises en Ville (TMV) est apparue dans les années 1990 (Routhier 2002), sous l'impulsion du CERTU³⁰ et du LET³¹. Elle vise à :

- Apporter une description précise des différents mouvements de véhicules de transport de marchandises en milieu urbain ;
- Dégager des lois entre les activités génératrices de besoins de transport et les flux de véhicules ;
- Mesurer la participation des véhicules utilitaires à l'occupation de la voirie, à la congestion, à la pollution locale et aux émissions de GES ;
- Fournir un outil d'aide à la décision aux décideurs (aménagement, réglementation, planification).

Actuellement, ces enquêtes ne bénéficient pas d'un recul suffisant pour être exploitées à hauteur des EMD. Appliquées dans un premier temps à trois villes (Marseille, Bordeaux et Dijon), elles font l'objet d'une nouvelle vague depuis 2012 dont les résultats ne sont pas encore publiés. Malgré cela, l'enquête TMV propose la nomenclature de besoins de déplacements de marchandises la plus cohérente et utilisable. Les « mouvements » de marchandises sont observés, c'est-à-dire les livraisons et/ou enlèvement de marchandises par un véhicule. Les premières enquêtes TMV ont permis de construire un modèle pour l'aide à la décision en matière de logistique urbaine (FRETURB) et d'obtenir les premières informations sur le transport de marchandises en ville (Routhier 2002).

Outre une méthodologie standardisée ; l'enquête TMV permet de classer les déplacements selon le motif. Trois catégories principales sont identifiées (Figure 16) :

- Les échanges entre l'ensemble des établissements économiques. Ils représentent entre 35 et 40% des kilomètres UVP (unité de véhicule particulier) du total. Ce sont :
 - o les flux de marchandises entre industriels et distributeurs (commerce de gros et de détail) ;
 - o les approvisionnements des artisans, services, bureaux ou administrations ;
 - o les transports de pondéreux en vrac (par exemple la farine, le carburant ou des matériaux de remblai) ;
 - o les transports de produits manufacturés vers les commerces ;
 - o les échanges de messagerie express.
- Les enlèvements de marchandises générés par les achats : ce sont principalement les approvisionnements des ménages par leurs propres moyens. Ces déplacements, majoritairement réalisés en véhicule particulier, constituent la catégorie « achats » de la partie « mobilité de

³⁰ Centre d'Etudes sur les Réseaux, les Transports, l'Urbanisme et les constructions publiques

³¹ Laboratoire d'Economie des Transports

personnes » et il faudra donc éviter tout double-comptage. Ils représentent 50 à 55% du total de la mobilité de marchandises en termes de km UVP (si les chiffres en termes de tkm ne sont pas donnés, il est tout de même fortement probable que cela représente une part sensiblement moins importante des tkm, du fait que les achats sont principalement réalisés en automobile, quand le reste des marchandises est transporté par des modes permettant des volumes (et tonnages) plus importants) ;

- Les autres flux (qui représentent entre 10 et 15% du total) :
 - approvisionnements des chantiers (voirie, bâtiment), remblai ou déblai de gros œuvre ;
 - déménagements des particuliers et des entreprises ;
 - entretien et/ou développement des réseaux urbains (gaz, électricité, eau, assainissement) ;
 - approvisionnement des services municipaux par les magasins généraux ;
 - collecte et acheminement des déchets ménagers et industriels ;
 - livraisons à domicile ;
 - services postaux (hormis la distribution).

Sont exclus les déplacements liés à des courriers de plis et au transport d'effets personnels ou professionnels comme l'outillage ainsi que les déplacements professionnels pour réparation ou maintenance technique lorsqu'il n'est pas objet de transport de matériel ou de pièces installées sur place.

De manière analogue aux déplacements de personnes, la Figure 16 représente la nomenclature utilisée pour les déplacements de marchandises. Pour rappel, la catégorie « achats » est représentée ici, mais ses impacts ne seront pas comptabilisés (car déjà prise en compte dans les déplacements des personnes). Contrairement aux déplacements de personnes, il ne s'agit pas ici du motif à destination. La nomenclature est basée sur l'activité déclarée par l'entreprise responsable du mouvement (qui peut être une réception ou une expédition) et recensée dans le répertoire SIRENE.

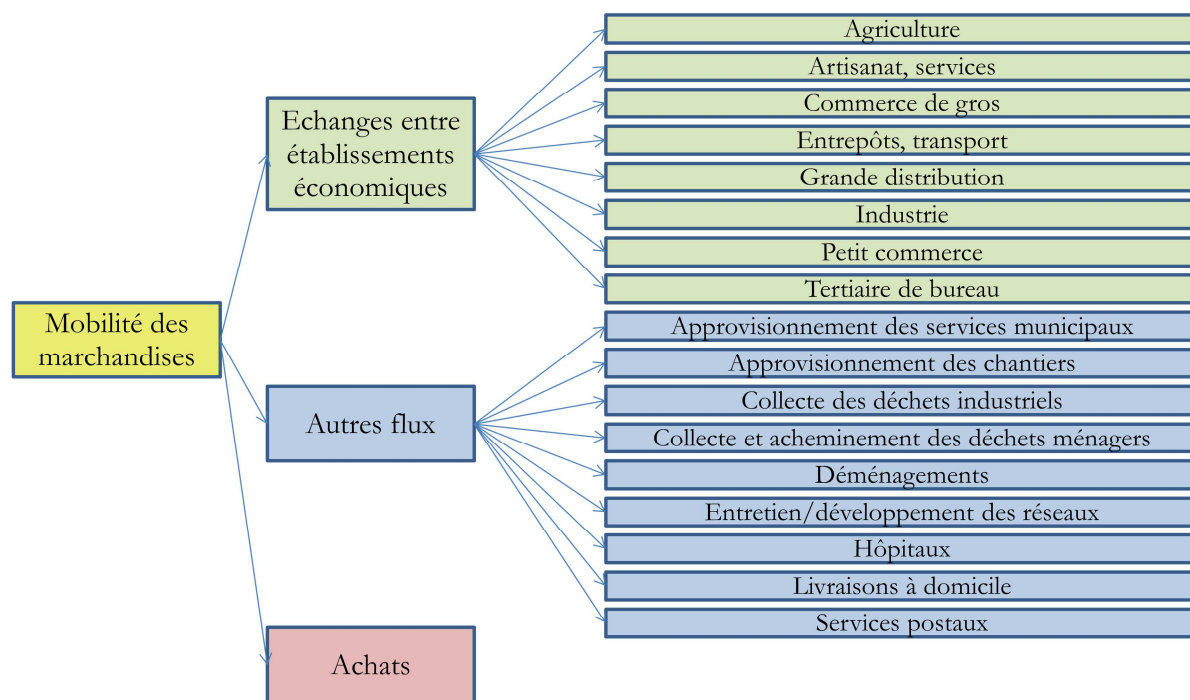


Figure 16 : Nomenclature des motifs de déplacement de marchandises TMV (Chiron-Augereau 2009)

II.2.1.2 Les données de déplacements

La première étape de la méthodologie a donc permis de mettre en place des nomenclatures de déplacement, pour les personnes, comme pour les marchandises. La deuxième a pour but de compléter celles-ci de données de déplacements. À terme, pour chaque motif, la distance effectuée annuellement avec chaque mode de transport est recherchée. Cette partie présentera donc en parallèle, les données requises dans le cas général d'une part et la manière dont le jeu de données a été construit dans le cas stéphanois d'autre part.

II.2.1.2.1 Mobilité des personnes

Une brève présentation de l'EMD de Saint-Etienne est proposée comme mise en contexte.

La dernière EMD réalisée sur le territoire de l'agglomération de Saint-Etienne a été effectuée en suivant la méthodologie standard CERTU (Certu 2009). Les enquêtes ont été réalisées par ALYCE-SOFRECO. Une première exploitation des données, dite exploitation standard a été menée par la TNS-SOFRES afin d'être incluse dans les bases de données nationales sur les EMD. Enfin, le cabinet d'urbanisme Epures, maître d'œuvre de l'enquête, a publié certaines exploitations publiques des résultats (Epures 2010). Le respect de la méthodologie standard CERTU a été contrôlé par le CETE Lyon.

En 2009, l'EMD a été réalisée à un périmètre élargi, avec 161 communes enquêtées (Saint-Etienne Métropole, le Pays de Saint-Galmier, Loire-Forez, le syndicat mixte Jeune Loire). Auparavant, deux

EMD avaient été réalisées, sur des périmètres plus restreints, en 1992 (41 communes) et en 2001 (83 communes). Le territoire enquêté est divisé en 52 secteurs pour garantir une bonne représentativité géographique de la population. Cependant, les résultats ont également été présentés à l'échelle de Saint-Etienne Métropole (périmètre des EMD précédentes et périmètre des transports urbains (PTU)). Le périmètre conservé dans cette thèse sera celui du PTU, donc de l'Agglomération de Saint-Etienne Métropole.

En 15 jours, 4 700 ménages ont été enquêtés, formant un échantillon représentatif de la population (ils sont tirés au sort dans les fichiers recensant les habitations et, pour les étudiants, dans les fichiers CROUS). Tous les membres du ménage, âgés de 5 ans et plus, sont interrogés individuellement, en face-à-face, à leur domicile. Des informations leur sont demandées sur leurs déplacements de la veille, pour les jours ouvrés (durée, motif, mode, etc.). La population de Saint-Etienne Métropole effectue chaque jour ouvré en moyenne 1 246 000 déplacements pour une distance moyenne journalière de 15 kilomètres par habitant et une durée quotidienne moyenne de déplacements de 65 minutes (Epures 2010).

En premier lieu, il convient de collecter les répartitions modales pour chacun des motifs de la nomenclature. Ces données sont disponibles dans l'exploitation de l'EMD, en termes de nombres de déplacements par mode et par motif. Les deux points suivants donnent une vision des motifs (respectivement modes) de déplacements, indépendamment des modes (motifs).

II.2.1.2.1.1 Les motifs de déplacement

L'ensemble des déplacements est réparti en 25 motifs de déplacement (Figure 17). Pour rappel, les motifs sont donnés « à destination »³².

En dehors du retour à domicile, les stéphanois se déplacent majoritairement à destination de leur lieu de travail habituel (9,6%) mais aussi non habituel (3,5%). Les visites à la famille ou aux amis occupent 5,5% des déplacements et l'accompagnement ou la reprise d'une tierce personne plus de 10%. Enfin, la catégorie promenade ou lèche-vitrine concerne 7,6% des déplacements.

³² Un déplacement domicile-travail est compté dans la catégorie « travail sur le lieu d'emploi déclaré » (ou parfois sur un autre lieu). Tout nouveau lieu d'arrivée implique un nouveau motif. Pour une personne déposant un enfant à l'école sur le chemin du travail, deux déplacements seront donc comptés : l'un vers l'école, le second vers le travail.



Figure 17 : Motifs des déplacements les jours ouvrés pour l'Agglomération de Saint-Etienne Métropole (en pourcentage de nombre de déplacements) (Sources : fichiers de données EMD 2009)

II.2.1.2.1.2 Les modes de déplacement

Les stéphanois se déplacent majoritairement en voiture (Figure 18)³³. Plus de 65% des déplacements sont ainsi réalisés en automobile, soit en tant que conducteur (environ 50%), soit en tant que passager (environ 15%). A l'image du parc automobile français, la flotte stéphanoise est majoritairement composée de motorisations diesels (environ 60% contre 40% d'essences (Epures 2010)).

La marche à pied est privilégiée pour un quart des déplacements environ. Le reste des trajets est effectué essentiellement en transports en communs urbains (bus, trolleybus ou tramway) ou non urbains (cars interurbains, autocars scolaires ou train régional). D'autres modes de transport sont utilisés pour une part marginale des déplacements, parmi lesquels le vélo ou les deux-roues motorisés (Epures 2010).

³³ A noter que la répartition des déplacements est faite sur la base du nombre de déplacements. Les déplacements en voiture étant en moyenne plus longs, la part modale en distance est plus importante encore (autour de 80%).

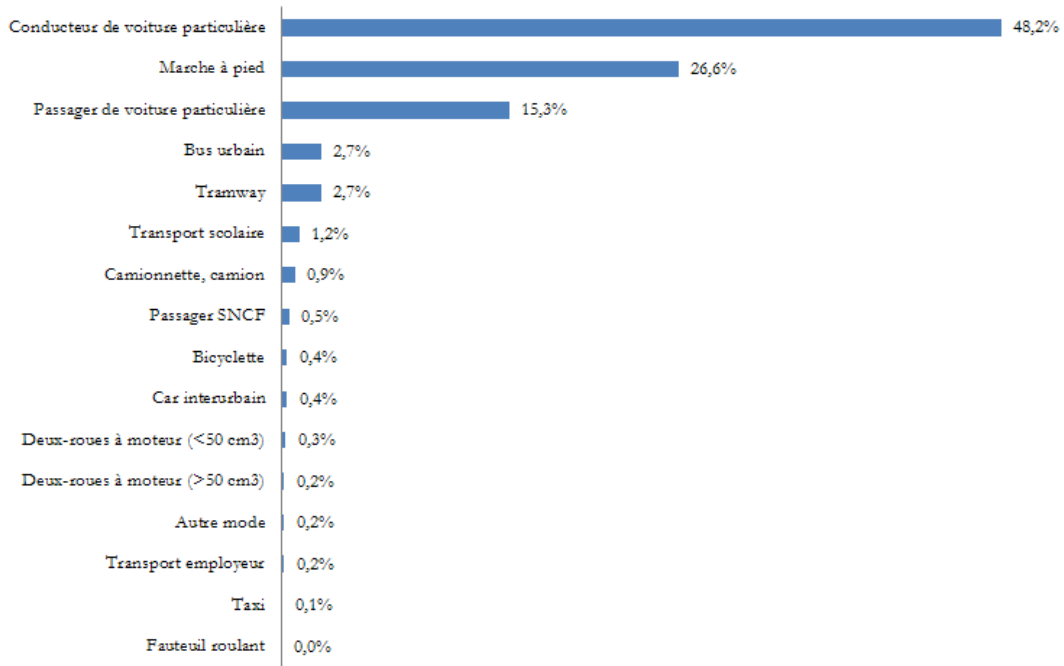


Figure 18 : Répartition modale des déplacements les jours ouvrés pour l'Agglomération de Saint-Etienne Métropole (en nombre de déplacements) (Sources : fichiers de données EMD 2009)

II.2.1.2.1.3 Construction du jeu de données

Si l'EMD permet de collecter le nombre de déplacements réalisés par mode et par motif, les distances de déplacement sont plus difficiles à obtenir. La partie suivante vise à attribuer à chaque déplacement une distance représentative (en fonction du motif et du mode de transport utilisé). La distance moyenne effectuée par chaque mode est en effet différente (plus courte en moyenne pour la marche à pied par exemple) et il est donc primordial de disposer d'une répartition modale selon les distances parcourues pour réaliser l'évaluation. Le but est d'établir une matrice des distances moyennes effectuées par mode et par motif. Cette matrice, croisée aux nombres de déplacements évoqués dans la partie précédente, permettra d'obtenir une distance annuelle totale par mode et par motif. Plusieurs documents ont été utilisés, en gardant pour objectif de constamment se rapporter aux données disponibles (mais partielles) pour le cas stéphanois.

II.2.1.2.1.3.1 Distances moyennes par motif (indépendamment du mode)

Tout d'abord, des distances moyennes de déplacement pour chacun des motifs identifiés ont été calculés pour le cas de l'EMD de Lille en 1998 (Gascon et al. 2005), disponibles en première colonne du Tableau 9. Bien que ces données soient anciennes, elles ont le mérite de présenter un jeu complet (tous motifs) de données, qui permet, dans un premier temps, de créer une hiérarchie entre les motifs. Cette première approche permet d'obtenir un jeu de données moyennes pour chaque motif, mais tous modes confondus.

Ces données doivent être ajustées au cas de Saint-Etienne. Pour cela, le premier ajustement consiste à adapter toutes les distances à la distance moyenne tous modes et tous motifs recensée dans l'EMD. Chaque stéphanois parcourt en moyenne 15 kilomètres par jour, en 3,38 déplacements (Epures 2010), ce qui représente une distance moyenne de 4,440 kilomètres par déplacement (contre 4,012 kilomètres pour la grille de déplacements lilloise). Pour chaque motif, la distance moyenne va être multipliée par $r = 4,440/4,012 = 1,107$. Une grille des distances moyennes par motif, tous modes confondus est ainsi obtenue (correctif 1 du Tableau 9).

Ensuite, les données de l'EMD fournissent les distances moyennes pour certains motifs de déplacement (ou groupes de motifs) (Tableau 8). L'EMD de 2010 a été réalisée pour deux périmètres distincts (périmètre de l'EMD de 2001 (correspondant à celui de l'agglomération) et périmètre élargi à 161 communes). Travaillant à l'échelle de l'agglomération (correspondant ici à l'échelle du PTU), certaines données doivent être retravaillées, adaptées, corrigées. Ainsi, les distances moyennes par motif sont données pour le périmètre élargi, et doivent donc être ajustées. L'ensemble des données a été ajusté par rapport à la moyenne (Tableau 8), en utilisant pour facteur de conversion $r = (\text{Distance Base au périmètre élargi})/(\text{Distance Base au périmètre de l'agglomération}) = 5,21/4,44 = 1,17$.

Tableau 8 : Distance moyenne par motif (ou groupe de motifs), tous modes confondus

	Distance périmètre élargi	Distance périmètre de l'agglomération
Base	5,21	4,44
Travail habituel	8,57	7,30
Ecole	3,75	3,20
Université	7,73	6,59
Achats	3,99	3,40
Accompagnement	3,59	3,06
Visites	5,79	4,93
Autres	5,38	4,58
Secondaires	5,12	4,36

Le Tableau 8 fournit donc des critères supplémentaires pour différentes catégories de motifs. A titre d'exemple, un déplacement vers le lieu de travail habituel est calculé jusqu'alors à 7,17 kilomètres (après le correctif 1) contre une distance réelle de 7,3 kilomètres (donnée par l'EMD dans le Tableau 9). L'étape suivante consiste donc à prendre en compte cette nouvelle information.

Trois cas de figure se présentent alors :

- Si le motif est un motif seul (type travail habituel ou visites), la distance réelle de l'EMD est prise pour référence. C'est par exemple le cas pour le déplacement domicile-travail ;
- Si c'est un groupe de motifs (type scolaire ou achats), l'ajustement s'effectue sur la moyenne des distances des différents motifs du groupe, pondérée par le nombre de déplacements. Par exemple, la moyenne des distances des déplacements pour école (maternelle, primaire, collège et lycée) est de 2,77 kilomètres. Elle est indiquée dans l'EMD à 3,20 kilomètres. Les distances pour les motifs scolaires seront donc ajustées de $r = 3,2/2,77 = 1,155$;
- Finalement, le reste des distances (celles dont aucune précision n'est donnée par l'EMD) est ajusté de manière à conserver juste la distance moyenne totale de 4,44 kilomètres par déplacement.

Les résultats obtenus, à chaque phase d'ajustement sont présentés dans le Tableau 9.

Une distance moyenne par motif de déplacement est donc obtenue. Il reste maintenant à calculer, à partir de ces données, une distance moyenne par mode, pour chaque motif.

II.2.1.2.1.3.2 Distances moyennes par motif et par mode

Une nouvelle fois, différents cas de figure apparaissent :

- Pour certains motifs (ou groupes de motifs), l'EMD donne une distance moyenne par mode (ou groupe de modes). Pour ces catégories, la donnée moyenne calculée précédemment est répartie identiquement entre les modes ;
- Pour les autres motifs, la répartition moyenne est utilisée et ajustée, de la même manière à la donnée calculée précédemment.

La distance moyenne par motif et par mode est alors obtenue. Plus précisément, une distance moyenne par motif est obtenue pour quelques catégories de modes. Il ne reste alors plus qu'à subdiviser chaque catégorie de mode en sous-catégorie et d'attribuer la distance correspondante. Une matrice des distances quotidiennes réalisées est obtenue. L'EMD ne recensant que les déplacements en semaine (du lundi au vendredi), cette matrice est multipliée par $R = 365 * (5/7) = 270,7$ afin d'obtenir la matrice des distances de déplacements annuelles par mode et par motif. Afin de ne pas alourdir le texte, la matrice des résultats est présentée en annexe 5.

Tableau 9 : Distances moyennes ajustées par motif de déplacement, tous modes confondus

Distances de déplacement, tous modes, issues de "calcul a posteriori des distances dans les EMD"	EMD	Correctif	Correctif
	Lille 1998 (Gascon et al. 2005)	134 (moyenne base EMD)	235 (valeurs fixes EMD)
BASE	4,01	4,44	4,44
A DESTINATION DU DOMICILE	4,01	4,44	4,46
TRAVAIL SUR LE LIEU D'EMPLOI DECLARE	6,48	7,17	7,30
TOURNEE PROFESSIONNELLE	8,21	9,08	9,12
TRAVAIL SUR UN AUTRE LIEU	6,47	7,16	7,19
NOURRICE, CRECHE, GARDE D'ENFANTS	2,38	2,63	2,64
ECOLE MATERNELLE OU PRIMAIRE	1,52	1,68	1,94
COLLEGE	2,50	2,77	3,20
LYCEE	5,27	5,83	6,73
UNIVERSITE OU GRANDE ECOLE	6,71	7,42	6,59
MULTI-MOTIFS EN CENTRE COMMERCIAL	4,82	5,34	5,13
ACHATS EN GRAND MAGASIN, SUPERMARCHE ET HYPERMARCHE	5,04	5,58	5,37
ACHATS EN PETIT ET MOYEN COMMERCE	2,27	2,51	2,41
ACHATS EN MARCHE COUVERT OU DE PLEIN VENT	3,16	3,50	3,36
SANTE	3,79	4,19	4,21
DEMARCHES ADMINISTRATIVES	3,58	3,97	3,98
RECHERCHE D'UN EMPLOI	4,22	4,67	4,69
LOISIRS, ACTIVITE SPORTIVE, CULTURELLE OU ASSOCIATIVE	3,71	4,11	4,13
PROMENADE, LECHE VITRINE, LECONS CONDUITE	2,10	2,32	2,33
RESTAURATION HORS DU DOMICILE	2,69	2,97	2,99
VISITE A DES PARENTS OU AMIS	3,91	4,32	4,93
ACCOMPAGNER QUELQU'UN	3,45	3,82	3,06
ALLER CHERCHER QUELQU'UN	2,99	3,31	3,32
DEPOSE D'UNE PERSONNE A UN MODE DE TRANSPORT	4,74	5,24	5,27
REPRISE D'UNE PERSONNE A UN MODE DE TRANSPORT	5,42	5,99	6,02
AUTRES MOTIFS	3,47	3,84	4,58

³⁴ Correctif 1 : corrige le vecteur des distances par motif (Gascon et al.) d'un facteur $r = (\text{distance de base pour l'EMD de Saint-Etienne}) / (\text{distance de base pour l'EMD de Lille})$

³⁵ Correctif 2 : corrige le vecteur des distances par l'ajuste au vecteur (réduit) des distances de l'EMD de Saint-Etienne, à périmètre réduit (détails dans le texte)

II.2.1.2.2 Mobilité des marchandises

Il n'existe pas à ce jour de données sur la mobilité de marchandises équivalentes à celles sur la mobilité de personnes en France. Les enquêtes « Transport de Marchandises en Ville » (TMV) visent à collecter ce type de données et à mieux comprendre la mobilité de marchandises en ville. Elles regroupent les analyses de différents documents et permettent de mieux appréhender cette mobilité urbaine et de construire un jeu de données pour le cas d'étude de Saint-Etienne.

Les enquêtes TMV regroupent l'ensemble des mouvements motivés par un déplacement de biens ou de matériaux en trois catégories (Albergel et al. 2006; Chiron-Augereau 2009) :

- les échanges entre l'ensemble des établissements économiques ;
- les enlèvements de marchandises générés par les achats : cette partie représente les mêmes déplacements que la catégorie « achats » des déplacements de personnes. Pour éviter un double-comptage, elle n'est donc pas abordée ici ;
- les autres flux.

II.2.1.2.2.1 *Les échanges entre les établissements économiques du secteur privé à Saint-Etienne Métropole*

Dans le cas de Saint-Etienne, ces flux ont été répertoriés dans le cadre du projet ECLUSE (Etude des Changements de Logistique Urbaine de Saint-Etienne). Ce projet, porté notamment par l'Ecole des Mines de Saint-Etienne, vise à alimenter la réflexion des décideurs en matière de logistique urbaine en analysant des données de terrain et les jeux d'acteurs, avec un regard centré sur des objectifs de logistique durable.

Le modèle Freturb, outil de diagnostic du transport de marchandises en ville développé par le LET, a été utilisé. Cet outil permet notamment de répertorier les mouvements effectués par établissements (livraisons et enlèvements de marchandises). Cependant, Freturb fournit uniquement des nombres de mouvements sans précision sur les distances des déplacements, ni les tonnages déplacés. Cette partie explicitera donc la manière utilisée pour estimer des données en tonne.kilomètre³⁶, unité de référence retenue.

Les données ont été collectées sur le même périmètre que celui décrit pour la mobilité des personnes, soit les 43 communes de Saint-Etienne Métropole. L'agglomération stéphanoise est divisée pour l'étude en 10 zones. Sur ces 10 zones, 81 802 mouvements par semaine sont répertoriés. La distance journalière totale parcourue est de 7 226 413 kilomètres. Cette distance comprend également les déplacements de personnes estimés à 1 246 000 par jour, pour une distance moyenne de 4,44 km (soient 5 532 240 km par jour). La distance journalière parcourue pour la mobilité de marchandises est donc de 1 694 173 km.

Les mouvements hebdomadaires sont tout d'abord répartis suivant la catégorie de marchandise qu'ils concernent (Figure 19). Pour chaque catégorie, la distance moyenne est alors considérée comme

³⁶ Une tonne.kilomètre représente le déplacement d'une tonne sur un kilomètre.

identique. Cela permet d'obtenir une distance moyenne effectuée, par type de marchandises et par semaine, donc par année.

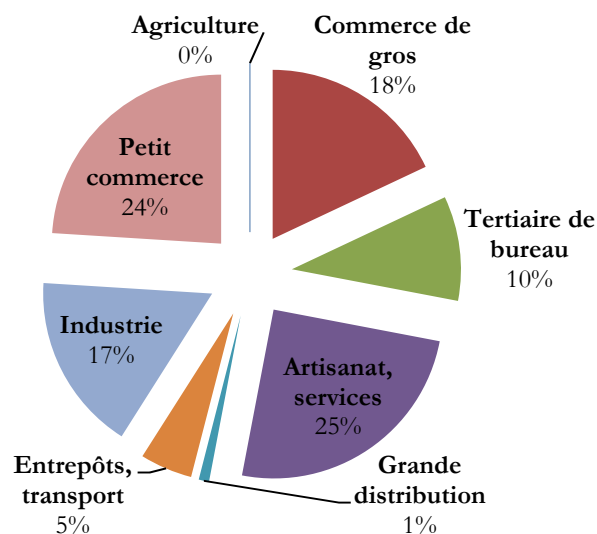


Figure 19 : Répartition kilométrique des déplacements par type de marchandise

Ces kilomètres peuvent ensuite être répartis par zone de l'étude. Puis, pour chaque zone, une première répartition modale est proposée, selon trois grandes catégories de modes : les véhicules de PTAC³⁷ inférieur à 3,5 tonnes, les porteurs et les articulés. Il est alors possible d'obtenir un nombre de kilomètres parcouru annuellement par mode de transport. Ces trois grandes catégories de modes peuvent ensuite être subdivisées, à l'aide de données de littérature (Albergel et al. 2006), en catégories de PTAC (Tableau 10) :

Tableau 10 : Répartition des déplacements par catégorie de PTAC (Albergel et al. 2006)

Camions	Part des déplacements
porteurs	
<7t	12%
de 7 à 16 t	55%
de 16 à 32 t	32%
> 32t	1%
Articulés	
de 16 à 32 t	26%
> 32t	74%

³⁷ Le Poids Total Autorisé en Charge (PTAC) est la masse maximale autorisée pour un véhicule routier (comprenant la charge maximale de marchandises et le poids maximal du chauffeur et des passagers)

Une répartition kilométrique des déplacements par mode est finalement obtenue (Figure 20). En l'absence de données supplémentaires, il a été considéré pour la suite que la répartition modale est la même pour les différents types de marchandises de cette catégorie.

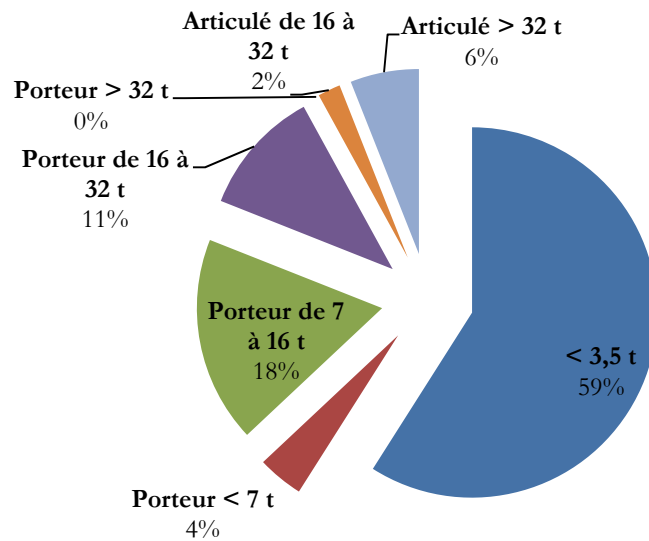


Figure 20 : Répartition kilométrique des déplacements de marchandises à Saint-Etienne Métropole

II.2.1.2.2.2 Les autres flux de marchandises à SEM

Le projet Ecluse répertorie uniquement les déplacements de la catégorie « échanges entre les établissements économiques du secteur privé ». Les autres flux ont donc été estimés à partir de données de littérature. Le détail est donné ici pour chaque sous-catégorie.

II.2.1.2.2.2.1 Chantiers du bâtiment et de travaux publics

La littérature donne des ratios du nombre de bennes circulant par semaine, pour 100 000 habitants dans une agglomération (Albergel et al. 2006). Ces ratios permettent d'obtenir une estimation des flux générés par les chantiers du bâtiment et de travaux publics dans l'agglomération de Saint-Etienne en une année.

II.2.1.2.2.2.2 Déménagements

A nouveau, des données de littérature sont utilisées pour estimer les flux liés aux déménagements dans l'agglomération (Albergel et al. 2006). Environ 10% des ménages déménagent chaque année. 16% des particuliers font appel à des professionnels utilisant des camions porteurs. Les autres utilisent des véhicules de moins de 3,5 tonnes et effectuent entre 2 et 3 voyages par déménagement. 38% de ces déménagements se font dans la même commune, 29% à moins de 20 kilomètres. Les flux étant faibles pour cette catégorie, des approximations grossières sont acceptables.

II.2.1.2.2.3 Déchets industriels

Un ratio de nombre de bennes par semaine pour 100 000 habitants est utilisé (Albergel et al. 2006). Une distance moyenne au centre de tri de 10 kilomètres est supposée, ainsi qu'un taux de remplissage de la benne de 15 tonnes.

II.2.1.2.2.4 Déchets ménagers et assimilés

Les données sur les déchets ménagers ont été obtenues grâce à une enquête de terrain réalisée auprès des services concernés à Saint-Etienne Métropole. Une partie de ces déchets est traitée en régie, par SEM, le reste est traité par la SITA et la COVED. Le rapport annuel a aussi été fourni afin d'affiner les données. Des informations ont été obtenues sur le kilométrage total réalisé par chacune de ces entités, ainsi que sur les flottes de bennes disponibles. L'ensemble de ces données permet d'obtenir, pour chaque type de bennes, la part des tonnes.kilomètre effectué (Figure 21).

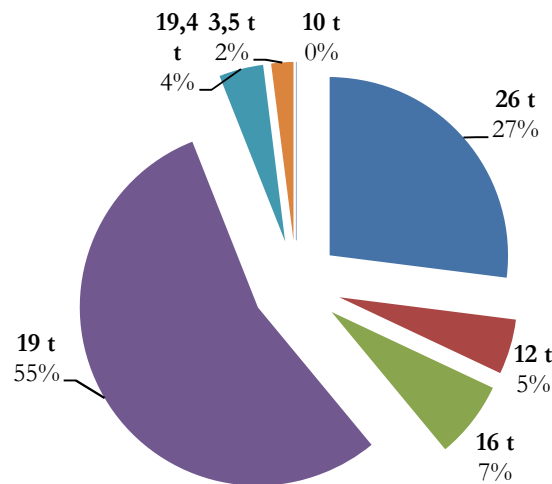


Figure 21 : Répartition par type de benne de la collecte quotidienne des déchets ménagers et assimilés pour Saint-Etienne Métropole

II.2.1.2.2.5 Services postaux

Un ratio est effectué à partir de données calculées sur l'agglomération bordelaise (Albergel et al. 2006). Ces données sont réparties sur différents modes de déplacement allant du véhicule particulier au camion semi-remorque.

II.2.1.2.2.6 Conclusion sur les données de déplacement

Cette partie sur le recueil de données de mobilité de marchandises montre la difficulté d'obtenir un jeu complet et homogène. Notamment, la différence avec les données sur la mobilité de personnes est nette. Pour cette dernière, les Enquêtes Ménages Déplacements constituent une base de travail conséquente, mais surtout suivant une méthodologie standardisée, offrant la comparabilité entre les aires urbaines étudiées et garantissant également une méthode éprouvée sur de nombreux cas depuis quelques décennies. La mobilité des marchandises est essentiellement étudiée au travers de la logistique urbaine. Le but de celle-ci est davantage d'optimiser les trajets que de dresser un inventaire de ceux-ci à des fins d'évaluation environnementale. Les données récoltées ont donc pour but premier de localiser les lieux d'expéditions et de livraisons privilégiés dans la ville, afin de pouvoir définir des trajets préférentiels. Il n'existe donc pas, aujourd'hui, d'analyse fine des trajets existant, standardisée, permettant, comme pour la mobilité de personnes, de dresser un inventaire des déplacements selon les modes et les types de marchandises transportés. Le programme Transport de Marchandises en Ville (TMV) laisse augurer, si ce n'est une méthodologie comparable aux EMD, au moins une méthodologie standardisée qui permettra une comparaison entre villes. A défaut, des estimations ont été réalisées ici. A des fins d'évaluation environnementale, notre travail préconise que l'enquête TMV inclue des données kilométriques et de répartitions modales (avec des informations sur les taux de remplissages notamment).

II.2.2 Les données relatives aux modes

La troisième étape de la méthodologie consiste à construire une base de données environnementale des modes de transports. Ces données seront ensuite croisées aux données de déplacement obtenues précédemment, pour réaliser l'évaluation. La base de données de référence utilisée est la base de données d'ACV Ecoinvent 2.3, développée en collaboration par l'ETHZ (Institut Fédéral Technologique de Zurich), l'EPFL (Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne), PSI (Institut Paul Sherrer), l'Empa (centre de Recherche dans les sciences des matériaux et la technologie) et ART (centre de Recherche en agronomie, agriculture, nutrition et environnement). Cette base de données est considérée comme la référence pour l'ACV dans le Monde et en particulier en Europe.

Les inventaires disponibles dans Ecoinvent ont été modifiés et complétés de manière à être représentatifs du cas d'application de Saint-Etienne, et plus largement du cas français. La suite de cette partie présente, par mode de déplacement, les disponibilités offertes par Ecoinvent, mais aussi les modifications apportées.

II.2.2.1 L'automobile

II.2.2.1.1 Le parc automobile stéphanois

Le parc automobile stéphanois, à l'image du parc national, se compose majoritairement de motorisations diesel et essence (Figure 22).

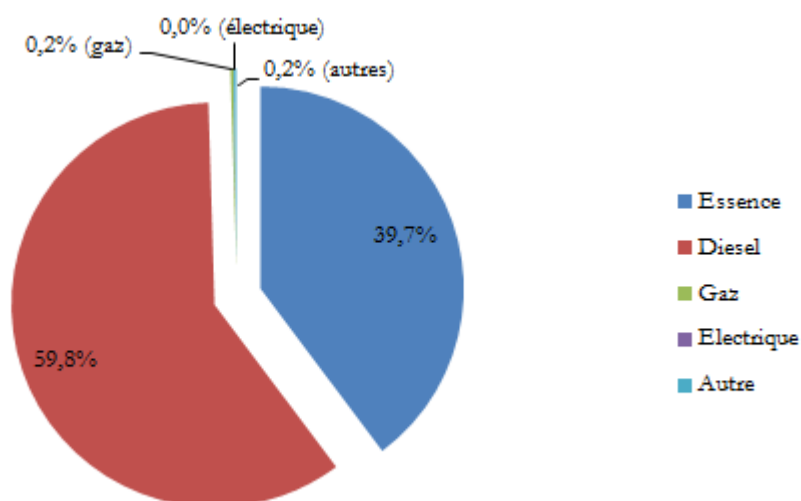


Figure 22 : Répartition des motorisations du parc automobile stéphanois (EMD 2009)

Outre la motorisation, les véhicules neufs vendus sont tenus de respecter la norme EURO en vigueur lors de leur commercialisation. L'année de première circulation permet donc de déterminer la catégorie EURO à laquelle appartiennent les véhicules. Les normes EURO fixent les limites maximales

autorisées de rejets de polluants réglementés pour les véhicules roulants. La proportion de véhicules pour chaque norme EURO pour l'Agglomération stéphanoise est fournie par l'EMD (Figure 23).

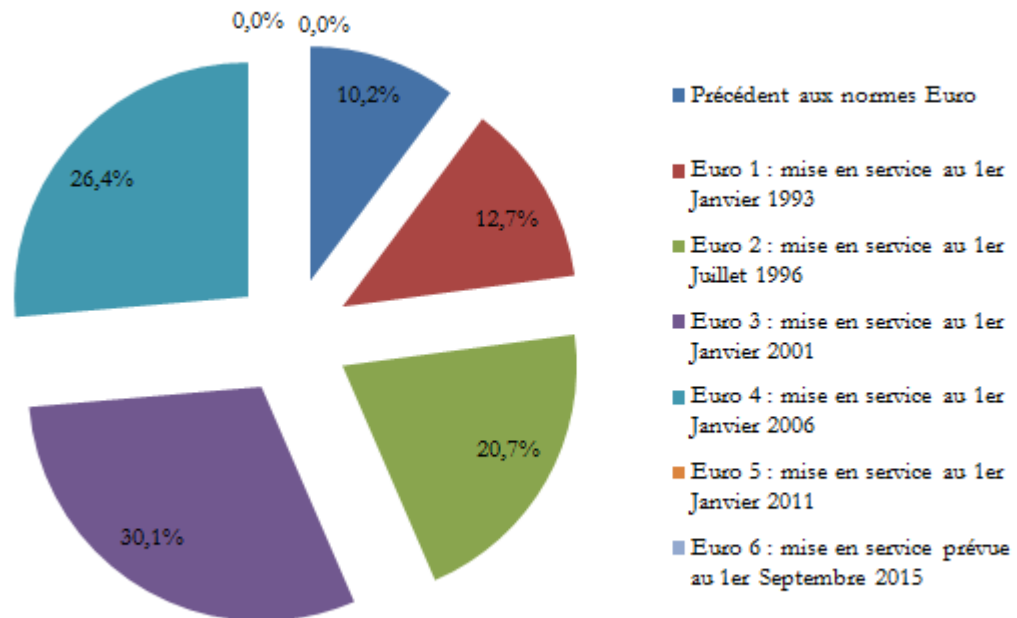


Figure 23 : Répartition du parc automobile stéphanois en normes Euro en 2009 (EMD 2009)

II.2.2.1.2 Organisation dans Ecoinvent 2.2

Ecoinvent 2.2 propose pour les motorisations diesel et essence des déclinaisons pour les normes EURO 3, 4 et 5. Chaque inventaire proposé se subdivise en 7 phases décrites ci-dessous pour l'exemple de l'automobile à motorisation diesel, respectant la norme EURO 3 (Transport, passenger car, diesel, EURO3/CH U) :

- La phase d'usage du véhicule : Operation, passenger car, diesel, EURO3/CH U (exprimée en km).

« CH » signifie que la donnée correspond au référentiel suisse. « U » signifie « unit ». Dans Ecoinvent, chaque inventaire est disponible sous deux formes : « S » comme « system », qui est une compilation de l'ensemble des flux de polluants appelés par le processus (après agrégation des différentes phases de cycle de vie) et « U », pour « unit », qui donne le détail des différentes phases. La forme « system » a pour but de réduire le temps de calcul.

- La fabrication du véhicule : Passenger car/RER/I U (exprimée en pièces)

La notation « RER » est utilisée pour les données relatives au référentiel européen.

- La maintenance du véhicule : Maintenance, passenger car/RER/I U (exprimée en pièces)
- La construction de la route : Road/CH/I U (exprimée en mètre.an)
- La maintenance de la route : Operation, maintenance, road/CH/I U (exprimée en mètre.an)
- La fin de vie du véhicule : Disposal, passenger car/RER/I U (exprimée en pièces)
- La fin de vie de la route : Disposal, road/RER/I U (exprimée en mètre.an)

Ces inventaires ont pour unité la personne.kilomètre (pkm).

II.2.2.1.2.1 Phase d'usage

La phase d'usage est la phase prédominante dans le bilan environnemental de l'automobile à combustion interne. Selon la littérature, elle est notamment responsable d'environ 80% des émissions de GES (comme cela a été relevé au chapitre I). 1 pkm d'automobile fait appel à (1/p) phases d'usage, où p est le taux d'occupation du véhicule. En Suisse, le taux d'occupation moyen des véhicules particuliers est de 1,6. Cette valeur est utilisée pour l'ensemble des automobiles modélisées par Ecoinvent.

L'unité de référence pour les modes de déplacement de personne dans Ecoinvent étant le pkm (Spielmann et al. 2007), le taux de remplissage est un paramètre très influent sur les résultats. Une analyse de sensibilité effectuée sur le taux d'occupation d'une automobile dans la base Ecoinvent le confirme (Figure 24). A noter que cet exemple, bien que trivial, a été conservé du fait de la grande variabilité du taux d'occupation selon le motif observée sur le terrain.

En outre, le taux d'occupation de l'automobile est différent selon le motif du déplacement. Il a donc été choisi tout d'abord de démultiplier les inventaires de véhicule particulier, lorsque le motif de déplacement est connu pour un taux d'occupation particulier. Ainsi, l'EMD de Saint-Etienne relève le taux d'occupation des véhicules particuliers pour certains motifs de déplacement (

Tableau 11). A noter que les taux d'occupation des véhicules collectés dans les EMD ne suivent pas la même nomenclature que les motifs de déplacements (Figure 15). Les catégories « aller chercher », « accompagner quelqu'un » ont été classées dans « accompagnement », l'ensemble des trajets scolaires (ainsi que vers la garderie et la nourrice) dans « études », les déplacements professionnels dans « travail ». Pour le reste, la moyenne a été utilisée.

Analyse de sensibilité sur le taux d'occupation des véhicules particuliers (VP)

L'analyse a été menée sur le process « Transport, passager car/CH U » de la base de données Ecoinvent 2.2. Des taux de remplissage (TR) allant de 1 à 1,9 ont été testés. Cette analyse de sensibilité met en avant l'importance de ce paramètre dans les résultats, pour les émissions de GES. Dans la suite, d'autres analyses de sensibilité menées sont évoquées. Elles ne seront pas présentées en détail ici, mais disponibles en annexe 6 (dans l'exemple de fiche récapitulative spécifique au bus).

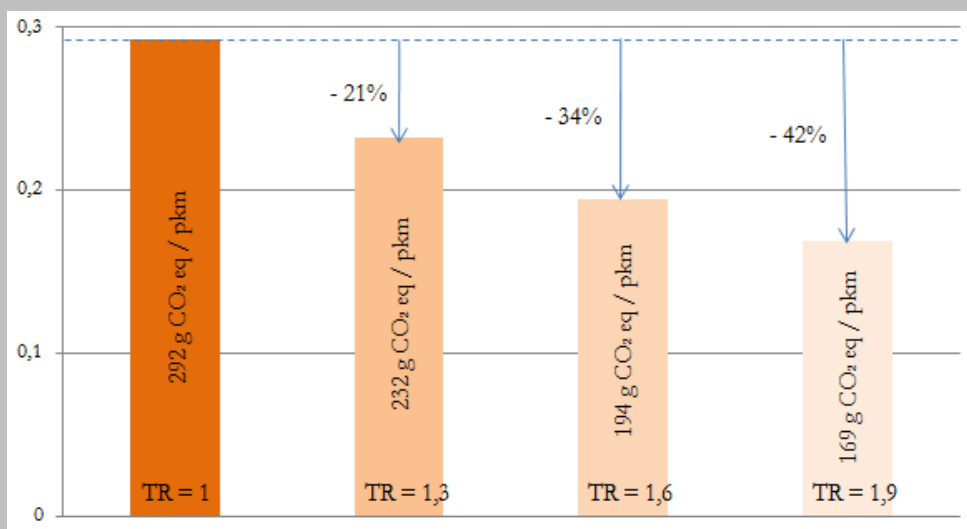


Figure 24 : Analyse de sensibilité sur le taux d'occupation des VP

Tableau 11 : Taux d'occupation des véhicules particuliers par motif de déplacement à Saint-Etienne

Motif de déplacement	Moyen	Travail	Etudes	Accompagnement	Autres	Secondaires
Taux d'occupation moyen des VP	1,39	1,03	1,12	1,96 ³⁸	1,28	1,41

Ensuite, la consommation de carburant et, *a fortiori*, les émissions directes de CO₂ sont déterminantes pour la phase d'usage (voir analyses de sensibilité sur les fiches véhicules en annexe 6). Ces paramètres

³⁸ Le taux d'occupation pour le motif accompagnement regroupe les motifs « aller chercher quelqu'un », « accompagner quelqu'un », « déposer une personne à un autre mode » et « aller chercher une personne à un autre mode ». Les passagers sont donc absents pour certains de ces motifs, expliquant un taux d'occupation inférieur à 2 (Région PACA et al., 2011).

varient avec la gamme du véhicule (liée à la cylindrée) (ADEME 2012). Afin d'approcher le parc automobile français (et stéphanois), il a été choisi de modéliser trois véhicules appelés par commodité petit, moyen et grand modèles. Ces trois gammes ont ensuite été déclinées dans toutes les normes EURO (de 1 à 5), afin de construire une flotte représentative de la flotte stéphanoise, qui a elle-même été ensuite déclinée pour les différents motifs de déplacements (suivant les taux d'occupation connus).

II.2.2.1.2.2 *Les autres phases du cycle de vie*

Pour les phases du cycle de vie relatives au véhicule (fabrication, maintenance et fin de vie), la durée de vie kilométrique apparaît être un paramètre déterminant. En effet, une nouvelle fois, l'unité de référence étant le pkm, elle va faire appel à la construction d'un véhicule, divisée par le taux d'occupation à nouveau, mais également par la durée de vie kilométrique. C'est également le cas pour la maintenance et la fin de vie du véhicule. Ecoinvent retient des durées de vie kilométriques de 150 000 kilomètres, pour le diesel comme pour l'essence. Des durées de vie de 157 070 kilomètres pour l'essence et 250 090 pour le diesel semblent plus proches de la réalité (Jeger 2001) et ont été retenues dans l'étude.

La phase de fabrication du véhicule dans Ecoinvent est issue de l'ACV de la Golf A4, 1.4 l Otto. Il a été décidé de conserver cette phase ainsi, tout comme la phase de maintenance. Le scénario de fin de vie est également conservé, à savoir le recyclage à 100% de l'acier, de l'aluminium et du cuivre et à 50% des pneumatiques.

Enfin, les phases concernant les infrastructures de transport sont conservées. Bien qu'un travail important puisse être réalisé sur ces phases notamment sur les règles d'allocation utilisées³⁹ ou encore la différenciation des routes selon les usages (ces remarques seront développées dans la dernière partie du manuscrit), le poids dans le bilan total a été jugé cohérent et acceptable comme première approche, après discussion avec experts (Agnès Jullien et Michel Dauvergne, de l'IFSTTAR ont été consultés).

II.2.2.2 Les transports en commun urbains

Les transports en commun urbains (TCU) à Saint-Etienne sont gérés par la Société de Transports de l'Agglomération Stéphanoise (STAS). Ils se composent d'une flotte de bus, de trois lignes de tramway et d'une ligne de trolleybus.

Dans la base de données Ecoinvent, ces trois modes de transport sont représentés de la même façon que l'automobile, en sept phases. Un bus, un trolleybus et un tramway sont disponibles. Ces inventaires ont pour unité la personne.kilomètre (pkm). La flotte de bus de Saint-Etienne se compose de bus standards, en majorité, mais également de bus articulés, de moyenne capacité et de minibus. La STAS a pu fournir la répartition kilométrique de sa flotte (Tableau 12). Bien qu'il n'ait pas été possible d'obtenir

³⁹ Une allocation massique est faite sur le poids net des différents véhicules empruntant la route pendant sa durée de vie. Cependant, les routes sont toujours dimensionnées pour le véhicule le plus lourd. Il serait donc intéressant d'imaginer une allocation où tout le delta d'impact entre deux routes serait porté par le véhicule pour lequel une infrastructure plus lourde a été mise en place, le reste de l'impact étant alloué en masse entre les différents véhicules.

d'information sur le motif des déplacements spécifiques à chaque catégorie de bus (standard, articulé, etc.), une flotte de bus a tout de même été modélisée, respectant les proportions d'utilisation annuelle de chaque type. Ainsi, 1 pkm de « flotte de bus » appellera par exemple 0,719 pkm de bus standard.

Tableau 12 : Répartition modale kilométrique des types de bus à Saint-Etienne (données STAS)

Mode de transport	Bus standard	Bus articulé	Bus moyenne capacité	Minibus	Trolleybus
Part dans la flotte des TC	71,9%	19,9%	3,7%	0,9%	3,6%

De façon analogue à l'automobile, le taux d'occupation des véhicules est un paramètre susceptible d'être déterminant et a été adapté au cas français. Il a par ailleurs été décidé de modéliser, pour chaque mode de transport, un véhicule en heures de pointe et en heures creuses, considérant que les taux de remplissages peuvent varier. Bien que peu d'informations soient disponibles sur le sujet (que ce soit sur les motifs de déplacements privilégiés en heures de pointe que sur les modes de transports), il a été jugé important de pouvoir disposer de ce réglage. Des taux d'occupation moyens ont donc été déterminés pour chaque véhicule en heures creuses et en heure de pointe (Tableau 13). En l'absence d'informations complémentaires, il a été jugé que les bus moyenne capacité et les minibus, faiblement représentés et d'une capacité réduite, étaient des bus d'appoint, utilisés à taux d'occupation constant quelque-soit le moment de la journée (heures creuses ou pointe). L'incidence de cette hypothèse sur les résultats finaux est quoiqu'il arrive jugée négligeable, ces véhicules représentant moins de 5% de la flotte, elle-même relativement marginale dans la répartition modale globale des déplacements.

Tableau 13 : Taux de remplissage des différents véhicules de transports en commun urbains

Véhicule	Taux d'occupation dans Ecoinvent	Taux d'occupation corrigé (Quin et al. 2001)
Bus standard en pointe	12,5	15
Bus articulé en pointe	NA	30
Bus moyenne capacité en pointe	NA	7
Minibus en pointe	NA	7
Bus standard en heures creuses	NA	11
Bus articulé en heures creuses	NA	22
Bus moyenne capacité en heures creuses	NA	7
Minibus en heures creuses	NA	7
Tramway en pointe	52,8	31
Tramway en heures creuses	NA	20
Autocar	12,5	20
Trolleybus en pointe	26	15
Trolleybus en heures creuses	NA	11

II.2.2.2.1 Phases d'usage

La phase d'usage prédomine dans le bilan environnemental des bus à combustion interne. Comme pour l'automobile, elle est notamment responsable d'environ 90% des émissions de GES (Spielmann et al. 2007; Babor et al. 2010). La consommation de carburant et les émissions directes de CO₂ sont déterminantes pour la phase d'usage (voir analyses de sensibilité sur la fiche « bus » en annexe 6). Pour le cas d'étude de Saint-Etienne, ces données ont été obtenues en enquêtant auprès de la STAS (Figure 25). Ont été obtenues les informations sur la flotte de bus disponible à Saint-Etienne, en termes de carburant utilisé et de norme EURO respectée. Globalement, deux types de carburant sont utilisés : le diesel et un mélange de diesel avec une émulsion d'eau, appelé O#. Cependant, l'O#, qui permettait de réduire les émissions polluantes, a perdu son utilité depuis l'arrivée des filtres à particules. Il est donc toujours présent dans un certain nombre de vieux véhicules, mais ceux-ci sont moins nombreux et moins utilisés (environ 10% des kilomètres parcourus). Par commodité, il a été choisi de ne modéliser qu'un type de carburant, le diesel. Les normes EURO ont été regroupées (de 0 à 2, et de 3 à 5).

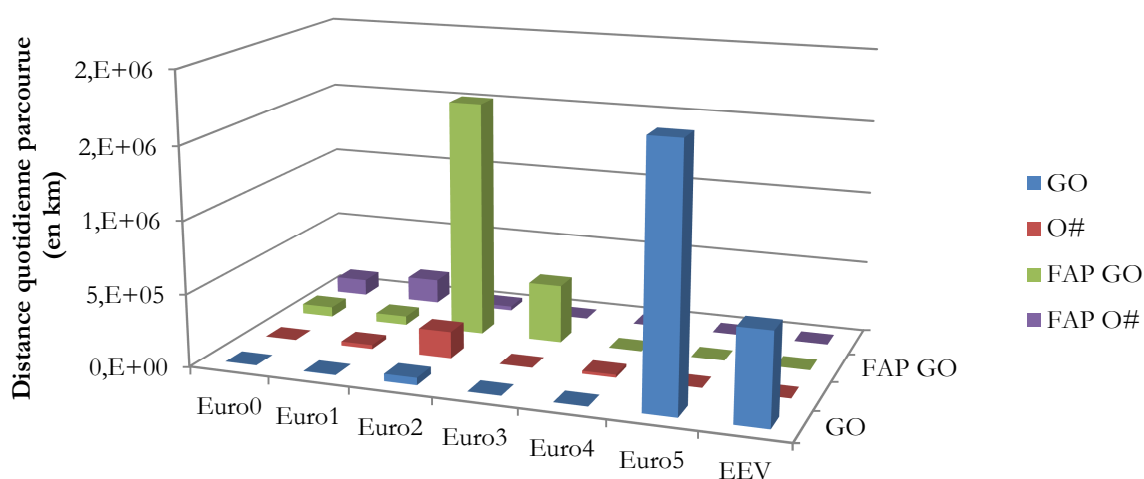


Figure 25 : Répartition des types de motorisation dans la flotte de bus stéphanoise (GO : diesel ; O# : diesel avec émulsion d'eau ; FAP : filtre à particule ; EEV n'est pas à proprement parler une norme EURO, mais l'évolution de l'EURO5, en attendant l'arrivée de l'EURO6)

Pour le **tramway**, la phase d'usage est également importante (environ 50% (Spielmann et al. 2007)). Cependant, son impact est directement lié au mix électrique du pays où se déroule l'étude. L'inventaire disponible dans Ecoinvent a donc dû être adapté, non seulement en termes de quantité d'électricité consommée (à l'aide à nouveau de données fournies par la STAS), mais également sur la nature du mix électrique utilisé (suisse à l'origine, modifié en mix électrique français). Les fiches véhicules proposent

des analyses de sensibilité sur la quantité d'électricité consommée au kilomètre et sur le mix électrique utilisé.

La phase d'usage du **trolleybus** est également importante (environ 70% (Spielmann et al. 2007)) dans le bilan. A l'image du bus, la partie thermique est impactée par la consommation de carburant. A l'image du tramway, la consommation d'électricité et le mix électrique jouent également.

II.2.2.2.2 Les autres phases du cycle de vie

Comme pour l'automobile, pour les phases du cycle de vie relatives au véhicule (fabrication, maintenance et fin de vie), la durée de vie kilométrique apparaît être un paramètre déterminant. Les durées de vie kilométriques des véhicules ont été obtenues par la littérature (Jeger 2001; Quin et al. 2001).

La phase de fabrication des véhicules dans Ecoinvent est modélisée à partir de données de Volvo (Spielmann et al. 2007). Il a été décidé de conserver cette référence pour la phase de fabrication. C'est également le cas pour la phase de maintenance. Le scénario de fin de vie est également conservé, à savoir, le recyclage à 100% de l'acier, de l'aluminium et du cuivre et à 50% des pneumatiques (c'est le même scénario que pour les voitures).

Enfin, les phases concernant les infrastructures de transport sont conservées. Bien qu'un travail important puisse être réalisé sur ces phases (notamment sur les règles d'allocation utilisées⁴⁰), le poids dans le bilan total a été jugé cohérent et acceptable.

II.2.2.3 Les autres modes

Les autres modes de transport occupent une place plus marginale dans le bilan kilométrique total. Une fiche spécifique descriptive pour le bus est disponible en annexe 6, mais l'étude de ces modes ne sera que brièvement développée ici. Seule la marche à pied occupe une place prépondérante dans le mix modal (26,6% des déplacements). N'étant pas disponible dans Ecoinvent, il a été retenu que seule l'infrastructure était nécessaire, et les différents supports de marche ont été assimilés à l'inventaire « Road/CH/I U » de Ecoinvent. Il a été considéré qu'un marcheur usait 20 fois moins la chaussée qu'une voiture (par allocation massique⁴¹).

⁴⁰ Ce point sera développé dans le dernier chapitre de ce manuscrit. Une allocation massique est faite sur le poids net des différents véhicules empruntant la route pendant sa durée de vie. Cependant, les routes sont toujours dimensionnées pour le véhicule le plus lourd. Il serait donc intéressant d'imaginer une allocation où tout le delta d'impact entre deux routes serait porté par le véhicule pour lequel une infrastructure plus lourde a été mise en place, le reste de l'impact étant alloué en masse entre les différents véhicules.

⁴¹ Le poids moyen d'une automobile en France est estimé à 1300 kg (F. Keller 2008) et celui d'un individu défini par commodité à 65 kg (il est de 63 kg pour les femmes et 77 pour les hommes)(De Saint Pol 2009))

Les transports en commun non urbains (TCNU) comportent les autocars, utilisés pour des liaisons interurbaines et pour le transport scolaire, ainsi que les TER SNCF. Les autocars ont été modélisés en se basant sur l'inventaire « Transport, coach/CH U » d'Ecoinvent qui a une nouvelle fois été adapté au cas français à l'aide de données de littérature (ADEME 2005; Quin et al. 2001). Pour le train, l'inventaire utilisé est le « Transport, regional train, SBB mix/CH U ». Une modification du mix électrique a été apportée. En effet, cet inventaire est construit en utilisant un mix électrique suisse pendant la phase d'usage. Ce dernier a été remplacé par un mix électrique français (celui fourni par Ecoinvent). En France, en 2007, les trains de voyageurs ont en moyenne transporté 185 passagers par trajet (Pasi 2007) (ce chiffre a été utilisé comme taux d'occupation).

Les deux-roues se composent de la bicyclette, modélisée dans Ecoinvent par l'inventaire « Transport, bicycle/CH U » et des deux-roues motorisés, séparés en deux catégories : plus ou moins de 50 cm³ de cylindrée. Ecoinvent ne dispose que d'un seul inventaire pour les deux-roues motorisés. Il a été considéré que seules les phases d'usage changeaient et en particulier les consommations de carburant et émissions directes de GES.

Enfin, les autres modes apparaissant de manière très marginale pour les déplacements de personnes sont les taxis et le transport par l'employeur (qui ont tous deux été assimilés à la flotte automobile, avec un taux d'occupation d'une personne) ainsi que les camions et camionnettes, modélisés comme un véhicule utilitaire léger, grâce à l'inventaire « Transport, van <3.5t/RER U ». A noter que dans Ecoinvent, cet inventaire est destiné au transport de marchandises, et a donc pour unité fonctionnelle la tonne.kilomètre et a été adapté à l'unité pkm (avec un taux d'occupation égal au taux moyen en automobile).

II.2.2.4 Comparatif des modes, pour 1 pkm

L'ensemble des modes de transports de personnes modélisés peuvent être comparés à unité fonctionnelle égale : 1 pkm parcouru (Figure 26). Pour chaque mode, les émissions de GES de chaque phase du cycle de vie sont représentées. Les différents modèles d'automobile ont été représentés ici pour le taux d'occupation moyen de 1,39 personne. Deux bus standards ont été représentés, afin de mettre en avant la différence entre l'heure creuse et la pointe et l'influence sur les émissions de GES à la pkm.

L'automobile est le mode de déplacement le plus impactant du point de vue des émissions de GES parmi l'ensemble des véhicules modélisés. En outre, la motorisation essence est la plus impactante ; à modèle équivalent, elle apparaît de 18 à 21% plus émettrice de GES que la motorisation diesel. La phase d'usage occupe de 81 à 88% des émissions de GES pour les automobiles modélisées, le reste se partageant entre la fabrication du véhicule (de 6 à 11%) et les infrastructures (2 à 3% pour leur construction et 3 à 4% pour leur entretien).

Arrivent ensuite les deux-roues motorisés qui subissent le fait d'être utilisés presque uniquement par une personne seule. De façon analogue à l'automobile, la phase d'usage prédomine (65% des émissions pour les petites cylindrées, 71% pour les plus grandes). Du fait d'une durée de vie kilométrique bien inférieure à celle de l'automobile, la fabrication et la maintenance du véhicule occupent une place

importante (respectivement 17 à 20% et 12 à 14%). L'impact de l'infrastructure routière dans le cycle de vie est quasi-nul ici.

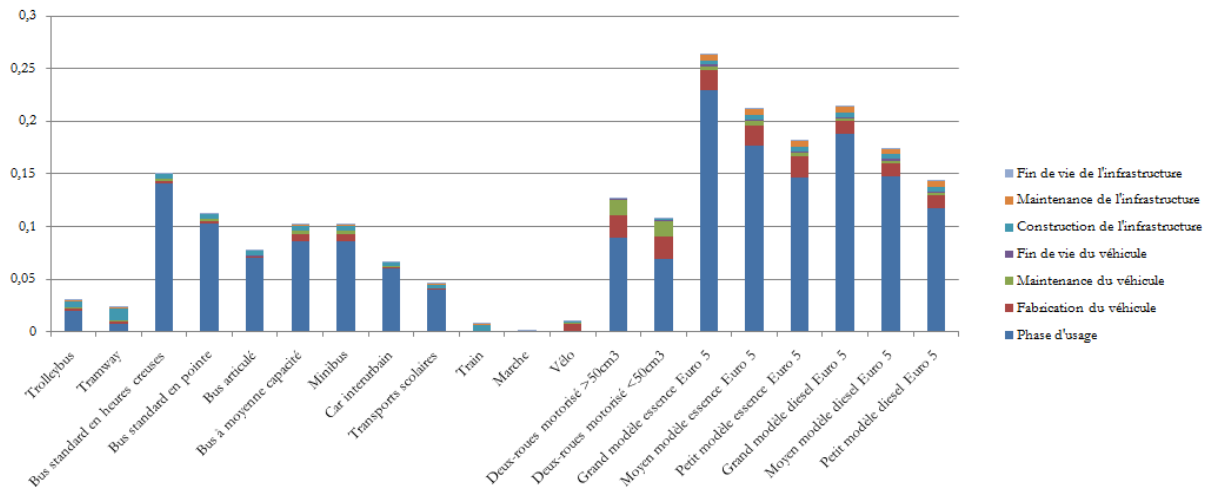


Figure 26 : Bilans unitaires d'émissions de GES des modes de transport et contributions des phases du cycle de vie
- en g CO₂ eq/pkm

Les bus arrivent ensuite avec en tête le bus standard. Le bus articulé est le moins impactant, du fait d'un fort taux d'occupation. Là encore, la phase d'usage émet une large part des GES (85 à 94%). De 3 à 9% des émissions sont dues à la fabrication et la maintenance des véhicules, contre 6 à 8% pour les infrastructures routières. Les autocars arrivent ensuite. Les trajets effectués, interurbains, sont moins consommateurs de carburant et par conséquent moins émetteurs de GES. Pour les transports scolaires, le fort taux d'occupation réduit d'autant les émissions. La répartition des émissions sur le cycle de vie est très proche de celle des bus.

Les transports électriques sont les moins émetteurs en GES, notamment du fait de l'utilisation d'un mix électrique français, peu carboné. Le trolleybus, tout d'abord, qui allie énergies électrique et thermique, avec une phase d'usage responsable de 66% des émissions, auxquelles s'ajoutent environ 20% pour la mise en place et l'entretien des infrastructures et une quinzaine pour la fabrication et l'entretien des véhicules. Le tramway, ensuite, pour lequel seulement un tiers des émissions est porté par la phase d'usage. Plus de la moitié est due à la mise en place et l'entretien des infrastructures et une douzaine à la fabrication et l'entretien des rames. Le train, avec un taux d'occupation élevé, est peu émetteur et une nouvelle fois, la majorité des émissions est portée par les infrastructures (construction et entretien).

Enfin, le vélo et la marche n'ont pas d'impact sur la phase d'usage. Pour le vélo, c'est sa fabrication et son entretien qui tiennent la majorité des émissions. Pour la marche, elles sont portées par la mise en place des infrastructures. Cependant, pour ces deux modes, les émissions sont marginales.

II.3 Résultats pour l'agglomération stéphanoise

Dans un premier temps, la méthodologie a été testée pour calculer les émissions de GES. Ces dernières ont été jugées idéales pour tester et valider la méthodologie à plusieurs titres :

- Les facteurs d'émission pour les GES font largement consensus dans la communauté scientifique, du fait notamment de la grande quantité d'études en la matière ces dernières années ;
- L'impact principal associé aux émissions de GES, l'influence sur le changement climatique, est particulièrement adapté à l'analyse de cycle de vie. En effet, c'est un impact global, non dépendant de la localisation des émissions. Les émissions des différentes phases du cycle de vie peuvent donc être additionnées sans crainte ;
- Bien qu'il n'existe actuellement pas d'étude spécifique de la mobilité d'une aire urbaine utilisant l'ACV, les GES ont souvent été analysés dans les domaines des transports et de la mobilité. Les résultats pourront donc être comparés à ces études, permettant de vérifier leur cohérence (notamment que les ordres de grandeur sont respectés).

Cette partie propose donc un certain nombre de résultats sur les émissions de GES. Pour le calcul, la méthode de caractérisation utilisée est « l'IPCC 2007 GWP 100a version 1.02 » développée par le GIEC avec les potentiels de changement climatique à 100 ans. Les calculs sont effectués à l'aide du logiciel d'ACV Simapro, version Developer 7.3.3. L'intérêt majeur d'utiliser la version Developer dans ce travail réside dans la grande quantité de données qui étaient souhaitées paramétrables. En effet, un fichier Excel a été mis en place, contenant l'ensemble des données nécessaires au calcul (tant les distances parcourues par mode et par motif que les paramètres supplémentaires influents (taux d'occupation, durées de vie, etc.)). La suite proposera une extension à d'autres indicateurs d'impacts environnementaux.

En outre, seule la mobilité locale de semaine (du lundi au vendredi) a été considérée, c'est-à-dire les déplacements considérés par les Enquêtes Ménages Déplacements. Ce périmètre permet de construire un jeu de données fiable et complet à l'aide des résultats de l'EMD.

II.3.1 Résultats pour la mobilité des personnes

II.3.1.1 Résultats généraux

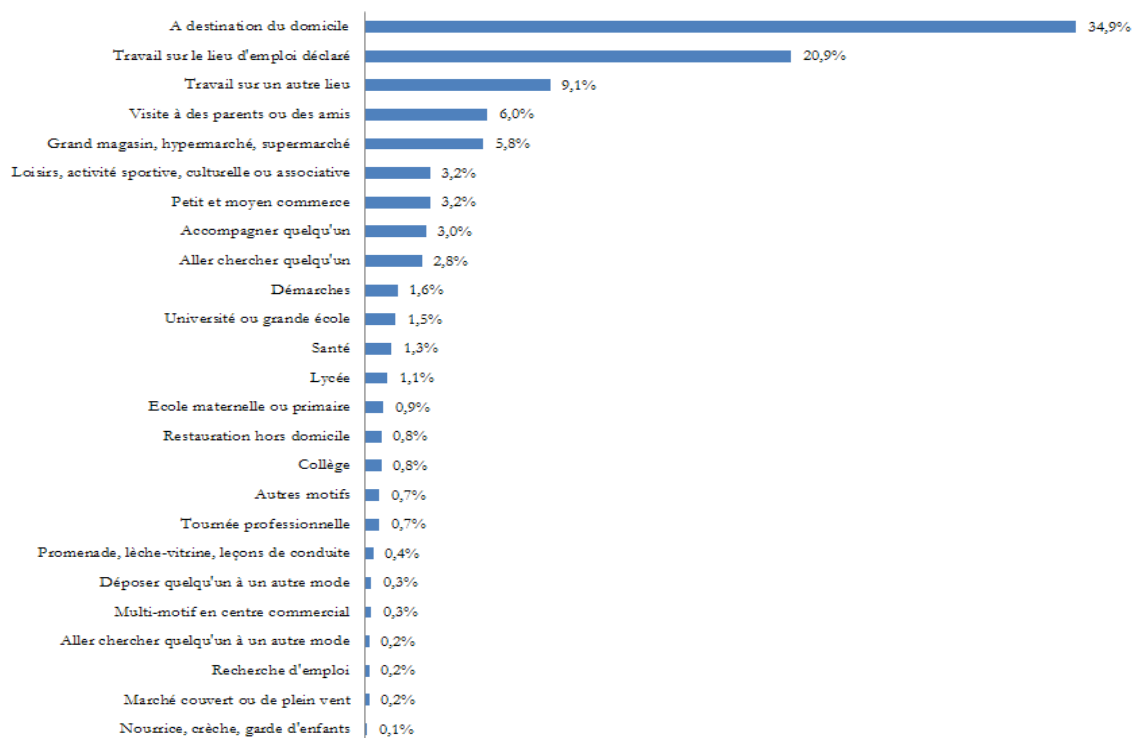
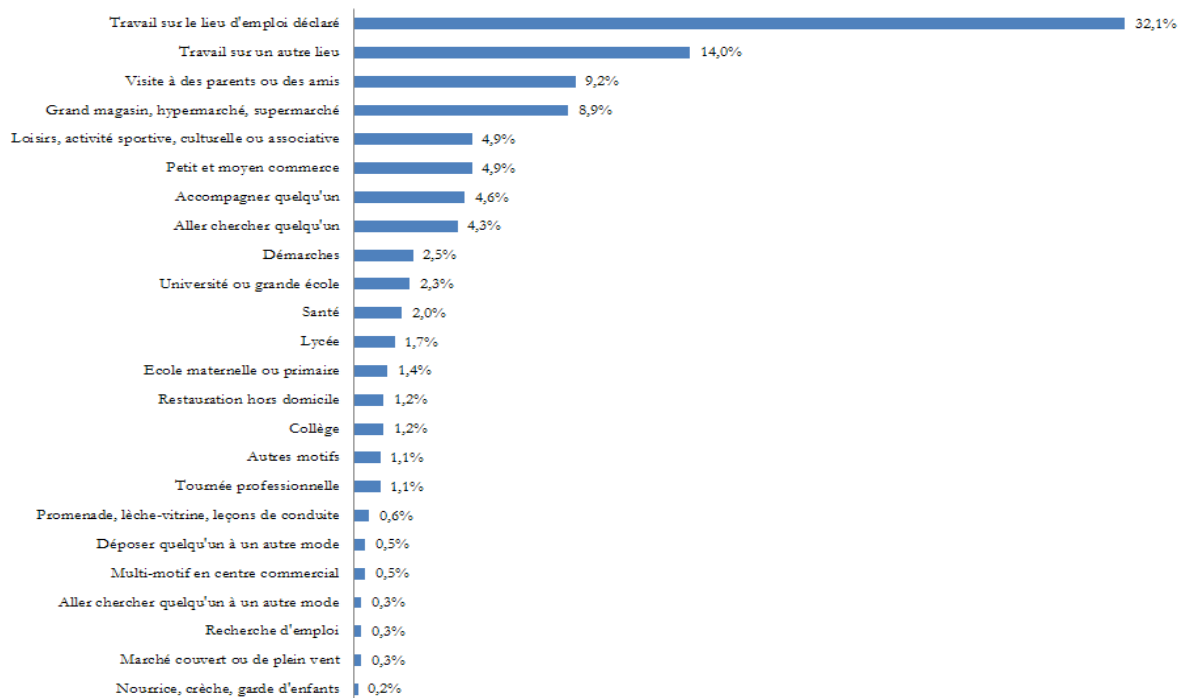
Les premiers résultats montrent que la mobilité locale des stéphanois, du lundi au vendredi, émet en une année 270 kilotonnes de CO₂ eq. Cela représente 1 000 tonnes de CO₂ eq émises chaque jour de semaine par la population de Saint-Etienne pour sa mobilité locale, soit en moyenne 2 673 g CO₂ eq par personne et par jour.

A titre de comparaison, l'étude réalisée par Bouzouina et al. (2011) sur la mobilité des habitants de l'agglomération lyonnaise (pour l'année 2006) comparait les émissions de différents profils d'utilisateurs, allant de l'inactif, émettant en moyenne 910 g CO₂ eq/jour à l'actif avec 3 220 g CO₂ eq/jour. La moyenne, par habitant et par jour est évaluée à 1,9 kg CO₂ eq (L. Bouzouina et al. 2011). Ces calculs ne se basaient que sur les émissions de la phase d'usage. Les résultats généraux obtenus ont donc des ordres de grandeur comparables à ceux trouvés dans la littérature.

II.3.1.2 Les émissions de GES par besoins de déplacement

La Figure 27 présente les résultats obtenus pour les émissions de GES par besoin de déplacement à l'aide de la méthodologie proposée.

La Figure 27 montre que les trajets vers le lieu de travail sont responsables de 20% des émissions de GES, alors qu'ils représentent moins de 10% des déplacements. Comme cela a déjà été précisé, les EMD proposent une classification des déplacements dits « à destination ». Cette catégorie regroupe l'ensemble des retours vers le domicile (quel que soit le motif de départ). Elle comprend 38,5% des pkm réalisées, pour 35% des émissions de GES. Afin de mieux appréhender la contribution de chaque besoin de déplacement, une répartition est proposée où il est considéré que les retours au domicile se répartissent de manière analogue au reste des besoins. C'est-à-dire par exemple qu'à la part $x = 20,9\%$ de déplacements vers le lieu de travail habituel est ajoutée $x\%$ des déplacements vers le domicile (Figure 28).

Figure 27 : Emissions de GES par besoin de déplacement en pourcentage de g CO₂ eqFigure 28 : Emissions de GES par besoin de déplacement en pourcentage de g CO₂ eq (hors déplacements à destination du domicile)

Les déplacements domicile-travail représentent 46% des émissions de GES, dont 32% vers le lieu de travail habituel et 14% vers un autre lieu de travail (Figure 28). Les achats (regroupant achats en centre commercial, hypermarché/supermarché, petit et moyen commerce et marché) représentent environ 15% des émissions, les déplacements scolaires 7%, les déplacements personnels (regroupant les démarches administratives, les déplacements pour raison de santé et la recherche d'emploi) émettent 5% des GES. Enfin, les autres déplacements représentent 27% des émissions, dont une dizaine pour les visites à la famille et les amis.

Les déplacements dits pendulaires sont les déplacements domicile-travail et domicile-études. Ils représentent à Saint-Etienne 57,5% des émissions de GES (lorsqu'on assimile les retours au domicile aux autres motifs). Cela représente 155 kt CO₂ eq. La proportion d'actifs/étudiants stéphanois est de 56,7% (Epures 2010), cela représentant 210 000 personnes environ. Chacun émet donc en moyenne 738 kg CO₂ eq par an pour ses déplacements pendulaires. Pour comparaison, un français (hors Ile de France) émet en moyenne pour ses déplacements domicile-travail 620 kg CO₂ eq, allant, en milieu urbain, de 450 kg CO₂ eq pour les habitants des grands pôles urbains à 800 kg CO₂ eq dans leur espace périurbain (DREAL Pays de la Loire 2012). De plus, en excluant également Paris (considéré comme un cas particulier du fait de l'utilisation importante des TC), l'INSEE confirme ces chiffres pour l'ensemble du territoire métropolitain, avec de plus grandes disparités encore, allant de 300 kg CO₂ eq pour les déplacements internes aux pôles urbains à 890 kg CO₂ eq pour ceux des couronnes périurbaines à leur pôle, avec une moyenne à 640 kg CO₂ eq (INSEE 2007). En Meurthe-et-Moselle, la moyenne est à 692 kg CO₂ eq allant de 451 kg CO₂ eq à Nancy, et dépassant la tonne dans certaines communes rurales (Bischoff & Calzada 2011).

Les quelques comparaisons à d'autres études des émissions de GES par les déplacements d'habitants dans une agglomération permettent de valider la méthodologie en termes d'ordres de grandeur des résultats obtenus. Elles permettent également de constater des écarts, du fait de la prise en compte unique de la phase d'usage pour ces méthodologies tandis que celle proposée dans ce travail évalue l'ensemble du cycle de vie. En effet, Saint-Etienne se rapproche davantage du scénario en périurbain. Cela permet d'avancer l'hypothèse de l'importance de considérer les autres phases que celle d'usage.

Chaque déplacement n'induit pas une distance moyenne équivalente. Ce paramètre peut donc être, a priori, important pour les émissions de GES. Pour le vérifier, une régression linéaire a été réalisée sur les émissions de GES totales par motif en fonction de la distance totale parcourue par motif. Le coefficient de régression linéaire ($R^2 = 0,976$) montre une très forte dépendance des émissions de GES à la distance totale parcourue annuellement (Figure 29). Cette distance totale apparaît donc être un déterminant important pour les émissions de GES.

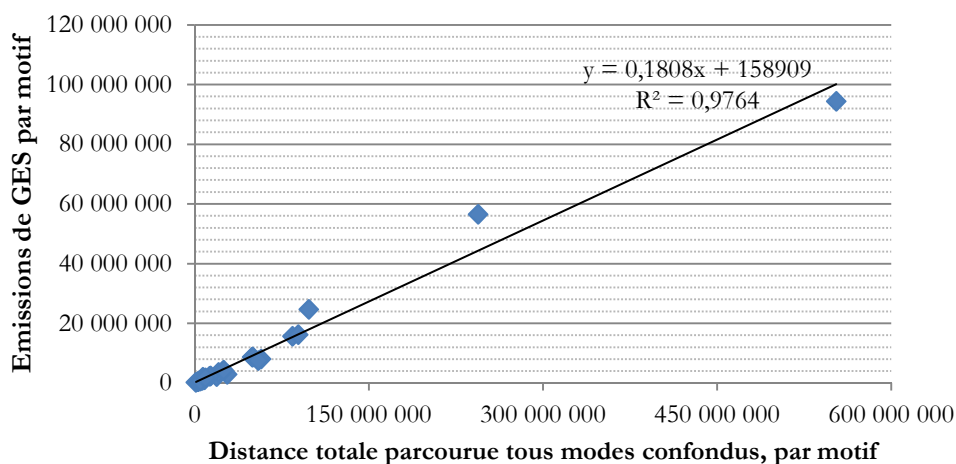


Figure 29 : Emissions de GES par motif en fonction de la distance annuelle parcourue tous modes confondus

II.3.1.3 Emissions de GES par modes

II.3.1.3.1 Comparaison des modes

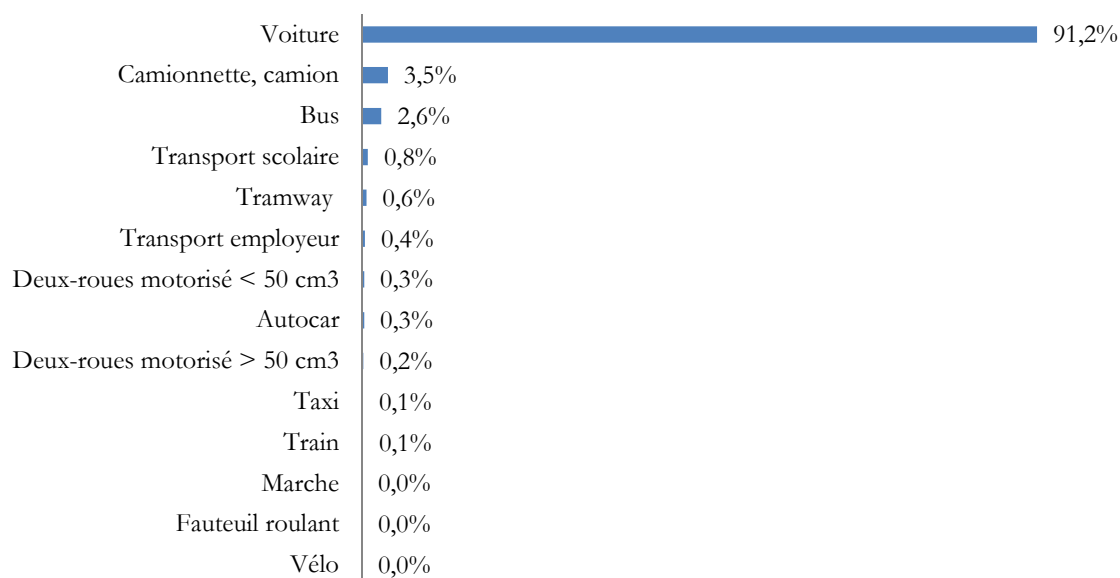


Figure 30 : Emissions de GES par mode de transport en pourcentage de g CO₂ eq

L'automobile représente la grande majorité des émissions de GES, avec 91,2% (Figure 30). Viennent ensuite les autres modes à énergie thermique, notamment les camions et camionnettes, possédés par

certains particuliers et la flotte de bus. A noter que, comme cela a été vu précédemment, l'automobile ne représente que 60% des déplacements environ, et 80% des distances parcourues.

II.3.1.3.2 Contributions des différentes phases du cycle de vie aux émissions totales de GES

La phase d'usage est réputée pour être la plus contributrice dans l'analyse de cycle de vie des transports. Ici, l'ensemble des impacts des phases d'usage des différents modes a été additionné afin de calculer la contribution totale des phases d'usage. Sur l'ensemble de la mobilité des personnes, 84% des émissions de GES cumulées sont dues aux phases d'usage (Figure 31). Cela peut aller de 80% pour les tournées professionnelles, à 87% pour les déplacements vers le collège. Pour les tournées professionnelles, la plus faible contribution de la phase d'usage répond à une plus forte part modale du véhicule utilitaire léger. Pour les déplacements vers le collège, ce sont les importantes parts modales de transports en commun, notamment scolaires, très impactant à l'usage. Cependant, les différences entre besoins sont minimes.

La phase d'usage, modélisée dans Ecoinvent comprend la fabrication du carburant et son approvisionnement. Ces deux étapes ne sont pas classiquement prises en compte dans les études d'émissions de GES de la mobilité urbaine évoquées au chapitre I. Ici, pour la flotte automobile de base, ces phases (fabrication et approvisionnement du carburant), cumulées, sont responsables des émissions de la phase d'usage dans des proportions allant de 18% pour le diesel à 27% pour l'essence.

La fabrication des différents véhicules est responsable de 7% des émissions de GES, avec des disparités selon les modes. Leur maintenance contribue à 2% des émissions avec principalement le remplacement des pneumatiques (environ 40% de la phase de maintenance). La fabrication des infrastructures de transport compte pour 3% des émissions de GES. Cela peut monter jusqu'à 5% pour les déplacements vers le lycée et 6% pour les déplacements vers l'université ou les grandes écoles, du fait notamment d'une plus forte part modale des transports collectifs.

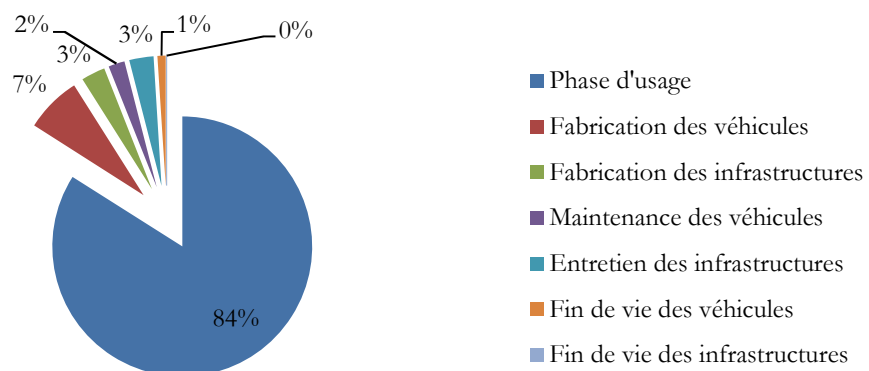


Figure 31 : Contributions cumulées des différentes phases du cycle de vie des modes de transport pour la mobilité des personnes à Saint-Etienne

II.3.1.4 Résultats comparés des émissions de GES par besoin de déplacement

Au-delà des résultats globaux, il est intéressant d'observer les émissions liées à une pkm réalisée pour chaque besoin de déplacement. Le déplacement d'une personne sur un kilomètre émet en moyenne 184 g CO₂ eq (Figure 32). Cependant, des disparités importantes existent entre les besoins de déplacement. Le moins émetteur est le déplacement vers le lycée, émettant 104 g CO₂ eq et le plus émetteur est la tournée professionnelle, grimpant jusqu'à 271 g CO₂ eq. La médiane se situe à 170 g CO₂ eq.

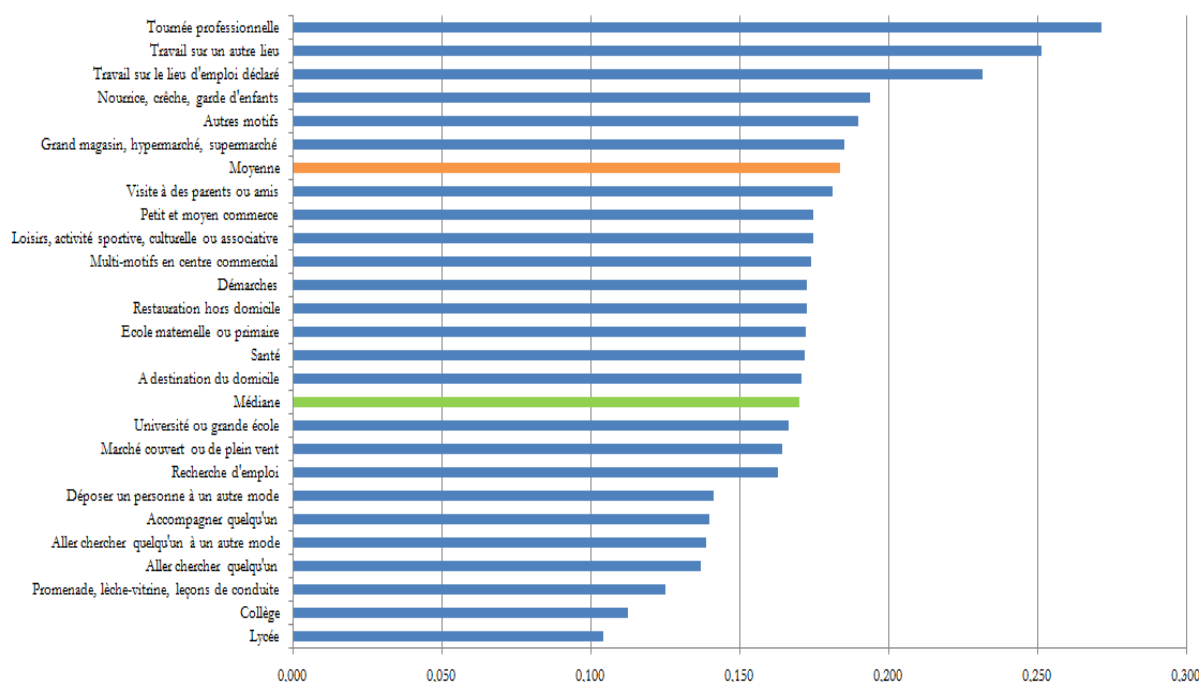


Figure 32 : Emissions de GES par besoin de déplacement relatives à la pkm, en kgCO₂eq/pkm

Afin d'expliquer ces disparités, plusieurs hypothèses peuvent être avancées et discutées.

Hypothèse 1 : les émissions de CO₂ équivalent par pkm sont proportionnelles à la part modale d'automobile.

En effet, l'automobile tenant une place primordiale dans les émissions totales, l'hypothèse que sa part modale va influencer fortement les émissions pour chacun des besoins de déplacement peut être émise. La corrélation entre la part kilométrique de l'automobile et les émissions de CO₂ par pkm est donc testée. Il apparaît qu'il n'y a pas de corrélation satisfaisante ($R^2 = 0,151$), permettant d'expliquer les disparités entre les besoins. La part modale d'automobile ne suffit donc pas à expliquer les émissions de GES.

Hypothèse 2 : les émissions de GES à la pkm par motif dépendent du taux d'occupation des véhicules

Les parts modales des trois grands secteurs modaux ont été représentées pour chaque besoin (Tableau 14). En avant dernière colonne, un indicateur a été renseigné sur la part modale automobile. En dernière colonne, un indicateur renseigne sur la quantité de GES émis, par rapport à la moyenne. Globalement, les besoins ayant des parts modales automobiles faibles (inférieure à 75%) ont des émissions de GES à la pkm faibles.

En revanche, les besoins ayant des parts modales automobiles les plus fortes entraînent des émissions de GES faibles. Ce sont les besoins d'accompagnement ou de reprise d'une tierce personne à un autre lieu ou à un autre mode de transport. Au contraire, certains besoins les plus émetteurs n'ont pas de part modale automobile particulièrement importante (notamment les besoins professionnels). Pour ces besoins, le taux d'occupation des véhicules rentre en jeu. En effet, les besoins d'accompagnement ont la particularité d'avoir un taux d'occupation particulièrement élevé (proche de 2), tandis que les déplacements pour raison professionnelle ont le plus faible (environ 1).

Tableau 14 : Répartitions modales kilométriques des trois grands secteurs modaux (VP, TC, MâP), émissions de GES/pkm

	Taux d'occupation voiture	part modale voiture	part modale TC	part modale marche	GES/pk m
Accompagner quelqu'un	1,96	0,978	0,006	0,014	0,140
Dépose d'une personne à un mode de transport	1,96	0,970	0,008	0,008	0,141
Aller chercher quelqu'un	1,96	0,945	0,020	0,030	0,137
Reprise d'une personne à un mode de transport	1,96	0,940	0,032	0,016	0,139
Achats en grand magasin, supermarché et hypermarché	1,39	0,929	0,054	0,012	0,185
Visite à des parents ou amis	1,39	0,889	0,070	0,028	0,181
Autres motifs	1,39	0,881	0,046	0,059	0,190
Multi-motifs en centre commercial	1,39	0,871	0,095	0,021	0,174
Achats en petit et moyen commerce	1,39	0,868	0,051	0,072	0,175
Loisirs, activité sportive, culturelle ou associative	1,39	0,854	0,085	0,035	0,175
Tournée professionnelle	1,03	0,848	0,002	0,004	0,271
Démarches	1,39	0,826	0,116	0,046	0,173
Santé	1,39	0,826	0,103	0,036	0,172
Base	1,39	0,816	0,113	0,043	0,188
A destination du domicile	1,39	0,815	0,120	0,043	0,171
Restauration hors du domicile	1,39	0,802	0,073	0,075	0,172
Travail sur le lieu d'emploi déclaré	1,03	0,795	0,114	0,014	0,232
Achats en marche couvert ou de plein vent	1,39	0,789	0,094	0,117	0,164
Travail sur un autre lieu	1,03	0,786	0,041	0,012	0,251
Nourrice, crèche, garde d'enfants	1,12	0,786	0,109	0,099	0,194
Recherche d'un emploi	1,39	0,746	0,191	0,022	0,163
Ecole maternelle ou primaire	1,12	0,665	0,236	0,096	0,172
Promenade, lèche vitrine, leçons conduite	1,39	0,586	0,109	0,262	0,125
Université ou grande école	1,12	0,463	0,501	0,035	0,166
Collège	1,12	0,266	0,678	0,049	0,113
Lycée	1,12	0,187	0,764	0,029	0,104

II.3.1.5 Les autres impacts potentiels

Au-delà des émissions de GES, d'autres enjeux environnementaux peuvent être étudiés. La méthode de caractérisation d'impacts environnementaux « Impact 2002+ » a été utilisée. Développée à l'origine par l'EPFL (Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne), cette méthode propose le calcul de 14 indicateurs midpoint d'impacts potentiels sur l'environnement. Impact 2002+ permet, en outre, de normaliser les impacts, en divisant l'impact potentiel obtenu par l'impact total par personne et par année en Europe. Cela permet d'obtenir un poids relatif pour chaque indicateur par rapport au référentiel européen (Figure 33) et ainsi de pouvoir comparer la pression de chaque indicateur sur l'environnement. Si cette phase de normalisation est parfois critiquée en ACV (chapitre I), elle donne tout de même une information qualitative intéressante. Pour le cas d'application de Saint-Etienne Métropole, trois impacts apparaissent importants pour le système « mobilité urbaine » : la pression sur les ressources énergétiques non renouvelables (non-renewable energy), l'impact sur le changement climatique (global warming) et l'inhalation de substances inorganiques (respiration inorganics).

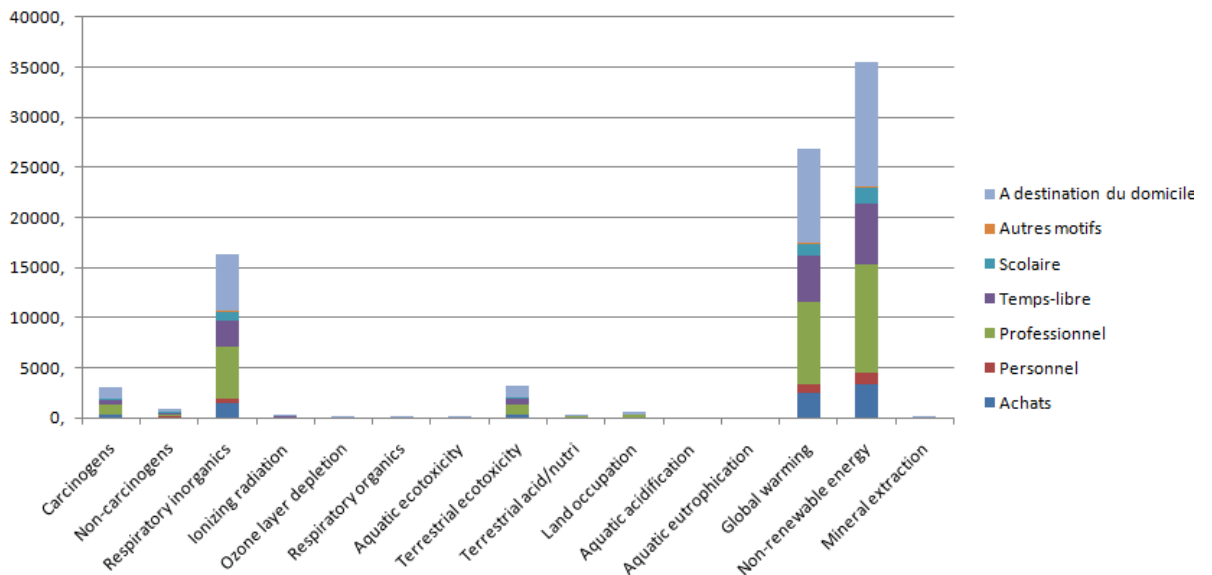


Figure 33 : Impacts potentiels normalisés avec la méthode de caractérisation Impact 2002+ de la mobilité des personnes à Saint-Etienne Métropole, du lundi au vendredi (en équivalent habitant)

II.3.1.5.1 Impact des modes

Concernant les modes de transport, l'automobile apparaît logiquement comme le mode le plus contributeur à l'ensemble des impacts potentiels (Figure 34). Cependant, pour certains impacts, la contribution d'autres modes émerge :

- Le tramway contribue de façon notable au rayonnement ionisant (ionizing radiation). Cela s'explique par le mix électrique français, nucléarisé et utilisé pour fournir le tramway en électricité ;
- Les deux-roues motorisés participent à la création de substances organiques inhalées (respiratory organics). Ils participent notamment de manière importante aux émissions de monoxyde de carbone et d'hydrocarbures imbrûlés ;
- La flotte de bus est particulièrement impactante pour deux catégories d'impact : la création de substances inorganiques inhalées (respiratory inorganics) et l'acidification terrestre (terrestrial acid/nutri) indiquant le potentiel d'oxydation. Cela est dû à l'aspect très émetteur des bus diesel (la totalité de la flotte stéphanoise) en particules (substances inorganiques inhalées) et en NO_x (acidification).

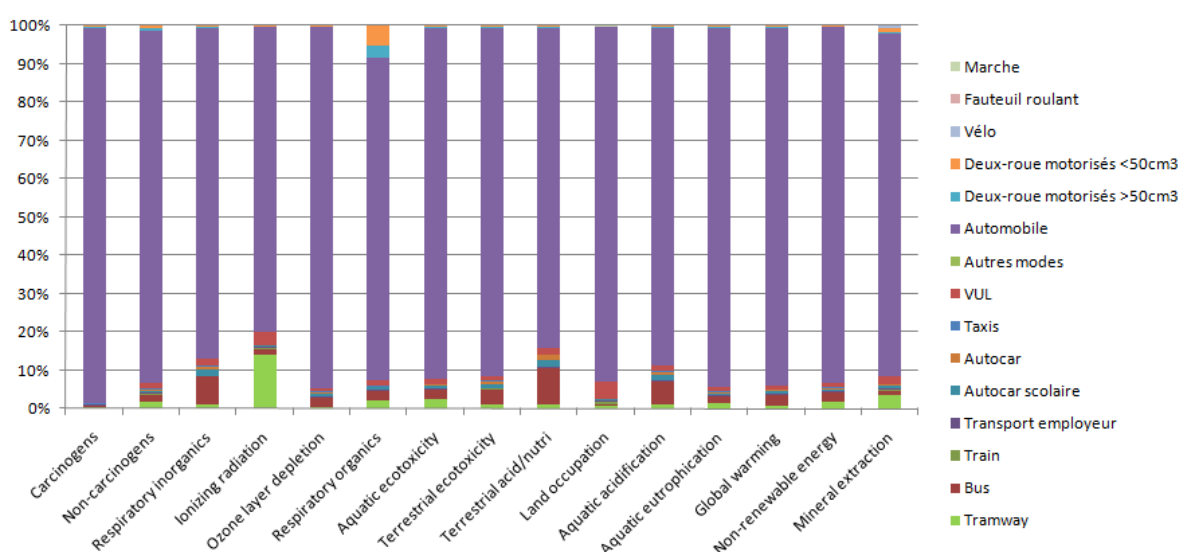


Figure 34 : Contribution des modes de transport aux différentes catégories d'impact potentiel

II.3.2 Résultats pour la mobilité de marchandises

Avant la présentation des résultats, il convient de rappeler la difficulté d'obtenir des données précises pour la mobilité de marchandises et par conséquent le nombre important d'hypothèses faites pour le calcul.

La mobilité de marchandises, dans l'Agglomération stéphanoise, émet en une année 144 ktonnes de CO₂ eq. Cela représente 34,7% des émissions totales (personnes et marchandises comprises). Cela est légèrement supérieur aux chiffres observables dans la littérature qui donnent environ 25% des émissions dues au transport de marchandises (Routhier 2002). Le bilan est largement dominé par la première catégorie, les échanges entre établissements économiques, avec près de 85% des émissions (Figure 35). Notamment, deux catégories représentent chacune plus de 20% des émissions : l'artisanat et les services,

et le petit commerce. L'industrie et le commerce de gros représentent chacune plus de 15% des émissions. Parmi les autres flux, seule la collecte des ordures ménagères occupe une part significative des émissions, avec environ 10%.

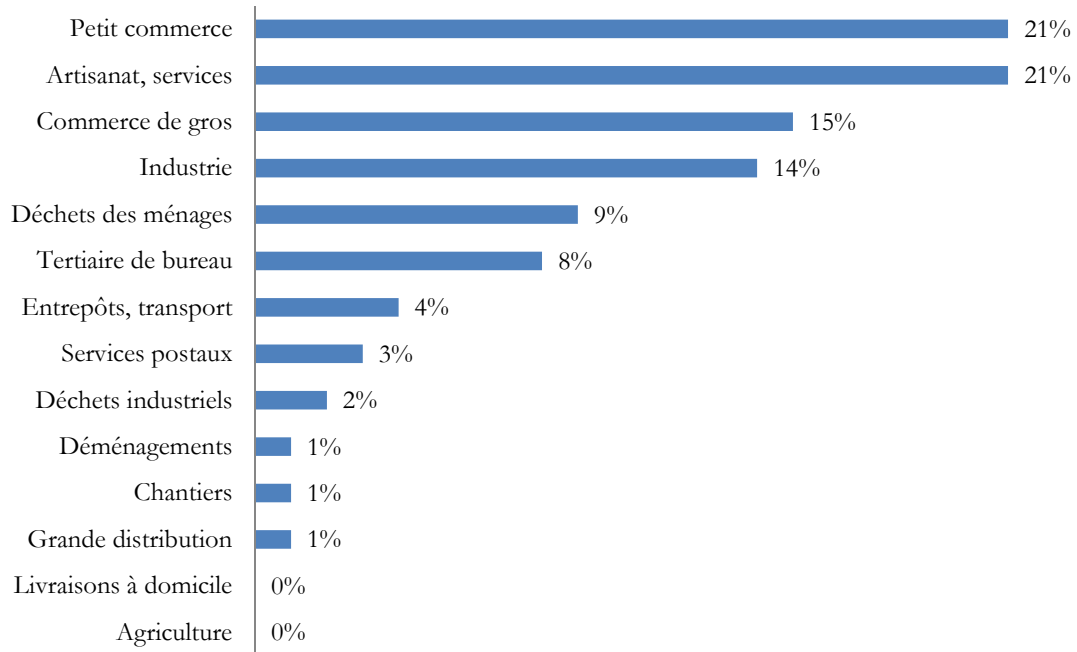


Figure 35 : Contribution de chaque type de marchandises aux émissions de GES à SEM

Comme cela a déjà été évoqué, cette estimation est avant tout donnée à titre indicatif. En effet, le jeu de données disponible n'est pas comparable à celui utilisé pour la mobilité de personnes. Cela a mené à poser un certain nombre d'hypothèses susceptibles de ne pas être représentatives de la situation stéphanoise. Notamment, distances et chargements ont dû être estimés à partir de nombres de mouvements. Egalement, pour certaines catégories, des ratios issus d'études réalisées sur d'autres agglomérations ont été utilisés. La standardisation des études TMV pourrait permettre d'obtenir, à l'avenir des jeux de données satisfaisants pour réaliser l'évaluation. Au-delà de cela, la méthodologie mise en place préconiserait un recensement des déplacements marchandises relevant différentes informations :

- motif du déplacement (marchandise transportée) ;
- distance ;
- mode de transport + taux de chargement, consommation de carburant.

Ces différentes informations permettraient de disposer d'un jeu de données homogène et comparable aux déplacements des personnes (issus des EMD).

II.4 Conclusion et transition

Cette partie a permis de présenter la méthodologie de calcul mise en œuvre et les données qu'elle nécessite. Le principe consiste à croiser deux types de données :

- des données relatives aux déplacements exprimées en pkm (ou tkm) par besoin et par mode de déplacement ;
- des données relatives aux bilans environnementaux des modes, qui peuvent être exprimés dans différentes unités. Par exemple, cela pourra être des g CO₂ eq / pkm.

Ainsi différents niveaux de résultats peuvent être obtenus. La mobilité totale peut être évaluée, mais chacun des besoins de déplacements peut être également isolé et évalué individuellement. Il est aussi possible de comparer entre eux des pkm effectuées pour différents besoins de déplacement.

La quantification des émissions de GES pour l'agglomération de Saint-Etienne a permis de valider les choix méthodologiques en comparant les résultats obtenus à des données de littérature. Notamment, ils ont été comparés à différentes études disponibles sur la question pour différentes agglomérations. Les ordres de grandeur concordant permettent de juger acceptable la méthodologie mise en place.

Des limites, avantages et conditions de généralisation de la méthodologie peuvent être avancées :

- Limites inhérentes aux données

Les premières limites avancées sont très souvent liées à la disponibilité de données. L'objet de ce travail est de fournir une quantification des impacts environnementaux de la mobilité urbaine à l'échelle des grandes aires urbaines de France.

La source idéale de données de mobilité des personnes, à cette échelle, est donc constituée par les EMD. Ces enquêtes présentent l'avantage de fournir une base récente pour la plupart des grandes aires urbaines. Respectant un standard méthodologique, ces enquêtes sont de plus comparables entre villes françaises et également d'années en années. Les EMD présentent néanmoins un certain nombre de limites :

- Uniquement les jours ouvrés : seuls les déplacements ayant lieu les jours ouvrés sont recensés par les EMD. Ces données ne sont donc pas suffisantes pour obtenir une vision complète de la mobilité des individus sur une année.
- Méthodologie française : les EMD sont standardisées pour la France. La méthodologie présentée dans ce chapitre se base sur ces données, notamment pour le choix de la nomenclature des déplacements. En cas de volonté d'appliquer cette méthodologie à des cas d'études en dehors de la France, cela supposera donc certains ajustements (nomenclatures de déplacement, compatibilité aux standards EMD (taille de ville, méthodologie d'enquête, etc.) en cas d'étude comparative notamment).

- Modes de déplacements marginaux pas nécessairement fiables : un grand échantillon de ménages enquêtés permet d'assurer d'obtenir un jeu de données globalement représentatif de la mobilité des individus. Cependant, il est possible que les modes de transports très peu représentés n'apparaissent pas (ou encore plus marginalement) dans l'échantillon enquêté. Cette remarque découle d'une observation sur les données à Saint-Etienne. Par exemple, aucun ménage enquêté n'a déclaré utiliser les transports en commun pour se rendre à la crèche ou encore le deux-roues motorisé pour se rendre à l'université. S'il est envisageable que ces utilisations soient tout à fait marginales, le résultat nul serait tout de même à attribuer au choix aléatoire de l'échantillon.
- Contrainte liée au périmètre de l'EMD : L'évaluation environnementale proposée, se basant sur les données des EMD, est contrainte par le périmètre d'étude de celles-ci. Il n'y a pas de périmètre standardisé pour la réalisation des EMD. Par exemple, à Saint-Etienne, le périmètre a largement augmenté entre les deux dernières enquêtes avant tout du fait de choix politiques. Cela rend la comparabilité entre études difficile dans le temps (bien que les données sur plusieurs périmètres puissent souvent être obtenues du fait du découpage en zones de l'aire d'étude). Cela rend également plus difficile la comparaison entre les agglomérations (malgré la standardisation de la méthode).
- Peu d'information sur les paramètres d'utilisation des modes : Les EMD fournissent peu d'informations sur un certain nombre de paramètres, notamment ceux liés à l'utilisation des modes : taux d'occupation, consommations, etc.

Pour la mobilité de marchandises, la situation est encore plus critique. Il n'existe à l'heure actuelle pas de standard comparable aux EMD pour la mobilité de marchandises. Les enquêtes TMV pourraient présenter un certain nombre d'avantages, et présenter à l'avenir une alternative intéressante. Cependant, ces enquêtes ne suivent pas la même logique que les EMD. Notamment, du fait d'objectifs différents (il s'agit surtout pour les TMV de produire une aide à la décision logistique), les données obtenues ne sont pas du même ordre que celles des EMD. La comparaison, et l'utilisation de ces données dans une étude commune n'est donc pas évidente. Dans le cadre de ce travail, nous préconiserions l'élaboration d'enquêtes sur les marchandises comparables aux EMD, où il serait *a minima* possible de connaître, pour chaque déplacement : le motif (marchandise(s) transportée(s)), la distance, le mode utilisé et certaines caractéristiques (taux de remplissage, consommation). Cela semble néanmoins freiné par l'aspect commercial du transport de marchandises. Si les personnes semblent relativement disposées à fournir des informations sur leurs ménages, et déplacements, les discussions avec les prestataires d'enquêtes logistiques relèvent la difficulté d'obtenir la même précision pour le transport de marchandises (du fait de la concurrence entre transporteurs en particulier).

- Limites liées aux bases de données ACV

L'étude des bases de données disponibles en ACV sur la thématique de la mobilité révèle un certain nombre de limites et manques (H.-J. Althaus 2011). Un certain nombre de ces limites a été levé, en

rendant notamment modifiables les taux d'occupation des véhicules, ou encore les consommations. Aucune modification n'a été cependant apportée pour l'heure à la prise en compte des infrastructures routières qui porte à discussion (avis d'expert) et est par endroits quelque peu opaque (règles d'allocation utilisées). Les résultats obtenus ont été jugés cohérents en ordre de grandeur (avis d'expert) et cette modélisation de l'infrastructure a donc été conservée. Cependant, dans le dernier chapitre de cette thèse, cette question sera abordée plus en détail, et une proposition sera faite.

- Limites de l'ACV pour l'évaluation d'impacts locaux

L'ACV permet une bonne quantification et compréhension des enjeux environnementaux globaux. En effet, si l'on considère un impact global (le changement climatique par exemple) pour lequel le lieu d'émission des polluants n'importe pas, l'ACV est un outil idéal, ayant l'avantage de considérer le cycle de vie complet.

En revanche, elle se contente de donner une appréciation quantitative globale des émissions de polluants locaux, mais sans spatialisation. Il sera par exemple possible de comparer les émissions de particules liées à la mobilité de deux villes, sans pour autant conclure sur la criticité induite par celles-ci. Cette question de la spatialisation sera abordée plus en détail dans le dernier chapitre de ce manuscrit.

- Conditions de généralisation de la méthodologie

L'un des avantages apporté par l'utilisation de la version Developer du logiciel Simapro est l'évolutivité de la méthodologie ainsi que la possibilité de paramétrer. Les données sont renseignées dans un fichier Excel, lui-même relié au logiciel Simapro. Cela permet de très rapidement pouvoir modifier certains paramètres. En tâchant de faire coïncider ce fichier au format des exploitations des EMD, il semble également envisageable d'obtenir à moindre frais, une évaluation rapide des impacts environnementaux à partir de n'importe quelle EMD.

La méthodologie a été construite pour être appliquée aux grandes aires urbaines de France, mais seulement, dans ce chapitre, testée sur l'agglomération stéphanoise. Cette partie propose de donner un certain nombre de critères et contraintes d'applicabilité de la méthode à d'autres cas que celui de Saint-Etienne.

- Un premier point positif, déjà avancé, est la standardisation des EMD qui assure d'avoir des jeux de données comparables selon les villes considérées. Notamment, la nomenclature des besoins, basée sur les motifs de déplacement des EMD est commune aux différentes études et donc utilisable en l'état dans la méthodologie.
 - o Cet avantage évoqué a son pendant négatif. L'utilisation de la méthodologie sur d'autres cas d'études (petites aires urbaines sortant du périmètre des EMD ou villes étrangères) n'est pas aussi simple. Pour ce qui est des plus petites villes en France,

l'EDVM (Enquête Déplacements Ville Moyenne) garantit un standard, comparable aux EMD (la méthodologie EDVM est également standardisée par le Certu). Il semble donc envisageable d'adapter, à moindre frais, la méthodologie à ces villes. Pour les villes étrangères, en revanche, cela semble plus compliqué. Si l'élaboration d'une méthodologie similaire semble envisageable (en croisant des données de déplacement à une base de données ACV), il sera par contre difficile de comparer les résultats obtenus, tant que l'enquête permettant de collecter les données de déplacements n'est pas la même. Cependant, une comparaison entre villes des EMD et des EDVM ne présente pas d'intérêt particulier *a priori*. Il semble qu'une condition d'applicabilité directe soit de disposer de données d'EMD sur le cas souhaité (sans pour autant que cela constitue une condition absolue).

- La base de données ACV « mobilité urbaine » mise au point est évolutive. Au cas par cas, elle pourra être enrichie des modes de transport présent dans telle ou telle ville. De plus, la possibilité de jouer facilement (sous Excel) sur un certain nombre de paramètres, garantit de pouvoir s'adapter à moindre frais à différents cas d'étude. Un certain nombre de manques ou limites ont été relevés. L'évolution actuelle des BDD (notamment Ecoinvent) tend à plus de paramétrabilité. La variabilité induite dans les résultats par de simples paramètres comme le taux d'occupation montre les limites d'une BDD restreinte et non paramétrable. Sur ces paramètres précisément, la BDD devrait soit permettre le paramétrage, soit offrir une gamme plus large de possibilités.

Le but à terme est d'étudier la mobilité à l'échelle des grandes aires urbaines de France, celles de plus de 250 000 habitants. Partant du postulat qu'un cas moyen ne parviendrait pas à refléter les disparités possibles entre les aires urbaines, il est nécessaire de comparer différentes villes. Pour cela, un jeu de variables influentes pour la mobilité a été identifié dans la littérature et renseigné en données pour les 38 grandes aires urbaines de France. Les méthodes d'analyse factorielle des données et de classification hiérarchique ont ensuite été utilisées afin de proposer une typologie des aires urbaines représentatives de phénomènes de mobilité a priori différents. Ainsi la partie suivante présente la proposition de classification ainsi que l'application de la méthodologie aux différentes aires urbaines identifiées.

III. Chapitre III : Identification de parangons d'aires urbaines et application de la méthodologie d'évaluation à différents cas particuliers

Les chapitres précédents ont respectivement permis de :

- Dresser un panorama de la mobilité urbaine et de ses impacts sur l'environnement. Ce panorama a permis d'avancer les hypothèses de l'importance de prendre en compte deux notions, manquantes jusqu'à présent dans la littérature à l'échelle territoriale :
 - o les impacts environnementaux ne se situent pas uniquement lors du déplacement (ou pour simplifier, lors de la phase d'usage des véhicules), mais tout au long du cycle de vie. La littérature le constate à l'échelle du véhicule, mais peu d'études l'analysent à l'échelle du territoire ;
 - o les individus ne se déplacent pas de la même manière quel que soit le motif. Un déplacement va répondre à un besoin et sera influencé par la nature de ce dernier (choix du mode de déplacement, manière de le réaliser). Le bilan environnemental associé est donc potentiellement influencé également par son motif. Si c'est le cas, il peut être intéressant de pouvoir prioriser des actions sur les déplacements les plus émetteurs, s'ils présentent une marge d'amélioration possible intéressante.

Cette partie a également permis de dresser une liste de paramètres pouvant avoir une influence sur la mobilité urbaine et a fortiori sur son bilan environnemental, en croisant des études de différentes disciplines disponibles dans la littérature (socio-démographique, économique, géographique).

- Mettre en place une méthodologie d'évaluation prenant en compte les deux notions évoquées dans le point précédent. Cette méthodologie consiste à croiser des données de déplacements classées dans différentes catégories de motifs (issues des EMD) à des données environnementales issues à l'origine de la base de données ACV Ecoinvent et adaptées pour l'occasion à la mobilité en France.

Cette méthodologie a été appliquée à l'agglomération de Saint-Etienne, dans le but de la tester et la valider. Cela a permis également d'obtenir un certain nombre de premiers résultats, sur la mobilité à Saint-Etienne.

Le chapitre qui suit vise à appliquer la méthodologie plus largement, afin de remplir l'objectif initial de thèse qui ne se limite pas à l'étude d'un cas particulier, mais cherche au contraire à dresser un panorama plus large de la mobilité urbaine à l'échelle française. En effet, cela part du principe avancé que des disparités existent entre les grandes aires urbaines en France, impliquant des mobilités différentes et, par conséquent, des bilans environnementaux potentiellement différents également. La démarche pour parvenir à cela se compose de trois sous-parties :

- Détermination de parangons d'aires urbaines : partant du principe que les résultats du cas d'application stéphanois ne peuvent pas être généralisés d'emblée et qu'il n'est pas possible d'appliquer aisément la méthodologie développée à chacune des grandes aires urbaines en

France, il a été décidé de regrouper entre elles les villes se ressemblant statistiquement, puis d'en isoler des parangons afin de leur appliquer la méthodologie d'évaluation. Pour cela, les méthodes d'analyses multivariées ont été utilisées, en comparant l'ensemble des grandes aires urbaines de France (plus de 250 000 habitants) selon un jeu de variables constitué d'après la liste de déterminants de la mobilité dressée dans le chapitre I. Parmi les 36 aires urbaines, trois classes ont été identifiées et caractérisées. La typologie se complète d'un quatrième ensemble regroupant les villes ne rentrant pas dans les classes identifiées, dont l'Agglomération de Saint-Etienne.

- Application de la méthodologie à une ville représentative de chaque classe, le parangon : devant la difficulté de créer pour chaque classe un cas fictif représentatif, il a été décidé de sélectionner pour chaque groupe la ville qui le représentait le mieux, le parangon. En analyse multivariée, il s'agit de celui étant le plus proche du centre de gravité du groupe. Ainsi, trois aires urbaines représentatives d'une classe particulière ont été identifiées : Bordeaux, Toulon et Valenciennes. Pour chacune de ces agglomérations, une collecte de données spécifique a été réalisée et la méthodologie appliquée.
- Comparaison des aires urbaines étudiées : il a alors été possible de comparer les résultats des différentes aires urbaines retenues, suivant les indicateurs et les questions relevées sur le cas d'application (chapitre II). Les résultats globaux sont comparés (émissions par habitant, part des différents besoins de déplacement dans le total, part des modes) mais également les résultats discrétisés par besoin.

Cette partie se concentrera sur la mobilité des personnes les jours ouvrés (le périmètre des EMD). En effet, la disponibilité actuelle de méthodes et de données ne permet pas de bâtir des scénarios comparables pour différents aires urbaines en matière de mobilité de marchandises. De même les déplacements de week-end ne sont pas collectés selon une démarche standardisée comme peuvent l'être ceux des jours ouvrés.

III.1 Proposition d'une typologie d'aires urbaines par analyses multivariées

Il convient de rappeler ici que cette partie n'a pas pour objectif final de proposer une typologie urbaine. Dans le but d'isoler des cas a priori remarquables d'aires urbaines, pour lesquels il est envisageable d'obtenir des résultats intéressants dans la comparaison des bilans environnementaux, une approche typologique a été proposée ici. Cependant, il est jugé qu'un approfondissement serait nécessaire à l'établissement plus poussé de classes urbaines. Ainsi, cette partie relève ainsi également un manque dans la littérature de telles propositions typologiques concernant la mobilité urbaine et ses déterminants.

III.1.1 Détermination d'une typologie d'aires urbaines

L'analyse multivariée a été utilisée afin de proposer une typologie d'aires urbaines. Dans cette partie, l'analyse multivariée est tout d'abord présentée, puis les données utilisées (variables et individus). Le choix a été de se limiter aux paramètres relevés influençant la mobilité en chapitre I, principalement à partir des publications de De Witte (2013) et Dargay (2009) étant elles-mêmes des revues de littérature sur le sujet. A la fin de la mise en place de cette typologie est donnée une liste de paramètres qui pourraient, selon nous, permettre d'améliorer cette proposition de classification. Cette étape étant un outil intermédiaire pour aller vers l'évaluation environnementale à proprement parler, la liste de variables a été limitée à celles relevées dans ces deux revues de littérature récentes. Les résultats de cette classification sont donc à prendre avec les précautions que ces hypothèses impliquent.

III.1.1.1 L'analyse multivariée

La grande famille des méthodes d'analyse multivariée peut se classer en deux catégories :

- Les méthodes explicatives : elles cherchent à expliquer une partie des variables (dépendantes) par le reste des données (les variables indépendantes). Elles regroupent notamment les méthodes de régression ou d'analyse de la variance ;
- Les méthodes descriptives : elles ont pour objet la description d'un jeu de variables (en le résumant ou le représentant graphiquement).

Dans ce travail, nous nous sommes intéressés aux méthodes descriptives. En particulier, disposant d'un tableau de données croisant des individus (en ligne) et des variables quantitatives (colonnes), l'Analyse en Composantes Principales (ACP) est applicable à ce type de données (Husson et al. 2009).

L'ACP est utile pour un jeu de données décrit par de nombreuses variables, dont certaines peuvent être corrélées. L'ACP cherche alors à réduire ce nombre de variables en créant de nouvelles variables, non corrélées, combinaisons linéaires des variables initiales ; ces nouvelles variables descriptives sont appelées composantes principales (CP). D'une représentation dans un repère R_0 à n dimensions (où n = nombre de variables), l'ACP permet de passer à un repère R_1 à q dimensions, avec $q \leq n$ (où q = nombre de composantes principales). De plus, la méthode cherche à maximiser la variance sur les premières CP, si bien qu'un nombre réduit de CP peut être suffisant à expliquer le jeu de données. Les coordonnées des individus, qui étaient dans le repère R_0 constituées des données collectées, peuvent être calculées pour le repère R_1 , et les individus représentés dans ce nouveau repère. La réduction du nombre de composantes expliquant la variance permet alors en principe de comprendre et d'expliquer l'échantillon étudié.

III.1.2 Les individus (les aires urbaines)

Comme cela a été annoncé précédemment, l'objectif est l'étude de la mobilité à l'échelle des grandes aires urbaines françaises, soit celles de plus de 250 000 habitants. Ce seuil de 250 000 habitants a été fixé en suivant celui régulièrement utilisé dans les études de territoires urbains en France et notamment dans l'étude des transports (CERTU 2011). C'est également la limite de population à partir de laquelle s'applique l'obligation récente de mettre en place un plan de protection de l'atmosphère (articles L222-4 et R222-13 du code de l'environnement). De ces aires urbaines a été exclue l'Île-de-France, considérée en pratique comme un cas à part dans les études de mobilité (CERTU 2011; Le Néchet & Aguilera 2011). De même seules les aires urbaines métropolitaines ont été conservées. En tout, 36 aires urbaines comptaient plus de 250 000 habitants lors du Zonage en Aires Urbaines (ZAU) de 2002 (Tableau 15). Cette date a été prise comme référence, car cohérente avec les EMD disponibles. En effet, le dernier ZAU datant de 2009, toutes les aires urbaines n'ont pas fait l'objet d'EMD depuis (ou certains traitements des données sont encore en cours).

Tableau 15 : Aires urbaines considérées pour l'élaboration d'une typologie d'aires urbaines

Aires urbaines		
Marseille – Aix	Grenoble	Orléans
Lyon	Rouen	Clermont-Ferrand
Lille	Valenciennes	Béthune
Nice	Nancy	Mulhouse
Toulouse	Metz	Dijon
Bordeaux	Montpellier	Le Havre
Nantes	Tours	Angers
Toulon	Saint-Etienne	Reims
Douai – Lens	Rennes	Brest
Strasbourg	Avignon	Pau
Le Mans	Perpignan	Caen
Limoges	Dunkerque	Bayonne

Géographiquement, ces aires urbaines couvrent l'ensemble du territoire métropolitain de manière relativement homogène (Figure 36). Elles se retrouvent tout de même davantage dans la partie nord (60%) mais également proche des limites – frontières ou littoral – du territoire (70%).

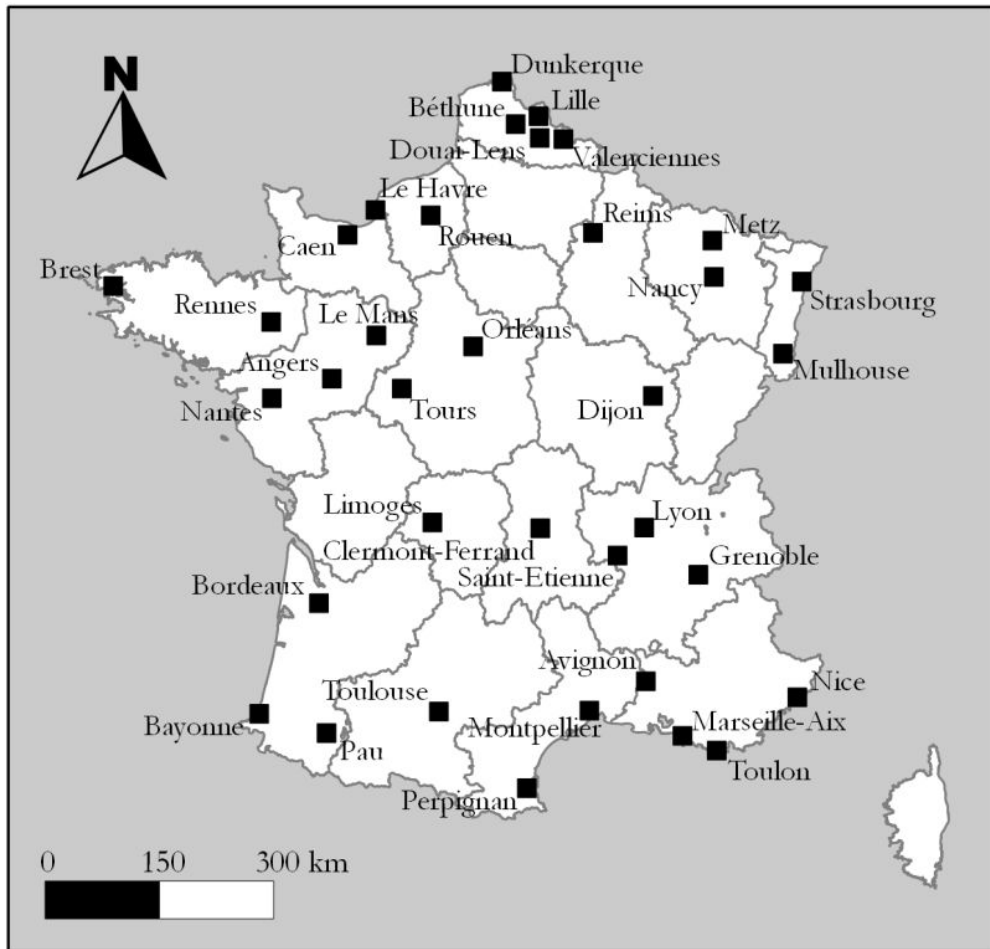


Figure 36 : Représentation géographique des aires urbaines retenues pour l'élaboration d'une typologie d'aires urbaines

III.1.3 Les variables

Ainsi que cela a été annoncé en début de ce chapitre, les variables retenues pour la détermination de la typologie d'aires urbaines sont issues de la littérature sur les déterminants de mobilité. Elles concernent plusieurs thèmes allant des variables sociologiques aux déterminants spatiaux. Cette partie dresse la liste des variables utilisées pour l'analyse, ainsi que la forme sous laquelle elles ont été collectées dans la littérature. Dans un souci de cohérence, la diversité des sources a été, dans la mesure du possible, restreinte. En effet, les méthodes d'analyse multivariée observent la manière dont se comportent les variables, les unes par rapport aux autres, pour l'ensemble des individus. Certains paramètres pouvant beaucoup évoluer avec les années, ou le périmètre retenu, il était important de limiter les sources utilisées et, de fait, les possibles disparités d'horizons spatiaux ou temporels. Dans un souci de comparabilité des cas et de cohérence aux périmètres préférentiels des EMD, les données ont été récoltées, dans la mesure du possible, à l'échelle de l'aire urbaine.

III.1.3.1 Variables socio-démographiques

La première catégorie regroupe les 19 variables socio-démographiques recensées et sélectionnées (Tableau 16). Afin d'apporter des éclairages complémentaires, trois variables sont plus amplement décrites ci-dessous :

- Le **niveau d'éducation** est défini en fonction du plus haut diplôme obtenu par un individu. La variable BEPC regroupe donc par exemple l'ensemble des individus ayant stoppé leurs études à l'obtention d'un BEPC.
- Le **nombre d'enfants** est renseigné par la part des familles ayant x enfants âgés de moins de 25 ans (x allant de 0 à 4 ou plus) en suivant les catégories déterminées par le recensement de population (INSEE 2009).
- La **motorisation des ménages** est donnée en nombre moyen de véhicules par individu du ménage. Il est courant dans la littérature de la voir exprimée en nombre de ménages possédant au moins x voitures, la part des individus motorisés par tranche d'âge ou encore en nombre moyen de voiture par ménage. L'unité retenue ici a été celle la plus relevée dans les rapports publics d'EMD.

Tableau 16 : Déterminants sociaux-démographiques de la mobilité urbaine

Variable	Définition	Unité	Source
REV	Revenu moyen net des habitants de l'aire urbaine (AU)	Euros	Fiches INSEE
AGE	Age moyen des habitants de l'AU	Années	Fiches INSEE
AUCDIPL	Part des non-diplômés	% de population	Fiches INSEE
CEP	Part des diplômés du certificat d'études primaires	% de population	Fiches INSEE
BEPC	Part des diplômés d'un BEPC	% de population	Fiches INSEE
CAPBEP	Part des diplômés d'un CAP ou BEP	% de population	Fiches INSEE
BAC	Part des bacheliers	% de population	Fiches INSEE
ENSSUPC	Part de diplômés de l'enseignement supérieur court (< BAC+5)	% de population	Fiches INSEE
ENSSUPL	Part de diplômés de l'enseignement supérieur long (> BAC+5)	% de population	Fiches INSEE
PARITE	Proportion hommes/femmes	Nombre d'hommes / nombre de femmes	Fiches INSEE
CHOM	Taux de chômage	% des 15-64 ans	Fiches INSEE
ZEROENF	Part des familles sans enfant	% des foyers	Fiches INSEE
UNENF	Part des familles à un enfant	% des foyers	Fiches INSEE
DEUXENF	Part des familles à deux enfants	% des foyers	Fiches INSEE
TROISENF	Part des familles à trois enfants	% des foyers	Fiches INSEE
QUAENF	Part des familles de quatre enfants et plus	% des foyers	Fiches INSEE
MOT	Motorisation des ménages	Nombre de véhicules par individu	EMD
MAIS	Part des individus vivant en maison	% des logements	Fiches INSEE
APPART	Part des individus vivant en appartement	% des logements	Fiches INSEE

III.1.3.2 Variables géographiques

La deuxième catégorie regroupe 15 variables spatiales (Tableau 17). De manière analogue au paragraphe précédent, des informations complémentaires sur les variables sont tout d'abord données.

- Pour les **accès au bus** (ACCESBUS) **et aux autres TCU** (ACCESRAIL), le nombre moyen de ligne par unité de surface a été calculé. Il a ainsi été considéré que plus ce nombre est élevé, plus le réseau est (en moyenne) maillé et par conséquent, plus la disponibilité en TCU est élevée. Les données proviennent de diverses sources d'information sur les réseaux des aires urbaines étudiées (rapports annuels des exploitants, rapports des Observatoires Régionaux des Transports (ORT), EMD, requêtes aux exploitants ou collectivité par email, rapports de l'Union des Transports Publics (UTP)). Ces sources sont indiquées « diverses » dans le Tableau 17. Quelques exemples de sources utilisées sont donnés ici (AudaB 2008; Epures 2010; CERTU 2011; Siturv 2012)). Dans la mesure du possible, elles ont été collectées pour les années 2009-2010, à l'échelle de l'aire urbaine (cohérences temporelle et spatiale avec les autres données). Cette variable ne met cependant pas en évidence les inégalités sur un même territoire, puisqu'elle considère un maillage homogène.
- Les **autres informations relatives au réseau de TCU** ont été récoltées grâce aux mêmes sources diverses que celles citées au point précédent. Ont été retenues la longueur totale du réseau, le nombre de voyages annuels par habitant et le nombre de places-kilomètre offertes (pko) qui se calcule en multipliant le nombre annuel de kilomètres commerciaux réalisés par les TCU dans une ville par la capacité maximale de chacun des modes.
- Le **type d'occupation du territoire** est renseigné en termes de pourcentage de surface, en prenant pour base les catégories définies dans la base de données européenne d'occupation biophysique des sols : Corine Land Cover (EEA 2007). Elle est complétée, en France, par le Service de l'Observation des Statistiques du Commissariat Général au Développement Durable (CGDD) du Ministère de l'Environnement, du Développement Durable et de l'Energie (MEDDE). Les données retenues sont celles diffusées au travers de fiches spécifiques à chaque aire urbaine par le CGDD.
- La **qualité de l'offre de stationnement** a été évaluée à partir des données de l'Enquête Stationnement réalisée par le CERTU en 2005 sur 166 villes en France dont les données ont été rendues disponibles en 2009 sous la forme de CD-ROM (CERTU 2009). Deux indicateurs ont été renseignés : le nombre de places de parking payantes sur voiries et celui disponible en parc de stationnement.

Tableau 17 : Déterminants spatiaux de la mobilité urbaine

Variable	Définition	Unité	Source
DENS	Densité de population	Nombre d'habitants par km ²	Fiches CGDD
SUP	Superficie de l'aire urbaine	km ²	Fiches CGDD
ACCESBUS	Accès au réseau de bus	Nombre moyen de ligne de bus par km ²	Diverses
ACCESRAIL	Accès aux réseaux de tram ou métro	Nombre moyen de ligne de TC guidé par km ²	Diverses
TISURBCONT	Part du tissu urbain continu	% de la superficie totale	Fiches CGDD
TISURBDISC	Part du tissu urbain discontinu	% de la superficie totale	Fiches CGDD
AUTSOLART	Part des autres sols artificialisés	% de la superficie totale	Fiches CGDD
AGRI	Part des territoires agricoles	% de la superficie totale	Fiches CGDD
BOIS	Part des espaces verts ou boisés	% de la superficie totale	Fiches CGDD
ZHEAU	Part des zones humide ou des plans d'eau	% de la superficie totale	Fiches CGDD
PAYVOIRIE	Nombre de places payantes sur voirie	Unités	Enquête stationnement (CERTU)
PARKPAY	Nombre de places de parking public payantes	Unités	Enquête stationnement (CERTU)
LONGRES	Longueur totale du réseau de TC	Km	Diverses
VOYHAB	Nombre de voyages par habitant en TC	voy/hab	Diverses
PKO	Places kilomètres offertes en TC	Nombre annuel de places de TC par km de réseau	Diverses

III.1.3.3 Variables propres aux trajets

Enfin, la troisième catégorie regroupe 10 variables dites propres aux trajets (

Tableau 18). De manière analogue au paragraphe précédent, des informations complémentaires sur les variables sont tout d'abord données.

- Le **coût d'un ticket de TCU** provient de divers documents (les mêmes que les informations sur le réseau présentées dans la partie précédente (rapports annuels des exploitants, rapports des Observatoires Régionaux des Transports (ORT), EMD, requêtes

aux exploitants ou collectivité par email, rapports de l'Union des Transports Publics (UTP)).

Tableau 18 : Déterminants propres aux trajets

Variable	Définition	Unité	Source
DOMTRAV	Part des déplacements domicile-travail	% des déplacements	EMD
DOMETUDES	Part des déplacements pour l'école et les études	% des déplacements	EMD
ACHATS	Part des déplacements pour les achats	% des déplacements	EMD
AUTRESDEP	Part des autres déplacements	% des déplacements	EMD
DISTMOY	Distance moyenne d'un déplacement	Km	EMD
DUREEMOY	Durée moyenne d'un déplacement	min	EMD
COUTTCU	Coût d'un ticket de TC	Euros	Diverses
TEMP	Température	°C	Météo France
PREC	Précipitations	mm	Météo France
ENS	Ensoleillement	jours/an	Météo France

III.1.3.4 Résultats de l'analyse

L'ACP a été réalisée à l'aide du logiciel SPAD dans sa version 4 sur la matrice centrée-réduite. Centrer et réduire la matrice permet de mettre l'ensemble des variables observées sur un même point d'égalité ; c'est-à-dire que la grandeur relative des variables et leur variance propre n'auront pas plus de poids que les autres.

III.1.3.5 Résultats de l'ACP

III.1.3.5.1 Résultats sur l'axe CP1

III.1.3.5.1.1 Les variables

Les variables ont été ici représentées dans le plan factoriel constitué des deux premières CP et représentant 42% de l'inertie cumulée (Figure 37)⁴². Plus le cosinus entre deux variables est faible, plus elles sont corrélées. C'est le cas par exemple des variables LONGRES (longueur du réseau) et PKO (places-kilomètre offertes). Plus la coordonnée d'une variable est élevée selon un axe, plus elle contribue à la formation de celui-ci (comme la variable QUAENF pour l'axe CP1).

⁴² Les représentations des variables dans les plans factoriels (CP1 ; CP3) et (CP2 ; CP3) sont disponibles en annexe

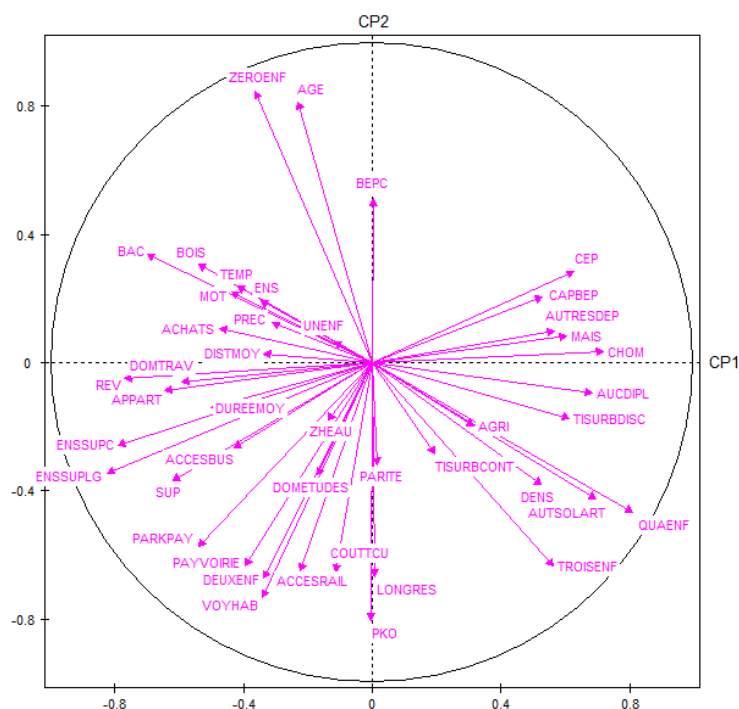


Figure 37 : Représentation des variables dans le plan factoriel (CP1 ; CP2)

Les variables contribuant le plus à l'axe CP1 ont été relevées en deux catégories : les contributions négatives et positives (Tableau 19). Seules celles ayant une coordonnée supérieure à 0,6 en valeur absolue ont été conservées. Cependant, celles ayant une coordonnée comprise entre 0,5 et 0,6 sont également indiquées entre parenthèses.

L'axe 1 reflète une opposition pour le niveau d'éducation entre des populations ayant, en moyenne, une proportion moins importante de titulaires de diplômes de l'enseignement supérieur (ENSSUPC et ENSSUPLG) et de bacheliers (BAC), contre d'autres ayant plus de non diplômés (AUCDIPL) ou de personnes s'étant arrêtées au certificat d'études primaires (CEP) (et dans une moindre mesure au CAP ou BEP (CAPBEP)). Le faible niveau d'éducation moyen est associé à un plus fort taux de chômage (CHOM) et un revenu moyen moins élevé (REV). La part des déplacements pour raison professionnelle (DOMTRAV) est moins importante, compensée par celles des autres déplacements (AUTRESDEP) (hors travail, études et achats). Les populations se caractérisent également par des ménages plus nombreux (plus de familles à 3 enfants ou plus (TROISENF et QUAENF)). Géographiquement, le territoire se caractérise par des parts plus importantes pour les autres sols artificialisés (AUTSOLART) (marqués par la place de l'industrie notamment) et un tissu urbain discontinu (TISURBDISC) (représentatif d'une multiplication des pôles urbains distincts) au détriment des espaces verts et boisés (BOIS), cela sur des aires urbaines de faible superficie (SUP). Pour les logements, la part de maisons individuelles (MAIS) est plus importante que la moyenne, alors que celle des appartements (APPART) est plus faible.

Tableau 19 : Variables contributives à l'axe CP1

Contributions négatives	Contributions positives
Enseignement supérieur long	Foyers avec 4 enfants et plus
Enseignement supérieur court	Taux de chômage
Revenu	Part des autres sols artificialisés
Baccalauréat	Part des non diplômés
Proportion d'appartements	Part des titulaires d'un CEP
Superficie de l'aire urbaine	Part du tissu urbain discontinu
(Part des déplacements domicile-travail)	Part de maisons
(Part des espaces verts ou boisés)	(Part des autres déplacements (hors travail,
(Nombre de places de parking payantes)	(Foyers avec 3 enfants)
(Durée moyenne d'un déplacement)	(Part des titulaires d'un CAP ou BEP)

III.1.3.5.1.2 Les individus (aires urbaines)

De manière analogue à la représentation des variables, les coordonnées des individus selon chaque axe sont observées afin de déterminer ceux qui leur sont corrélés. Sont retenus car jugés significatifs ici les individus dont la coordonnée sur l'axe est plus grande que la racine carrée de la première valeur propre, ici : $\sqrt{10,73} = 3,27$ (Tableau 20). Ces individus ont été représentés dans le plan factoriel (CP1 ; CP2), avec en vert, ceux contribuant positivement à CP1 et en rouge ceux contribuant négativement (Figure 38). Des renseignements sur les variables associées, organisées par thèmes ont également été indiqués. Le diamètre des points représentant les individus est de taille proportionnelle à leur contribution à l'inertie des deux axes constituant le plan factoriel.

Tableau 20 : Individus contributeurs à l'axe CP1

Contributions négatives	Contributions positives
Nice	Douai-Lens
Montpellier	Valenciennes
Grenoble	Béthune
Toulouse	Dunkerque
	Lille

L'axe 1 permet, au regard des contributions positives, de regrouper 5 aires urbaines qui se situent toutes dans la région Nord-Pas-de-Calais. Elles sont mises en opposition à quatre villes de la partie Sud de la France, toutes au-dessus de la médiane en termes de population, parmi les 36 individus de l'échantillon.

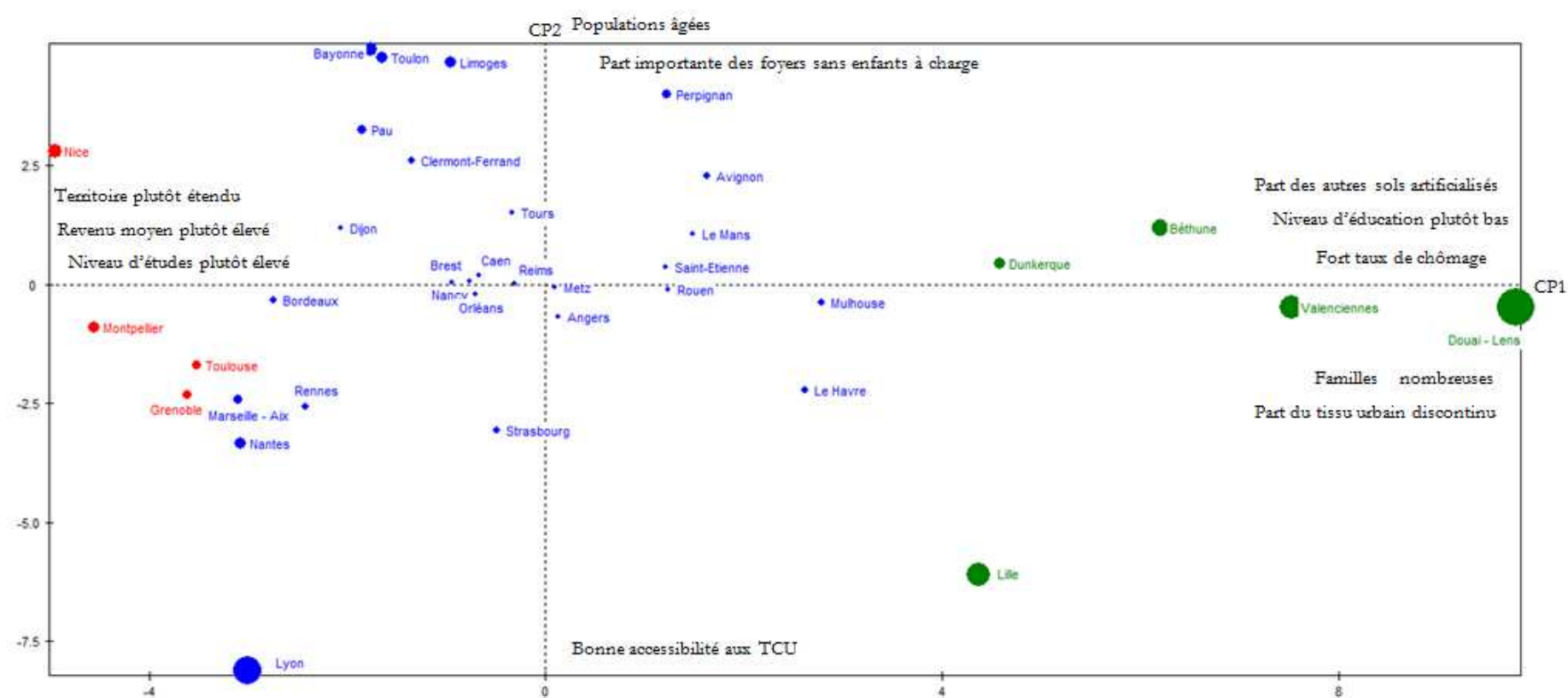


Figure 38 : Représentation des individus dans le plan factoriel (CP1 ; CP2)

III.1.3.5.2 Résultats sur l'axe CP2

III.1.3.5.2.1 Les variables

De même que pour l'axe 1, les variables contribuant à l'axe CP2 sont relevées (Tableau 21).

Tableau 21 : Variables contributives à l'axe CP2

Contributions négatives	Contributions positives
Places kilomètres offertes (PKO) par les TCU	Foyers sans enfants
Voyages par habitant en TCU	Age moyen
Foyers avec 2 enfants	(Titulaires d'un BEPC)
Longueur du réseau de TCU	
Accessibilité aux TCU (hors bus)	
Coût du ticket de TCU	
(Foyers avec 3 enfants)	
(Places de stationnement payant sur voirie)	
(Nombre de places de parking payantes)	

L'axe 2 montre une opposition entre des ménages en moyenne plus âgés et sans enfant à charge. Une part importante de ces derniers se sont arrêtés au BEPC en terme d'éducation. A l'opposé sont observés des ménages ayant en moyenne de 2 à 3 enfants. Cette catégorie se distingue par une bonne qualité du réseau de TCU (PKO, longueur du réseau, accessibilité) se traduisant par une utilisation plus importante par habitant, malgré un coût du ticket en moyenne plus élevé. Un nombre important de places de stationnement est également relevé.

III.1.3.5.2.2 Les individus

De manière analogue à la représentation des variables, les coordonnées des individus selon chaque axe sont observées afin de déterminer ceux participant à leur construction (Tableau 22).

Tableau 22 : Individus contributeurs à l'axe CP2

Contributions négatives	Contributions positives
Lyon	Bayonne
Lille	Toulon
Nantes	Limoges
	Perpignan
	Pau

L'axe 2 permet, au regard des contributions positives, de regrouper 5 aires urbaines qui se situent toutes dans la partie Sud de la France. A noter que les trois aires urbaines suivantes, pour les

coordonnées positives suivent aussi cette règle géographique : Nice, Clermont-Ferrand et Avignon. Les trois aires urbaines contribuant négativement à l'axe 2 ont la particularité d'appartenir aux dix aires urbaines les plus peuplées de l'échantillon. Elles sont d'ailleurs suivies d'autres agglomérations suivant cette tendance : Strasbourg, Rennes, Marseille-Aix.

III.1.3.5.3 Résultats sur l'axe CP3

III.1.3.5.3.1 Les variables

De même les variables contribuant à l'axe CP3 sont relevées (Tableau 23).

Tableau 23 : Variables contributives à l'axe CP3

Contributions négatives	Contributions positives
Ensoleillement moyen annuel	Part de territoires agricoles
Température moyenne annuelle	Parité
Foyers avec un enfant unique (Chômage)	(Titulaires d'un CAP ou BEP)
(Densité de population)	
(Part du tissu urbain continu)	
(Part d'espaces verts ou boisés)	

L'axe 3 met en avant des aires urbaines bénéficiant d'un climat en moyenne ensoleillé et chaud. La population comprend une part importante de familles à enfant unique. Les aires urbaines sont plutôt denses avec une part importante de tissu urbain continu, malgré une part également importante d'espaces verts ou boisés. Enfin, le taux de chômage est assez élevé par rapport à la moyenne. A l'opposé se trouvent des aires urbaines ayant une part forte de territoires agricoles. Ces aires urbaines s'approchent d'avantage de la parité (avec plus d'hommes que la moyenne). Enfin, elles comptent une part plus importante de titulaires d'un CAP ou BEP.

III.1.3.5.3.2 Les individus

De manière analogue à la représentation des variables, les coordonnées des individus selon chaque axe sont observées afin de déterminer ceux participant à leur construction (Tableau 22).

Tableau 24 : Individus contributeurs à l'axe CP3

Contributions négatives	Contributions positives
Marseille-Aix	Rennes
Nice	Brest
Toulon	Le Mans
Montpellier	
Perpignan	

Il se trouve que l'axe 3 oppose des aires urbaines du Sud (et plutôt Sud-Est) de la France à des aires urbaines du Nord-Ouest de la France. Les aires urbaines contribuant également positivement à l'axe sont d'ailleurs Nantes, Caen et Angers. Ces regroupements spatiaux sont d'autant plus étonnants que les informations géographiques (coordonnées) n'apparaissent pas dans les variables utilisées pour l'ACP.

III.1.3.6 Typologie par Classification Ascendante Hiérarchique (CAH)

III.1.3.6.1 Résultats de la classification

Cette partie vise à concrétiser la proposition de typologie d'aires urbaines découlant des résultats d'ACP. Elle propose pour cela d'appliquer une Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) aux composantes principales identifiées. Il est important de rappeler ici que les résultats de cette CAH ne constituent pas une fin en soit. Pour ce travail de thèse, le but de cette partie est bien d'identifier des aires urbaines potentiellement différentes et dont la comparaison de l'application de la méthodologie d'évaluation augure des résultats parlants.

L'observation des axes et de leurs contributeurs permet certains premiers rapprochements entre individus sur les critères observables pour ces axes. Cependant, afin de ne pas oublier d'information, il est important de considérer le nombre d'axes permettant de maximiser l'inertie prise en compte. Dans le cas contraire, le risque est, par exemple, de regrouper tous les individus contributeurs de l'axe 1 alors que l'un d'eux pourrait potentiellement être davantage contributeur pour un autre axe. A titre d'exemple, l'aire urbaine de Perpignan apparaît dans l'explication des axes 2 et 3 (Tableau 22 ; Tableau 24).

Les méthodes de classification vont permettre de regrouper les individus proches. Elles laissent le choix du nombre d'axes à considérer. La Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) utilise les résultats de l'ACP et cherche à regrouper entre eux les individus les plus proches (en distance euclidienne) dans l'espace multi-dimensionnel constitué par les composantes principales. Ici, cette méthode a été utilisée sur l'ensemble des composantes principales, afin de considérer toute l'inertie portée par les axes. Pour rappel, la distance entre les aires urbaines A et B s'exprime ainsi :

$$d(A; B) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}, \text{ où } n \text{ est le nombre de CP,}$$

et $(x_1, \dots, x_n)$ et $(y_1, \dots, y_n)$ les coordonnées respectives de A et B dans l'espace des CP

Cette méthode de classification permet d'identifier cinq classes et leurs particularités. Le dendrogramme (Figure 39) permet de visualiser ces cinq groupes. Il est à noter que l'agglomération de Saint-Etienne apparaît dans les aires urbaines du dernier groupe et peut donc être utilisée comme représentante de ces aires urbaines.

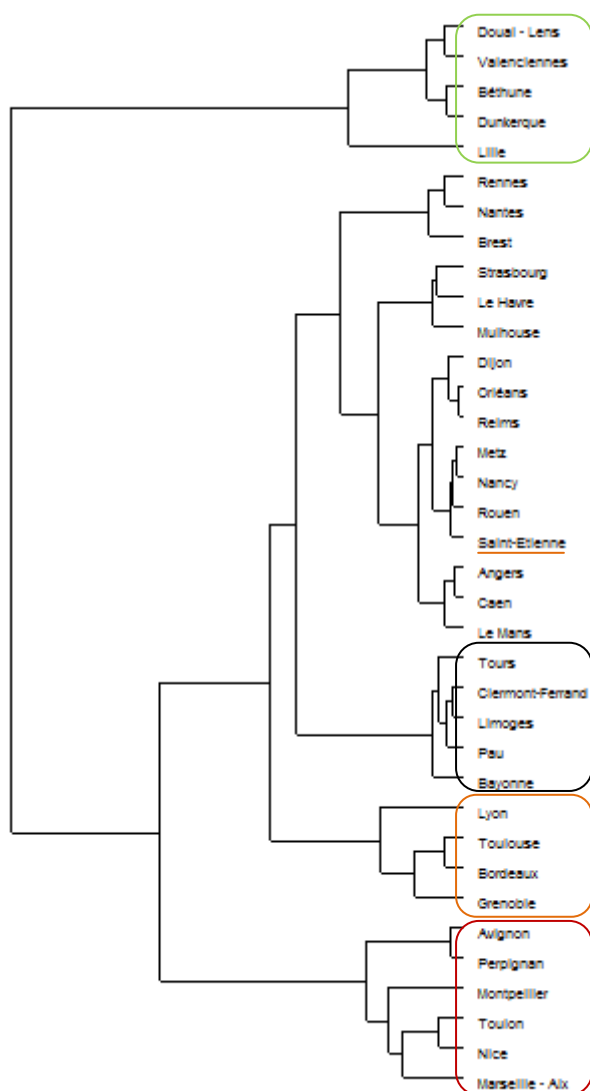


Figure 39 : Représentation en dendrogramme des résultats de la CAH

III.1.3.6.2 Description des classes obtenues

Cette partie présente les caractéristiques de la typologie obtenue et également représentée géographiquement (Figure 40). Il est intéressant de remarquer une répartition géographique des classes bien qu'aucune variables strictement géographique n'ait été utilisée pour l'ACP (de type coordonnées).

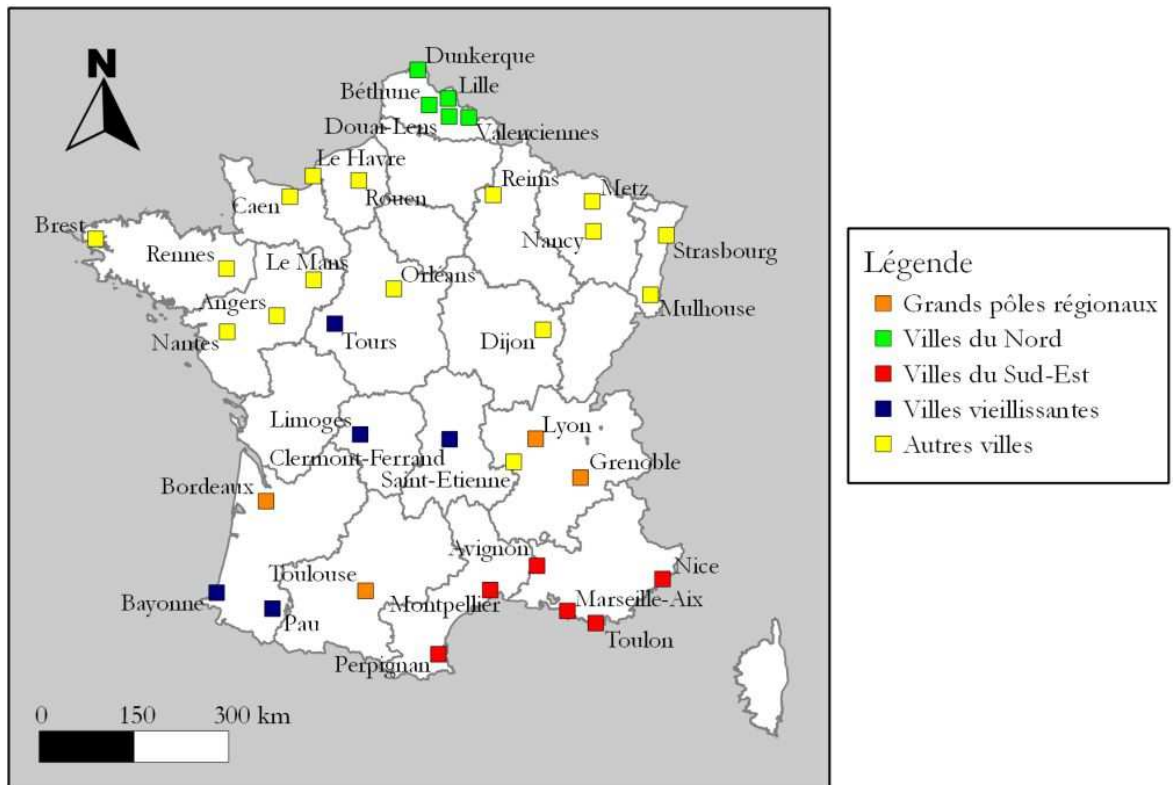


Figure 40 : Représentation géographique des classes d'aires urbaines

Il se trouve que la classe 1 regroupe des villes du Sud-Est de la France (Tableau 25). Elles sont caractérisées par une météo favorable (jours d'ensoleillement et températures élevés). Les ménages se distinguent par leur moyenne d'âge plus élevée que la moyenne, et un nombre d'enfants à charge peu élevé (reflétant la forte part de retraités dans ces villes). Les diplômes les plus représentés sont le BEPC et le BAC. En revanche le taux de diplômes professionnels est peu élevé. La surreprésentation du BEPC et du BAC peut notamment s'expliquer par l'âge élevé de la population. En effet, les diplômés de l'enseignement supérieur sont moins représentés dans ces catégories, au profit de ceux s'étant arrêtés au BEPC ou au BAC (INSEE 2011). Enfin, le territoire se caractérise par une part importante d'espaces boisés ou verts, au détriment des terres agricoles, sous-représentées. Ces aires urbaines seront appelées dans la suite du travail « villes du Sud-Est ».

Tableau 25 : Individus et variables de la classe 1

Classe 1	
Individus	Variables
Toulon	Corrélations positives
Perpignan	Ensoleillement
Avignon	Température
Nice	BEPC
Marseille-Aix	Espaces boisés et verts
Montpellier	Age moyen
	Familles à 1 enfant
	BAC
	Corrélations négatives
	CAP et BEP
	Territoires agricoles
	Parité

La classe 2 regroupe des individus ayant la particularité d'appartenir aux plus grandes aires urbaines de l'échantillon considéré (Tableau 26). En termes de superficie tout d'abord (variable qui apparaît contribuer le plus à la caractérisation du groupe). Mais également en termes de population puisqu'elles se placent respectivement aux 2^{ème}, 6^{ème}, 5^{ème} et 11^{ème} places sur les 36 aires urbaines considérées. Les services liés aux transports y sont particulièrement développés, avec un nombre de pko élevé, un bon niveau d'accessibilité au bus, mais aussi, un nombre important de places de stationnement. Les diplômés de l'enseignement supérieur y sont bien représentés, au contraire des détenteurs d'un certificat d'études primaires. Enfin, la proportion de familles à deux enfants (proche de la moyenne nationale) est plus importante. Dans la suite du travail, les aires urbaines de cette classe seront appelées « grands pôles régionaux ».

Tableau 26 : Individus et variables de la classe 2

Classe 2	
Individus	Variables
Bordeaux	Corrélations positives
Grenoble	Superficie
Toulouse	Enseignement supérieur long
Lyon	Parking public payant
	Places kilomètres offertes
	Accessibilité au bus
	Familles à 2 enfants
	Enseignement supérieur court
	Places payantes sur voirie
	Corrélations négatives
	CEP

La classe 3 regroupe des villes du Nord de la France, dont il se trouve qu'elles sont toutes situées en région Nord-Pas-de-Calais (Tableau 27). Les ménages se caractérisent par un nombre important d'enfants (forte représentation des familles à 3 enfants et plus contre peu de familles sans enfants). Le niveau de diplôme des habitants est plutôt bas en moyenne avec une forte représentation des titulaires d'un CEP et des non diplômés, contre peu de bacheliers ou de titulaires d'un diplôme de l'enseignement supérieur. En conséquent, le taux de chômage est relativement élevé et le salaire moyen est bas. Le territoire est caractérisé par une forte densité de population, malgré une part importante de maisons (contre celle d'appartements). Cela se traduit par une faible part d'espaces verts ou boisés. La part des autres sols artificialisés est importante, représentative de l'implantation industrielle importante dans la région. Enfin les activités de déplacement professionnels et pour achats sont plutôt faibles par rapport à la moyenne. Ces aires urbaines seront nommées « villes du Nord » dans la suite.

Tableau 27 : Individus et variables de la classe 3

Classe 3	
Individus	Variables
Valenciennes	Corrélation positive
Béthune	Familles à 4 enfants et plus
Dunkerque	Tissu discontinu urbain
Douai-Lens	Chômage
Lille	Densité
	Autres sols artificialisés
	Familles de 3 enfants
	CEP
	Autres déplacements
	Maisons
	Aucun diplôme
	Corrélation négative
	Espaces verts ou boisés
	BAC
	Superficie
	Déplacements pour les achats
	Enseignement supérieur long
	Famille sans enfant
	Déplacements domicile-travail
	Appartements
	Enseignement supérieur court
	Revenu

La classe 4 regroupe des aires urbaines caractérisées par une part importante de familles sans enfants, et peu de familles nombreuses, comparé à la moyenne (Tableau 28). L'âge moyen est élevé et le niveau de diplôme bas. Enfin, le taux de motorisation est plus important que la moyenne, ce qui peut être notamment attribué à un développement faible de l'offre en TC. Ces aires urbaines ont été qualifiées de « villes vieillissantes ».

Tableau 28 : Individus et variables de la classe 4

Classe 4	
Individus	Variables
Limoges	Corrélations positives
Clermont-Ferrand	Familles sans enfant
Pau	Motorisation
Tours	Age moyen
Bayonne	Corrélations négatives
	Aucun diplôme
	Famille de 4 enfants et plus
	Famille de 3 enfants

La dernière classe regroupe toutes les aires urbaines qui ne rentrent pas dans l'un des quatre premiers groupes (Tableau 29). Le choix de s'arrêter à 5 classes est arbitraire et ce dernier groupe aurait probablement pu être à nouveau divisé. Cependant, ces différentes agglomérations partagent certaines caractéristiques. Elles appartiennent tout d'abord pour la majorité à la partie Nord de la France. Les conditions météorologiques y sont moins agréables que la moyenne, avec moins de jours d'ensoleillement annuel et des températures moyennes inférieures. Les territoires agricoles y sont plus présents en moyenne. Enfin, la part des diplômés professionnels (CAP et BEP) est plus importante que la moyenne, celle de ceux s'arrêtant au BEPC l'est moins.

Tableau 29 : Individus et variables de la classe 5

Classe 5	
Individus	Variables
Nancy	Corrélation positive
Metz	CAP et BEP
Orléans	Territoires agricoles
Rouen	Corrélation négative
Reims	Autres déplacements
Saint-Etienne	Ensoleillement
Caen	Température
Angers	BEPC
Le Mans	
Dijon	
Strasbourg	
Rennes	
Le Havre	
Brest	
Nantes	
Mulhouse	

III.2 Application de la méthodologie d'évaluation environnementale aux parangons d'aires urbaines identifiés

Devant la difficulté de créer un jeu de données fictif, représentatif de chaque classe, il a été décidé de traiter un cas réel, témoin du groupe d'aires urbaines. Ainsi l'application s'est portée sur les trois premières classes identifiées par la CAH : les villes du Sud-Est, les grands pôles régionaux et les villes du Nord. Pour chacune de ces classes, la ville la plus représentative est choisie en utilisant la notion de centre de gravité. Pour chaque classe, la position du centre de gravité des individus la composant est calculée. Ce centre de gravité aurait constitué le cas fictif représentatif idéal si la construction d'un jeu de données avait été possible. Pour s'en approcher, l'aire urbaine la plus proche du centre de gravité de la classe (distance euclidienne) est choisie pour être étudiée. Les aires urbaines sélectionnées sont donc : Valenciennes, Toulon et Bordeaux.

III.2.1 Présentation des aires urbaines retenues

Trois aires urbaines ont donc été retenues, représentatives des classes identifiées : Valenciennes, Toulon et Bordeaux. Cette partie présente ces trois aires urbaines.

III.2.1.1 Aire urbaine de Valenciennes

III.2.1.1.1 Le territoire

L'aire urbaine de Valenciennes comptait, en 2009, 366 990 habitants, répartis en 90 communes (Capot et Rodriguez 2011). Elle s'étend sur 761 km² dans la région Nord-Pas-de-Calais, et plus précisément dans le département du Nord. Elle est frontalière à la Belgique.

Le réseau de transports en commun à Valenciennes (réseau Transvilles) est géré par le SITURV (Syndicat Intercommunal pour les Transports Urbains de la Région de Valenciennes, regroupant 75 communes). Le PTU ne correspond donc pas exactement au périmètre de l'aire urbaine, avec 593 km² couverts (environ 80% de la superficie totale). L'exploitation est déléguée à une entreprise privée. Le réseau se compose de 36 lignes d'autobus urbain ainsi qu'une ligne de tramway de 18 kilomètres de long. Chaque année, 19 millions de voyages sont réalisés en moyenne sur le réseau de TCU pour environ 9 millions de kilomètres parcourus. Il est à remarquer que la distance moyenne d'un déplacement est relativement courte (cette remarque est valable pour l'ensemble des aires urbaines étudiées). Cette courte distance peut s'expliquer tout d'abord par le fait que tous les individus de l'aire urbaine sont interrogés

(certains ayant une mobilité moindre et courte distance, notamment les personnes âgées). Elle peut s'expliquer également du fait que les déplacements longue distance sont exclus du périmètre et seule la mobilité dite locale est prise en compte. 170 autobus (dont 70 articulés) et 21 rames de tramway assurent le service de 6h00 à 21h00 sur les 640 km de ligne.

III.2.1.1.2 Les déplacements

La voiture apparaît comme le mode le plus utilisé avec 65% des déplacements (dont 47% en tant que conducteur) (Figure 41). Elle est suivie par la marche à pied (24%) et les autres modes, dont les utilisations sont plus marginales (tramway, bus et vélo à 2%).

Pour les motifs, c'est celui « à destination du domicile » qui est le plus réalisé (voir chapitre II à propos de la nomenclature utilisée) (Figure 42). Viennent ensuite les déplacements professionnels (à noter qu'ils occupent une place légèrement moins importante à Valenciennes, fait que l'on peut rapprocher au fort taux de chômage) puis, les visites aux proches, l'accompagnement (ou la reprise) d'une autre personne et les achats.

Les déplacements à Valenciennes sont présentés, du point de vue des modes utilisés (Figure 41) et des motifs de déplacement (Figure 42). Ceux représentant les déplacements des autres aires urbaines sont disponibles en annexe 9.

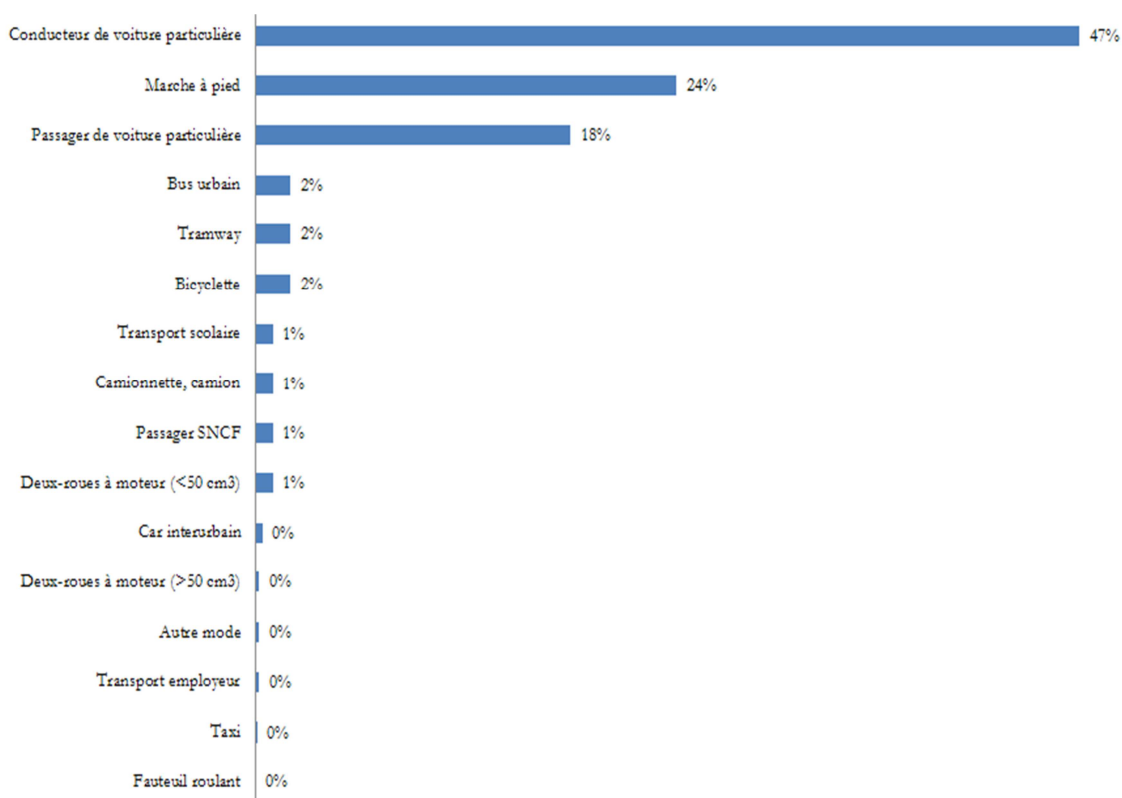


Figure 41 : Répartition modale à Valenciennes (en part de déplacements)

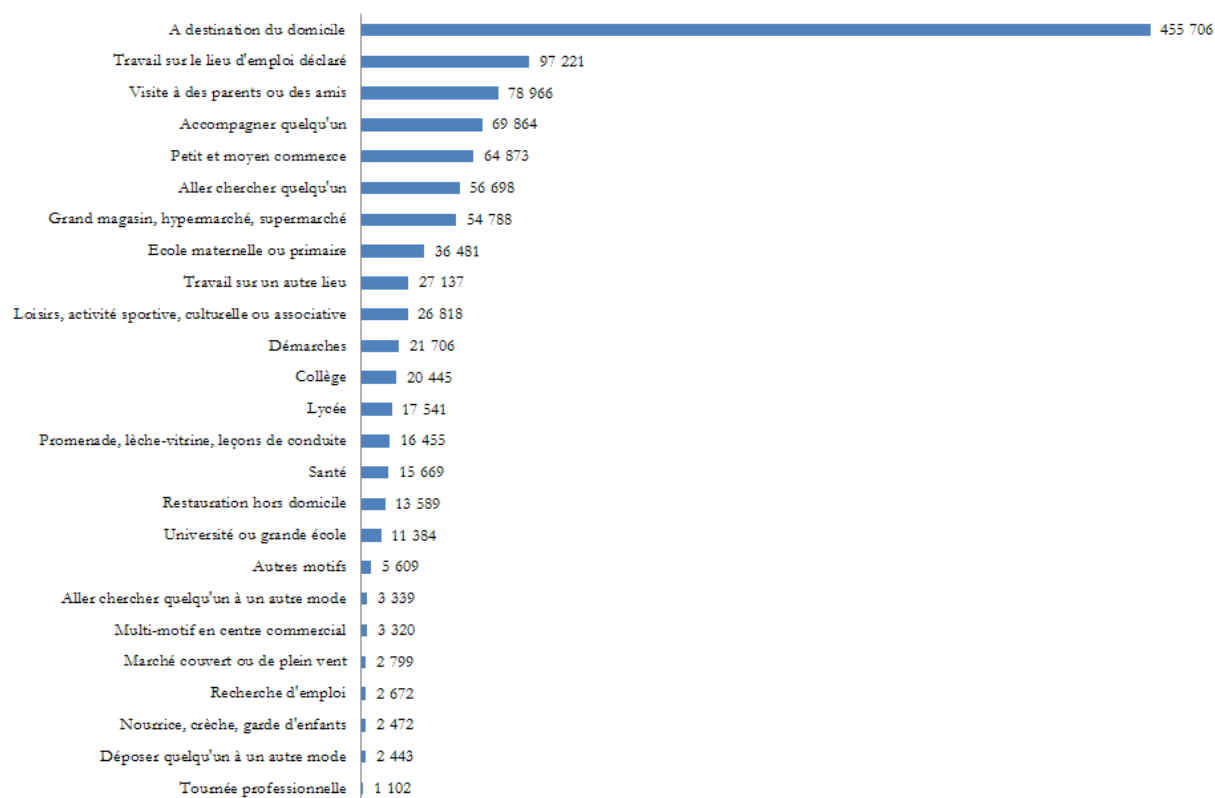


Figure 42 : Répartition des déplacements selon le motif à Valenciennes (en nombre de déplacements par jour et par motif)

III.2.1.2 Aire urbaine de Toulon

III.2.1.2.1 Le territoire

L'aire urbaine de Toulon comptait, en 2009, 605 366 habitants, répartis en 39 communes (Barrett et al. 2011). Elle s'étend sur 1200 km² dans la région PACA, et plus précisément sur deux départements : le Var et les Alpes de Haute Provence.

Le réseau de transports en commun à Toulon (réseau Mistral) est géré par la RMTT (Régie Mixte des Transports Toulonnais). Le réseau Mistral ne dessert que 12 communes, pour 300 km² couverts. L'exploitation est déléguée à une entreprise privée. Chaque année, 23 millions de voyages sont réalisés en moyenne en TCU pour environ 12 millions de kilomètres parcourus.

III.2.1.2.2 Les déplacements

Les déplacements sont décrits sur les graphiques disponibles en annexe 9 sur le modèle de ceux de Valenciennes. Le véhicule particulier est largement utilisé (62% des déplacements), suivi de la marche à pied (28%). Pour les modes, c'est surtout la part relativement importante de déplacements réalisés en bus (4%) s'expliquant par l'absence d'autres solutions de TCU.

III.2.1.3 Aire urbaine de Bordeaux

III.2.1.3.1 Le territoire

L'Aire urbaine de Bordeaux comptait, en 2009, 1 105 257 habitants, répartis en 192 communes (Scarabello 2011). Elle s'étend sur 3 900 km² dans le département de la Gironde.

Le réseau de transports en commun à Bordeaux se compose de 3 lignes de tramway (78 km) et 76 lignes de bus. Chaque année 100 millions de voyages sont réalisés dans les 74 rames de tramway ou 409 autobus recensés. Le PTU correspond à celui de la Communauté Urbaine de Bordeaux (CUB) regroupant 28 communes et 726 700 habitants sur une superficie de 579 km².

III.2.1.3.2 Les déplacements

Les déplacements sont décrits sur les graphiques disponibles en annexe 9 sur le modèle de ceux de Valenciennes. La particularité la plus remarquable est la forte utilisation du tramway à Bordeaux (6% des déplacements) et par conséquent des TCU (autour de 10%).

III.2.2 Résultats

Cette partie donne plusieurs résultats sur l'application de la méthodologie à différents cas urbains. Dans un premier temps, elle se focalise sur les émissions de GES, en donnant à la fois des résultats à l'échelle globale (comparaison des émissions entre les aires urbaines ou entre leurs habitants au regard de certains paramètres (part d'automobile, types de carburants représentés)). Ensuite, elle compare les bilans GES pour une pkm parcourue dans chacune des aires urbaines, en fonction du besoin de déplacement. Il est alors possible d'évaluer pour chaque aire urbaine, les potentiels de réduction des émissions de GES pour chaque besoin, en fonction de celles observées pour les autres cas. Un focus est ensuite fait sur certains besoins de déplacements à fort potentiel de réduction. Enfin, d'autres indicateurs d'impact potentiel (IMPACT 2002+) ainsi que quelques flux de polluants sont évalués, de manière globale.

III.2.2.1 Les émissions de GES à l'échelle de la ville

Cette partie propose, dans un premier temps quelques résultats généraux sur les émissions de GES dans les quatre aires urbaines étudiées (Saint-Etienne et les trois aires urbaines représentant les classes identifiées). A noter qu'afin de dresser des résultats par typologie, il serait nécessaire d'appliquer la méthodologie à d'autres aires urbaines de chaque classe. Cela permettrait, en plus d'observer l'écart-type interclasse d'avoir une appréciation de l'écart-type intra-classe. La deuxième remarque est que ces premiers résultats sont à relativiser du fait qu'ils concernent les émissions de GES uniquement. En effet, il est envisageable que les résultats diffèrent pour d'autres indicateurs environnementaux. Cela sera mis en avant dans la suite avec des considérations sur d'autres indicateurs.

Tableau 30 : Emissions de GES dans les aires urbaines étudiées

Aire urbaine	Emissions annuelles de GES dans l'aire urbaine pour les déplacements de personnes les jours ouvrés (en kg CO ₂ eq/an)	Population	Emissions annuelles de GES par habitant les jours ouvrés (en kg CO ₂ eq/an/hab)	Emissions moyennes de GES par habitant un jour ouvré (en kg CO ₂ eq/j/hab)
Saint-Etienne	270 038 215	374 680	721	2,8
Valenciennes	213 023 153	345 985	616	2,4
Bordeaux	776 896 462	881 024	882	3,4
Toulon	516 205 752	574 898	898	3,4

On remarque tout d'abord une différence notable concernant les émissions de GES par an et par habitant entre les quatre agglomérations, avec une différence de presque 50% entre Valenciennes (le minimum) et Toulon (le maximum) (Tableau 30).

Ces différences notables observées entre les aires urbaines pourraient s'expliquer par la distance totale parcourue, par an et par habitant. Le Tableau 31 le confirme en partie, mais il apparaît qu'un habitant de l'aire urbaine toulonnaise n'est pas celui qui effectue la plus longue distance annuelle (Tableau 31) ; en effet, un habitant de l'aire urbaine de Bordeaux parcourt la plus longue distance annuelle. De plus, il n'existe pas la même différence entre les distances annuelles parcourues qu'entre les émissions de GES. Si minimum et maximum se différencient d'un facteur 1,5 pour les émissions, les habitants de Bordeaux parcourent « seulement » 1,3 fois plus de pkm par jour que ceux de Valenciennes (le minimum). Ainsi, les émissions moyennes de GES pour une pkm parcourue diffèrent d'une aire urbaine à l'autre. Ce point est cependant à nuancer du fait que la différence entre les facteurs 1,5 et 1,3 n'apparaît pas significative et qu'ici, l'incertitude n'a pas été considérée (point sur lequel un retour sera fait dans la suite).

Tableau 31 : Emissions de GES relativisées par la distance annuelle parcourue pour les aires urbaines étudiées

	Emissions annuelles de GES dans l'aire urbaine pour les déplacements de personnes les jours ouvrés (en kg CO₂ eq/an)	pkm annuels pour les déplacements de personnes les jours ouvrés	pkm/an/hab	Emissions de GES par pkm (en kg CO₂ eq/pkm)
Saint-Etienne	270 038 215	1 471 294 225	3 927	0,184
Valenciennes	213 023 153	1 258 308 697	3 637	0,169
Bordeaux	776 896 462	4 336 378 230	4 922	0,179
Toulon	516 205 752	2 801 891 492	4 874	0,184

L'observation des parts modales des différents moyens de transport dans les quatre agglomérations sélectionnées montre tout d'abord une place de la voiture relativement similaire selon les cas (Figure 43). Cependant, le Tableau 32 montre que les émissions de CO₂ à la pkm ne semblent pas être corrélées à la part modale d'automobile, ni d'ailleurs à celles, additionnées, des modes de transport à combustion interne.

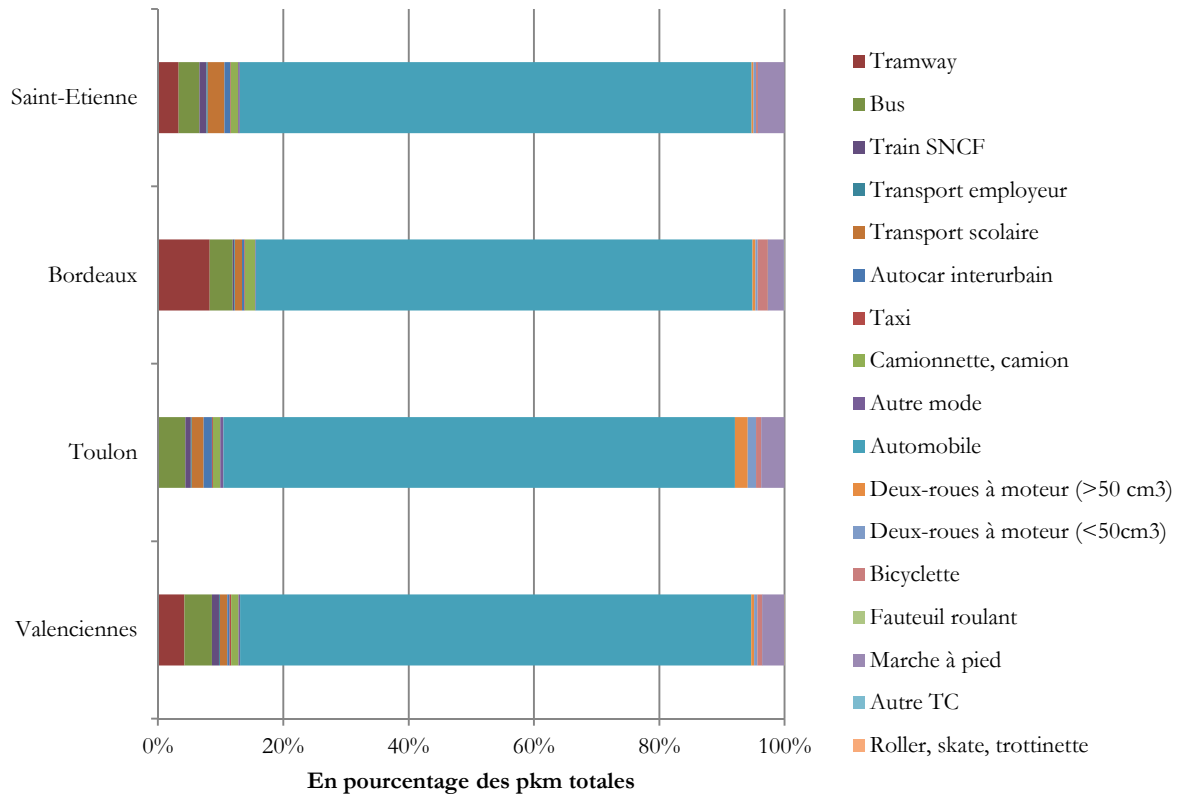


Figure 43 : Répartitions modales (tous modes) dans les quatre aires urbaines étudiées

Tableau 32 : Parts modales caractéristiques pour les quatre aires urbaines étudiées

	Part modale de l'automobile	Part modale de la marche à pied	Part modale des modes de transport à combustion interne	Emissions de GES par pkm (en kg CO ₂ eq/pkm)
Saint-Etienne	81,6%	3,5%	90,3%	0,184
Valenciennes	81,4%	3,7%	94,6%	0,169
Bordeaux	79,0%	2,6%	87,2%	0,179
Toulon	82,3%	4,3%	91%	0,184

En observant de plus près la flotte automobile, le Tableau 33 montre que la part de motorisation diesel est sensiblement différente selon les aires urbaines étudiées (Tableau 33). Une part des disparités de résultats peut donc être portée par ces différences de motorisation. L'aire urbaine de Valenciennes, ayant les émissions de GES par pkm les plus faibles compte une part plus importante que les autres de diesel dans sa flotte, en moyenne moins émetteur de CO₂.

Tableau 33 : Part des différents types d'énergie dans la flotte automobile des aires urbaines étudiées

	Part de diesel dans la flotte automobile	Part d'essence dans la flotte automobile	Part des autres types d'énergie dans la flotte automobile	Emissions de GES par pkm (en kg CO ₂ eq/pkm)
Saint-Etienne	60%	40%	0%	0,184
Valenciennes	64%	35%	1%	0,169
Bordeaux	54%	45%	1%	0,179
Toulon	48%	51%	1%	0,184

En considérant une flotte automobile identique pour toutes les agglomérations (60% de diesel correspondant environ à la moyenne française) et en laissant le reste des données inchangées, la modification des résultats à la pkm montre l'influence de ce paramètre (Tableau 34). Ainsi, une part de la disparité est expliquée par la proportion de diesel dans la flotte.

Tableau 34 : Résultats des émissions de GES par pkm pour une répartition diesel/essence moyenne

	Part de diesel dans la flotte automobile	Part d'essence dans la flotte automobile	Part des autres types d'énergie dans la flotte automobile	Emissions de GES par pkm (en kg CO ₂ eq/pkm)
Saint-Etienne	60%	40%	0%	0,184
Valenciennes	60%	40%	0%	0,173
Bordeaux	60%	40%	0%	0,178
Toulon	60%	40%	0%	0,181

Le tracé de la courbe de la fonction de la répartition diesel/essence permet d'apprécier la corrélation entre part d'essence et émissions de GES par pkm (Figure 44). Une variation de la part de diesel de 50 à 66% induit une différence de 7 g CO₂ eq par pkm (suivant une relation quasi linéaire). Cette variation, répercutée sur l'ensemble des déplacements représente, pour l'aire urbaine de Bordeaux, 24 000 t CO₂ eq. Cette remarque sur le type de carburant est à relativiser du fait de la présentation unique de l'indicateur émissions de GES. En effet, une évolution inverse pourra être observée sur d'autres indicateurs (ex : NO_x (Figure 45)).

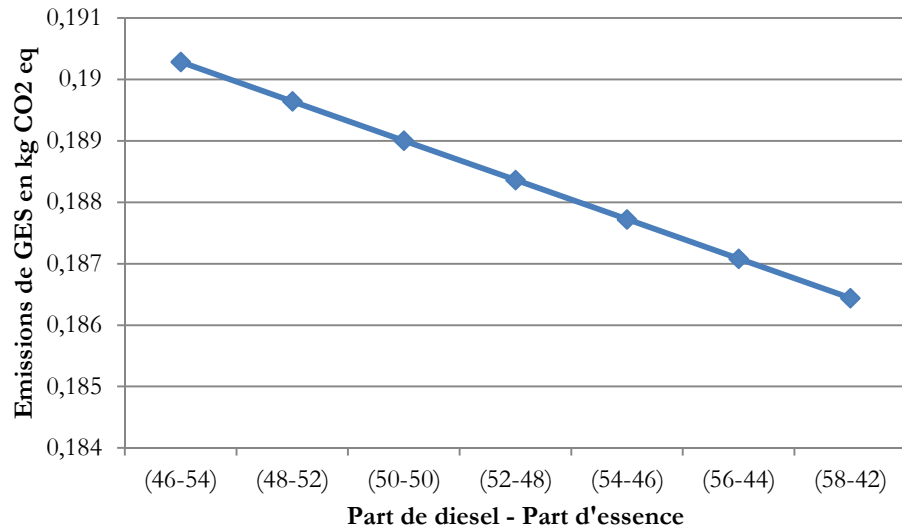


Figure 44 : Emissions de GES par pkm en fonction de la répartition (diesel essence) à Bordeaux

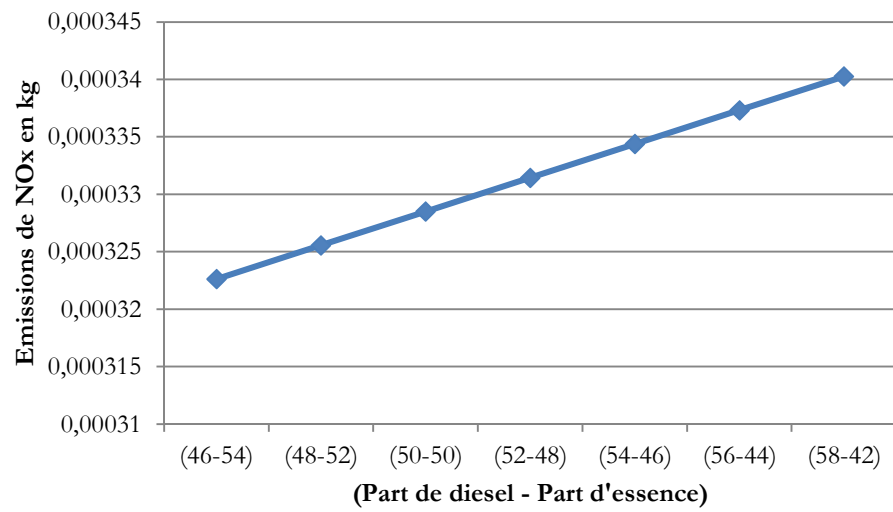


Figure 45 : Emissions de NOx par pkm en fonction de la répartition (diesel-essence) à Bordeaux

III.2.2.2 Les besoins de déplacement dans les différentes aires urbaines

Les résultats précédents montrent une différence en termes d'émissions de GES relativement faible pour une pkm parcourue dans chacune des aires urbaines étudiées. Avec 169 g CO₂ eq par pkm, Valenciennes est l'aire urbaine s'éloignant le plus de la moyenne (mais uniquement de 6%). La répartition de la mobilité urbaine par besoins permet de dépasser ce regard global sur les déplacements en tachant de déterminer si des différences notables, des particularités, peuvent apparaître sur certains besoins spécifiques pour certaines aires urbaines. Ces particularités peuvent constituer le signe d'une marge de manœuvre possible pour réduire les émissions liées à certains besoins. La différence à la moyenne a donc été calculée pour chaque aire urbaine et pour chaque besoin (Tableau 35).

Tableau 35 : Différence à la moyenne pour les émissions de GES par pkm, par aire urbaine et par besoin de déplacement. En gras : les résultats différant de 10 à 20% du résultat moyen pour le besoin. En souligné, ceux différant de plus de 20%.

Besoin de déplacement	Ecart-type	Moyenne	Valenciennes	Bordeaux	Toulon	Saint-Etienne
A destination du domicile	0,006	0,170	5,0%	-1,1%	-3,3%	-0,6%
Travail sur le lieu d'emploi déclaré	0,004	0,232	0,1%	1,9%	-2,2%	0,2%
Tournée professionnelle	0,026	0,243	0,8%	13,8%	-2,8%	-11,7%
Travail sur un autre lieu	0,015	0,233	6,5%	3,0%	-1,5%	-8,0%
Nourrice, crèche, garde d'enfants	0,044	0,180	-13,4%	<u>36,3%</u>	-15,3%	-7,7%
Ecole maternelle ou primaire	0,006	0,177	3,5%	-4,2%	-1,8%	2,5%
Collège	0,007	0,120	0,6%	0,4%	-7,2%	6,1%
Lycée	0,004	0,101	-1,0%	5,7%	-1,6%	-3,1%
Université ou grande école	0,051	0,188	9,0%	<u>20,0%</u>	<u>-40,4%</u>	11,4%
Multi-motifs en centre commercial	0,013	0,176	9,5%	-3,4%	-7,4%	1,3%
Grand magasin, hypermarché, supermarché	0,012	0,180	10,0%	-2,3%	-4,9%	-2,8%
Petit et moyen commerce	0,023	0,161	<u>21,2%</u>	-5,9%	-7,0%	-8,2%
Marché couvert ou de plein vent	0,020	0,142	18,0%	3,7%	-6,0%	-15,7%
Santé	0,006	0,173	4,4%	-1,0%	-4,1%	0,6%
Démarches	0,006	0,168	3,4%	2,8%	-3,3%	-2,8%
Recherche d'emploi	0,041	0,138	<u>44,2%</u>	-7,2%	-18,9%	-18,1%
Loisirs, activité sportive, culturelle ou associative	0,007	0,169	5,5%	-0,1%	-2,3%	-3,1%
Promenade, lèche-vitrine, leçons de	0,010	0,129	-1,6%	8,5%	-10,0%	3,1%
Restauration hors domicile	0,023	0,155	<u>20,8%</u>	-0,4%	-9,3%	-11,0%
Visite à des parents ou amis	0,007	0,179	5,4%	-1,1%	-3,1%	-1,2%
Accompagner quelqu'un	0,004	0,139	4,1%	-0,9%	-2,6%	-0,6%
Aller chercher quelqu'un	0,002	0,139	0,7%	0,1%	-2,1%	1,3%
Déposer une personne à un autre mode	0,004	0,140	2,5%	2,2%	-3,6%	-1,1%
Aller chercher quelqu'un à un autre mode	0,004	0,140	2,8%	-0,2%	-3,3%	0,7%
Autres motifs	0,008	0,183	4,4%	-3,6%	2,8%	-3,6%
Moyenne	0,007	0,179	5,4%	-0,1%	-2,9%	-2,5%

III.2.2.2.1 Focus sur les besoins de déplacements à grande variabilité

Les résultats montrent six valeurs s'éloignant à plus de 20% de la moyenne pour le besoin. Le plus gros écart-type s'observe sur le besoin « trajet vers l'université ou la grande école ». Ces trajets sont particulièrement émetteurs à Toulon et très peu à Bordeaux. A Saint-Etienne, ils le sont également moins qu'en moyenne.

III.2.2.2.1.1 Trajets vers l'université ou les grandes écoles

Toulon se distingue des autres aires urbaines par une part importante de ces trajets vers l'université et les grandes écoles réalisée en voiture (plus de 75% des pkm) (Figure 46). Du fait de l'absence d'alternative dans l'aire urbaine toulonnaise, le bus suit l'automobile en termes de pkm réalisées. En tout, 94% des pkm sont réalisées par des modes de transports à combustion interne (automobile, autobus, autocar, deux-roues motorisés). Pour chacune des autres aires urbaines, la part modale automobile est comparable et de l'ordre de 45% des pkm. La différence se fait donc sur les autres parts modales. Dans l'aire urbaine de Bordeaux, le tramway occupe une très large part de ces déplacements, laissant seulement 8,5% des trajets au bus (le deuxième mode de transport globalement émetteur de GES) contre 12 à 14% respectivement pour Valenciennes et Saint-Etienne. Cette importante utilisation du tramway à Bordeaux suit la tendance remarquée pour l'ensemble des déplacements et s'explique notamment par la qualité du réseau de tramway dans l'aire urbaine et la bonne desserte qu'il offre.

Il est intéressant de noter également la forte représentation des trajets SNCF dans la répartition modale des déplacements vers l'université pour l'aire urbaine valenciennoise. Deux hypothèses, tirées de l'EMD valenciennoise peuvent expliquer ce recours supérieur au train. Tout d'abord, l'EMD avance l'hypothèse d'une forte attractivité de l'agglomération lilloise pour les étudiants et jeunes diplômés du supérieur (Siturv 2012). Ensuite, Valenciennes compte une part relativement faible d'appartements contre une part importante de maisons individuelles. Ce type de logement, moins adapté aux étudiants, couplé à des revenus moyens moins importants, pourrait impliquer qu'une part plus importante des étudiants restent vivre chez leurs parents les premières années d'études, en périphérie de Valenciennes, induisant de plus nombreux trajets en train (adapté à ce type de déplacements).

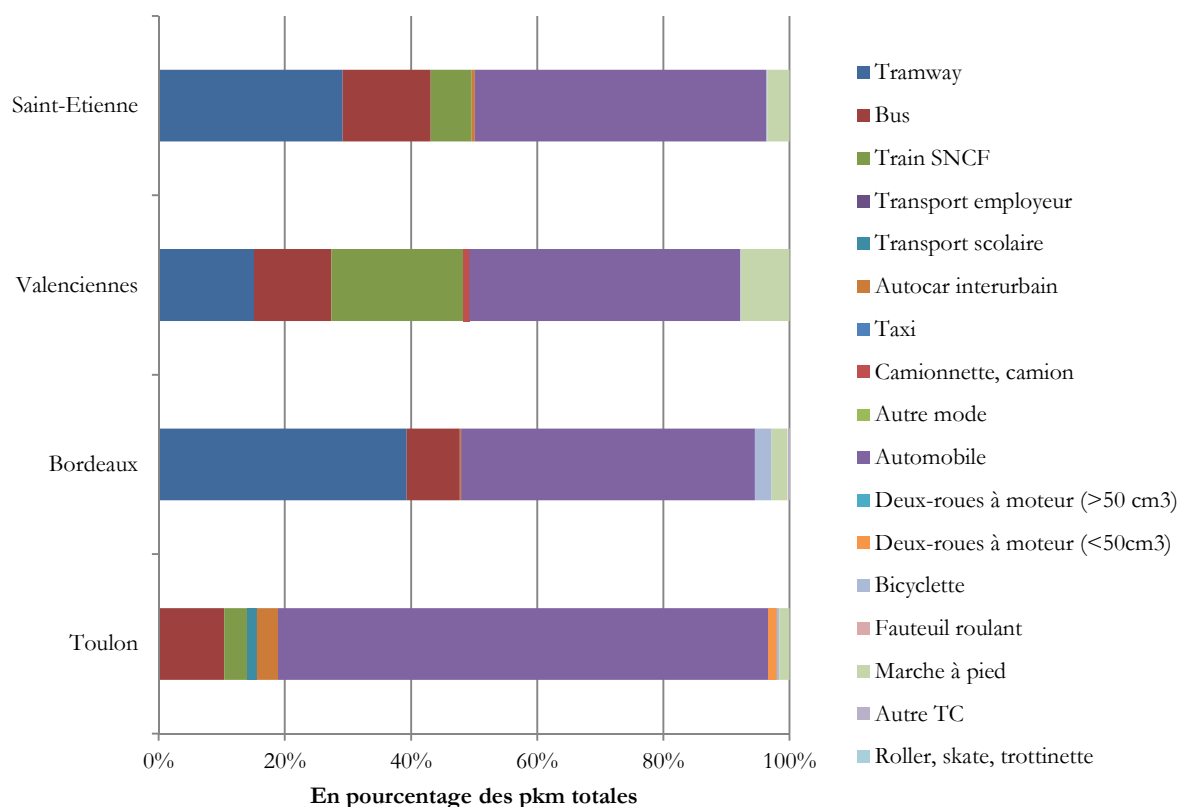


Figure 46 : Parts modales (en % de pkm) comparées des trajets vers l'université et les grandes écoles dans les quatre aires urbaines étudiées

Comme pour l'ensemble des déplacements, le taux d'occupation des véhicules particuliers peut avoir une incidence sur le bilan à la pkm. Pour cela, les calculs ont été menés à nouveau en prenant un taux d'occupation moyen de 1,10 pour les quatre aires urbaines. Les résultats ne montrent pas d'influence significative de ce paramètre sur les disparités entre les quatre aires urbaines (Tableau 36).

Tableau 36 : Evolution des émissions de GES pour une pkm parcourue vers l'université ou les grandes écoles, en fonction du taux d'occupation de l'automobile

	Taux d'occupation pour les trajets vers l'université ou les grandes écoles	Emissions de GES par pkm (en kg CO ₂ eq/pkm)	Taux d'occupation modifié	Emissions de GES par pkm (en kg CO ₂ eq/pkm)
Saint-Etienne	1,12	0,166	1,10	0,166
Valenciennes	1,07	0,171	1,10	0,171
Bordeaux	1,06	0,150	1,10	0,150
Toulon	1,14	0,263	1,10	0,264

III.2.2.2.1.2 Trajets vers la crèche ou la nourrice

L'aire urbaine de Bordeaux se distingue particulièrement ici car très peu émettrice de GES par pkm pour les trajets vers la crèche ou la nourrice. Au vu des répartitions modales pour les quatre aires urbaines, la part automobile semble suffire à expliquer ces différences. En effet, Bordeaux a une part modale pour l'automobile plus faible (72%) que les autres aires urbaines (plus de 80%) (Figure 47).

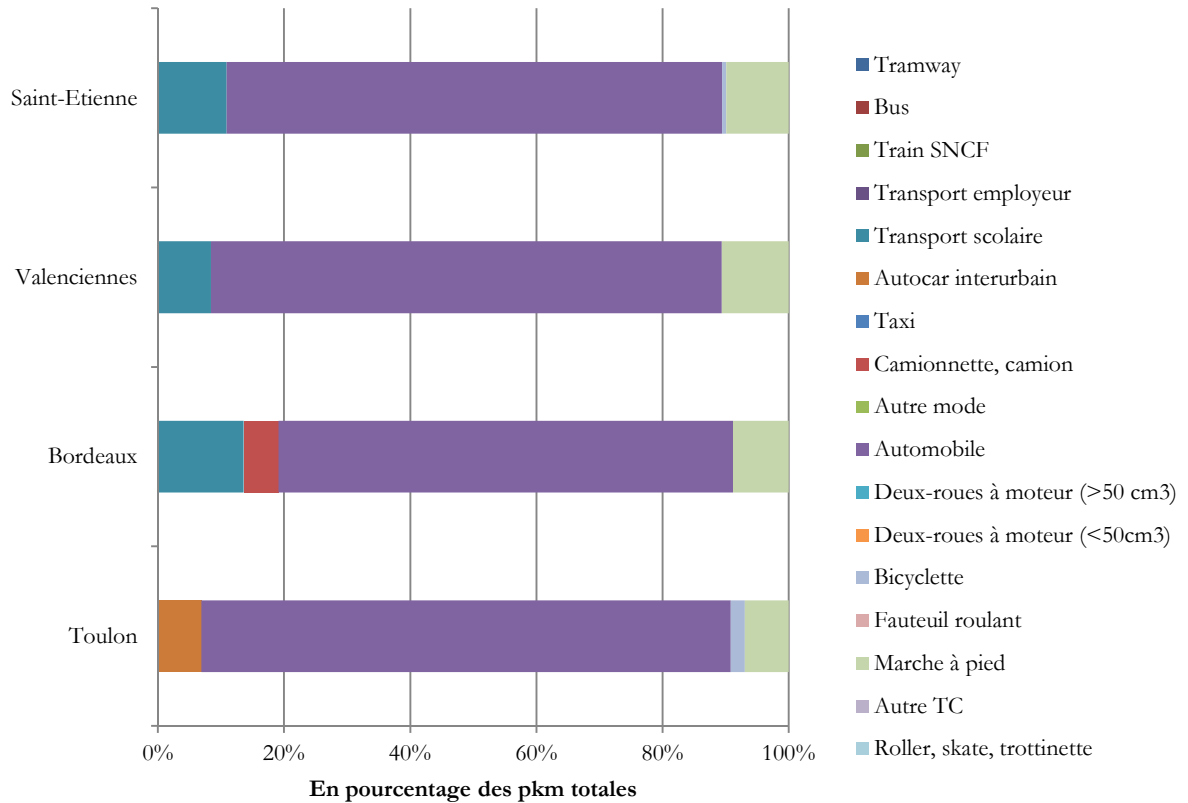


Figure 47 : Parts modales (en % de pkm) comparées des trajets vers la crèche ou la nourrice dans les quatre aires urbaines étudiées

III.2.2.1.3 Recherche d'emploi

Le motif « recherche d'emploi » est particulièrement peu émetteur. En effet, le fait même de chercher un emploi implique le plus souvent une situation financière moins propice à l'utilisation de l'automobile. L'aire urbaine de Valenciennes est la moins émettrice pour ce besoin. Cela s'explique par une part modale plus importante que pour les autres aires urbaines occupée par les TCU et en particulier par le tramway (23% des pkm). Il est intéressant de remarquer une part relativement importante de deux-roues motorisés à Bordeaux, pour ce besoin (Figure 48).

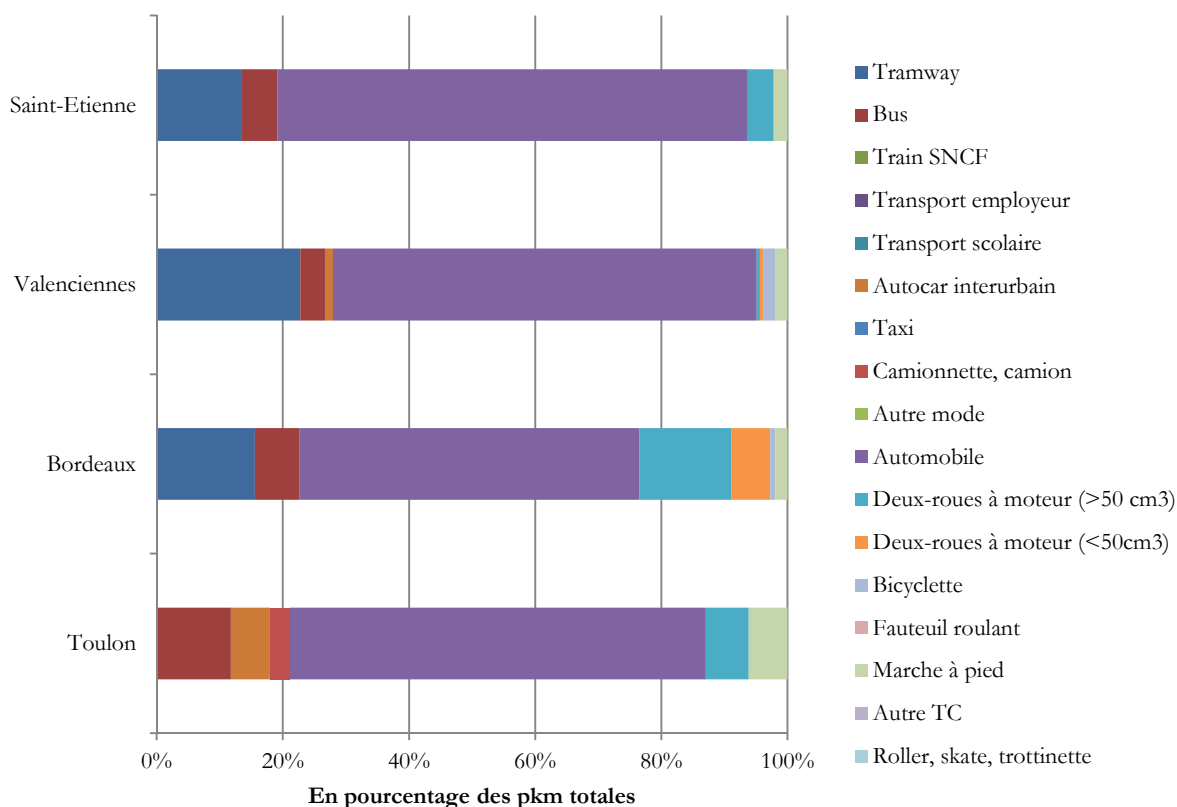


Figure 48 : Parts modales (en % de pkm) comparées des trajets pour le motif « recherche d'emploi » dans les quatre aires urbaines étudiées

III.2.2.1.4 Des besoins disparates mais peu influents sur le total des pkm

Les trois besoins de déplacement identifiés précédemment ont la particularité d'avoir des émissions à la pkm très disparates et donc, une marge de manœuvre possible plus importante pour les aires urbaines les plus émettrices. Cependant, il est important de regarder également leur influence sur les émissions totales, et donc l'intérêt de mener une action ciblée sur ces besoins. Les trajets vers l'université, la crèche et la recherche d'emploi sont respectivement responsables en moyenne de 1,5%, 0,2% et 0,1% des émissions de GES (la participation de ces besoins au total est sensiblement la même pour les quatre cas étudiés). Les trajets vers l'université sont donc ceux, a priori, offrant le plus de potentiel de réduction des émissions pour l'aire urbaine la plus émettrice : Toulon. Plus de 25 millions de pkm sont réalisées

chaque année à Toulon pour ce motif. Parvenir à ramener les émissions de GES des trajets universitaires à Toulon à la moyenne des trois autres cas étudiés permettrait une économie de : $26\,900\,000 * (0,263 - 0,162) = 2\,716\,900 \text{ kg CO}_2 \text{ eq}$, soit l'équivalent des émissions annuelles de plus de 350 français (estimés à $7\,388 \text{ kg CO}_2 \text{ eq}$ (ADEME)).

Malgré le caractère hypothétique d'une telle réussite (Toulon est notamment handicapé par l'absence de TCU peu carboné), ce type de résultat laisse entrevoir de gros potentiels de réduction des émissions de GES, en se concentrant sur des besoins précis. A défaut d'imaginer la construction d'un tramway, un effort supplémentaire vers l'utilisation moindre de l'automobile par les étudiants serait bénéfique, cela pouvant se réaliser au travers de mesures publiques (augmentation de l'offre de TCU aux alentours de universités, campagnes de sensibilisation, navettes scolaires, augmentation de l'offre de logements étudiants, etc.). Egalement, le remplacement des TCU thermiques par des solutions équivalentes électriques est une solution envisageable afin de réduire les émissions de GES.

L'important ici n'est pas de donner des pistes d'amélioration des déplacements universitaires. Il est davantage de montrer que chaque besoin de déplacement offre des potentiels de réduction des émissions de GES, différents selon les aires urbaines et qu'un regard et des actions spécifiques à ces besoins pourraient être bénéfiques, au-delà d'une action de sensibilisation globale, détachée des motifs de déplacements (et qui peut donc être perçue comme plus impersonnelle par les individus qui se sentent alors moins concernés).

III.2.2.2.2 Faible variabilité, mais grand potentiel

La partie précédente traite des déplacements offrant, à la pkm, le plus de variabilité entre les cas, et donc un potentiel de réduction important. Bien que peu représentatifs en termes de pkm annuelles totales, les résultats montrent un réel potentiel de réductions des émissions. Cette partie propose, à l'inverse, d'observer les déplacements qui peuvent avoir une variabilité moindre, mais une présence plus importante dans les pkm totales. Le potentiel de réduction des émissions de GES peut être calculé en estimant, pour chaque besoin de déplacement, la différence à la moyenne des différents cas, supposée une cible atteignable par chacun. Pour cela, la différence à la moyenne (pour chaque besoin et chaque cas) est multipliée à la distance annuelle pour le besoin (en pkm). Les résultats sont exprimés en $\text{kg CO}_2 \text{ eq}$ évitables sur une année (Tableau 37). La notion de CO_2 évitable est ici subjective et se réfère à la cible « moyenne des quatre aires urbaines ». Si cette cible est atteinte, quelles émissions de $\text{CO}_2 \text{ eq}$ sont évitées ?

L'absence d'une offre variée de TCU à Toulon (et notamment celle de modes peu carbonés) conduit à un fort potentiel de réduction des émissions, pour l'ensemble des besoins. La substitution des solutions de TCU par des réponses équivalentes mais peu émettrices (bus électriques par exemple) constitue donc un fort potentiel de réduction des émissions de GES.

Tableau 37 : Emissions de GES évitables par besoin et par cas d'étude en kg CO₂ eq (X : valeurs déjà inférieures à la moyenne des aires urbaines)

Besoin de déplacement	Valenciennes	Bordeaux	Toulon	Saint-Etienne
A destination du domicile	X	-2 591 823	-5 514 515	-557 913
Travail sur le lieu d'emploi déclaré	X	X	-2 134 781	X
Tournée professionnelle	X	X	-67 655	-202 312
Travail sur un autre lieu	X	X	-398 057	-1 816 156
Nourrice, crèche, garde d'enfants	-33 174	X	-50 470	-15 168
Ecole maternelle ou primaire	X	-274 208	-71 823	X
Collège	X	X	-273 864	X
Lycée	-21 176	X	-75 992	-116 964
Université ou grande école	X	X	-2 039 275	X
Multi-motifs en centre commercial	X	-162 525	-223 069	X
Grand magasin, hypermarché, supermarché	X	-1 396 187	-2 063 996	-438 491
Petit et moyen commerce	X	-1 742 481	-1 433 701	-684 181
Marché couvert ou de plein vent	X	X	-189 144	-71 384
Santé	X	-113 637	-327 697	X
Démarches	X	X	-253 929	-118 790
Recherche d'emploi	X	-109 031	-128 457	-71 917
Loisirs, activité sportive, culturelle ou associative	X	-30 845	-404 234	-262 560
Promenade, lèche-vitrine, leçons de conduite	-19 494	X	-609 712	X
Restauration hors domicile	X	-31 489	-496 723	-220 975
Visite à des parents ou amis	X	-473 496	-1 027 791	-192 099
Accompagner quelqu'un	X	-303 039	-500 270	-52 270
Aller chercher quelqu'un	X	X	-286 066	X
Déposer une personne à un autre mode	X	X	-42 069	-9 774
Aller chercher quelqu'un à un autre mode	X	-4 976	-39 961	X
Autres motifs	X	-134 950	X	-60 914

III.2.2.3 Autres indicateurs d'impacts environnementaux

La partie précédente s'est focalisée sur les émissions de GES pour les quatre aires urbaines retenues. Ici sont étudiés d'autres indicateurs d'impacts environnementaux. Les indicateurs de la méthode de caractérisation IMPACT 2002+ seront étudiés.

III.2.2.3.1 Indicateurs de la méthode IMPACT 2002+

Pour rappel, la méthode IMPACT 2002+ offre un certain nombre d'indicateurs midpoint (Tableau 38). Ces indicateurs ont été calculés pour les quatre aires urbaines étudiées.

Tableau 38 : Indicateurs midpoint de la méthode de caractérisation IMPACT 2002+

Impact potentiel	Unité	Méthode de caractérisation
Réchauffement climatique	kg CO ₂ eq	IMPACT 2002+
Emission de substances cancérigènes	kg C ₂ H ₃ Cl eq	IMPACT 2002+
Emission de substances non-cancérigènes	kg C ₂ H ₃ Cl eq	IMPACT 2002+
Radiations ionisantes	Bq C-14 eq	IMPACT 2002+
Destruction de la couche d'ozone	kg CFC-11 eq	IMPACT 2002+
Substances organiques inhalées	kg C ₂ H ₄ eq	IMPACT 2002+
Substances inorganiques inhalées	kg PM _{2,5} eq	IMPACT 2002+
Ecotoxicité terrestre	kg TEG soil	IMPACT 2002+
Ecotoxicité aquatique	kg TEG water	IMPACT 2002+
Acidification/eutrophisation terrestres	kg SO ₂ eq	IMPACT 2002+
Occupation du territoire	m ² org.arable	IMPACT 2002+
Acidification aquatique	kg SO ₂ eq	IMPACT 2002+
Eutrophisation aquatique	Kg PO ₄ ²⁻ eq	IMPACT 2002+
Consommation d'énergie non-renouvelable	MJ primaire	IMPACT 2002+
Consommation de ressources minérales	MJ surplus	IMPACT 2002+

Pour chaque indicateur midpoint, les résultats ont été représentés rapportés à la pkm et en prenant arbitrairement Bordeaux pour référence (résultat(Bordeaux) = 1) (Figure 49). Il a été décidé d'analyser en priorité les indicateurs présentant des disparités fortes entre les cas.

- Substances cancérigènes : Les aires urbaines de Toulon, puis Bordeaux, apparaissent plus émettrices de substances cancérigènes. Celles-ci sont constituées des hydrocarbures aromatiques (à 95% environ) suivies du tetrachlorobenzène (1,5%) et des hydrocarbures aromatiques polycycliques, les HAP (1,3%). Elles sont émises à environ 97% par la flotte automobile. La première place de Toulon en termes d'émissions s'explique notamment par la flotte plus importante de deux-roues motorisés (3,3% des pkm contre 0,7 à 1% pour les autres aires urbaines). La seconde place de Bordeaux s'explique moins facilement. Bordeaux compte une part modale moins importante pour le train et la marche à pied. Elle semble compensée par le tramway qui est, à la pkm, légèrement plus émetteur de substances cancérigènes, ce qui peut constituer une possible explication.
- Radiations ionisantes : L'aire urbaine de Bordeaux se détache des trois autres pour cet indicateur. C'est la forte part modale du tramway (8% des pkm) qui en est la cause. En effet, le tramway fonctionne à l'électricité, avec un mix électrique français ayant une part importante de nucléaire. Et la radioactivité est un des vecteurs premiers de rayonnement ionisant (avec les rayonnements cosmiques, électromagnétique et particuliers). L'absence de tramway (et plus largement de solutions électriques) à Toulon, aire urbaine la moins émettrice, confirme cette hypothèse. L'importance de la vision « cycle de vie » ressort ici puisque l'impact est délocalisé. Il ne se manifeste pas directement où se déroule le déplacement.

- Substances organiques inhalées : Pour cet indicateur, l'aire urbaine de Toulon se détache. Les substances organiques inhalées sont constituées des composés organiques volatils non méthaniques (NMVOC) et des BTX (Benzène, Toluène, Xylène). C'est à nouveau la part importante de deux-roues motorisés à Toulon qui explique cette différence.

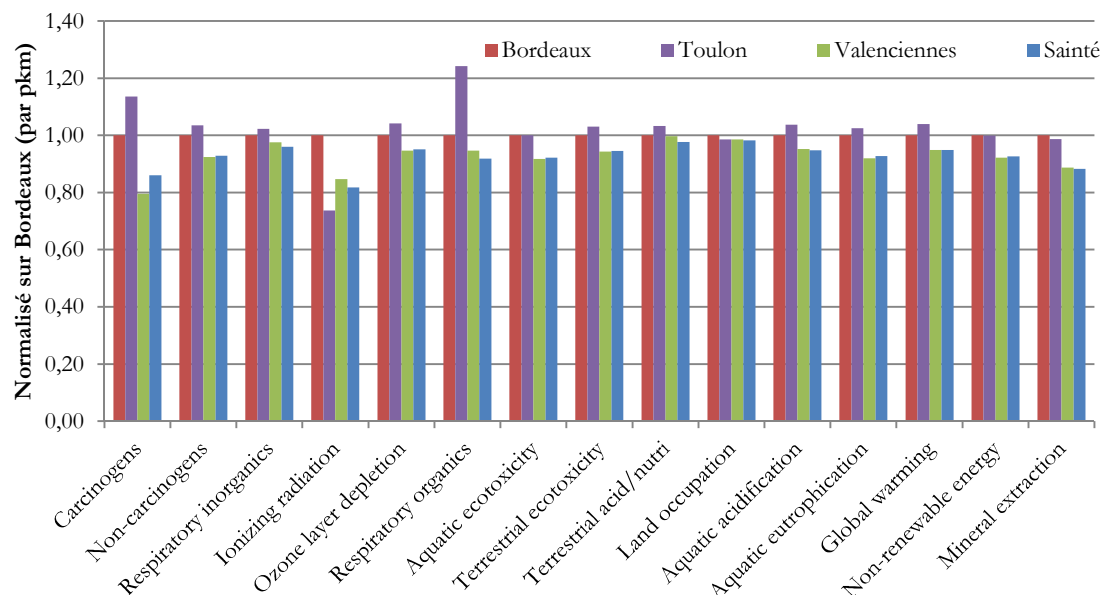


Figure 49 : Résultats de la caractérisation via la méthode IMPACT 2002+ rapportés à la pkm normalisés (Bordeaux = 1). Le choix de Bordeaux comme référence, pour cette représentation et pour les suivantes s'est fait arbitrairement.

III.2.3 Incertitude sur les résultats

L'ensemble des résultats comparatifs présentés doivent être relativisés par rapport aux différentes incertitudes sur les données. Cette incertitude peut se classer en trois catégories : l'incertitude sur les données de d'entrée (déplacements), celle sur la base de données environnementale (Ecoinvent + modifications apportées) et celle sur les méthodes d'évaluation de l'impact.

Dans une telle étude comparative, il est intéressant de disposer de données provenant d'une source commune, ou suivant une méthodologie commune. Les données de déplacements utilisées ici ont volontairement été réduites aux déplacements couverts par les EMD afin justement de limiter l'incertitude sur cette partie à celle induite par la méthodologie standardisée CERTU et comparables pour chaque cas étudié. Cette incertitude est variable selon les données observées mais toujours minimisée par le choix de grands échantillons pour l'enquête (ne dépassant pas les 2% dans le cas de

Bordeaux par exemple (BVA & La Cub 2009)). Il a donc été choisi de prendre cette valeur de $I_{EMD} = 2\%$ pour l'incertitude liée aux données de déplacement.

De même l'utilisation d'une seule base de données ACV et donc d'inventaires (identiquement adaptés au cas français) limite l'incertitude dans les comparaisons. Pour cette partie LCI, c'est celle induite par l'utilisation d'Ecoinvent, estimée ici à $I_{EI} = 20\%$. Pour les données modifiées, nous avons choisi d'estimer l'incertitude à l'aide du paramètre le plus influant sur les résultats, pour le mode de transport prédominant dans le mix modal : le taux d'occupation de l'automobile. Cela nous permettra d'obtenir une estimation haute de l'incertitude. Le taux d'occupation impacte directement la phase d'usage (dont l'impact est proportionnel au taux d'occupation), donc 80% (estimation) du total. L'automobile impacte elle directement le bilan total, puisqu'elle représente environ 80% des émissions de GES du système. Une variation de 20% du taux d'occupation conduit donc à $I_{TO} = 0,2 * 0,8 * 0,8 = 12,8\%$ d'écart sur les émissions de GES du système complet, valeur retenue pour l'incertitude des données modifiées.

Pour l'incertitude sur les facteurs de caractérisation, elle a été jugée négligeable, du fait de la prédominance des émissions de CO_2 dans le bilan (pour les émissions de GES, la grande part d'incertitude se trouve sur les HFC, qui sont peu présents dans notre système). Afin d'obtenir une borne max pour l'incertitude, nous l'avons tout de même estimée à $I_{FC} = 10\%$.

L'incertitude totale, dans le cas d'un produit de variables non corrélées, est donnée par :

$$I_t = \sqrt{\sum I_k^2} \text{ où } I_t \text{ est l'incertitude totale et } I_k \text{ l'incertitude du paramètre } k$$

$$\text{Ici, on obtient donc : } I_t = \sqrt{I_{EMD}^2 + I_{EI}^2 + I_{TO}^2 + I_{FC}^2} = \sqrt{0,02^2 + 0,2^2 + 0,128^2 + 0,1^2} = 26\%$$

A noter que cette incertitude représente plutôt la borne haute du fait des choix effectués ci-dessus pour le calcul. De plus, l'incertitude dans les comparaisons d'aires urbaines est minimisée du fait de l'utilisation de jeux de données similaires.

III.3 Conclusions de la partie

De grandes différences apparaissent entre les quatre aires urbaines étudiées. En effet, un habitant de Toulon émettra en moyenne 898 kg CO₂ eq par an pour sa mobilité locale, tandis qu'un individu résident dans l'aire urbaine de Valenciennes en émettra environ 616. Cette différence, d'environ 50% n'est donc pas négligeable. Elle est néanmoins à relativiser avec le paramètre « distance ». En effet, il paraît intuitif que les émissions annuelles liées à la mobilité seront directement liées, proportionnellement, aux distances annuelles parcourues. Cela se vérifie relativement bien sur les quatre aires urbaines étudiées. Cependant, la corrélation n'est pas parfaite. Par exemple, les habitants de Bordeaux réalisent une distance annuelle moyenne légèrement plus élevée que ceux de Toulon (environ 1%), mais émettent moins de GES (2% de moins).

Cette petite différence laisse entrevoir un intérêt à s'intéresser ensuite aux émissions d'un habitant de chaque aire urbaine, ramenées à la personne.kilomètre. Celles-ci diffèrent, jusqu'à 12% entre le minimum Valenciennes et le maximum Toulon et Saint-Etienne. Une nouvelle fois, la distance pourrait être un facteur explicatif fort, puisque impliquant un choix de mode privilégié, et souvent l'automobile. Ce n'est pas le cas. Les émissions à la pkm ne sont d'ailleurs pas liées à la part modale automobile, sensiblement la même pour chaque aire urbaine. Elles sont davantage liées à la proportion de diesel dans la flotte automobile (pouvant aller de 48% à Toulon jusqu'à 64% à Valenciennes). Les différences entre les aires urbaines, si elles existent, restent à ce stade relativement ténues.

L'étape suivante a été de subdiviser la mobilité en différents besoins de déplacement, et d'étudier, de manière autonome chacun de ces besoins. Des disparités bien plus importantes apparaissent alors entre les besoins de déplacements (cela avait pu être vu sur le cas de Saint-Etienne en chapitre II) mais aussi entre les villes. Par exemple, une pkm vers l'université ou les grandes écoles, à Toulon, émet 1,75 fois plus de GES qu'à Bordeaux. Ces différences entre besoins peuvent, à terme, permettre d'orienter les efforts en matière de réduction des émissions de GES de la mobilité urbaine. En effet, en comparant les besoins entre eux sur une même aire urbaine, il est possible d'identifier certaines différences sur lesquelles travailler. Mais en les confrontant de plus à d'autres aires urbaines, il est possible de savoir en plus si ces différences se retrouvent de villes en villes (et donc potentiellement intrinsèques au besoin) ou spécifiques à une ville.

Il est alors possible de calculer, pour chaque ville et pour chaque besoin, un potentiel global de réduction des émissions. Pour cela, la différence entre une émission moyenne au pkm (la moyenne des quatre aires urbaines) et la valeur réelle est multipliée au nombre de pkm totales réalisées dans l'année. Par exemple, les déplacements vers l'université s'avèrent particulièrement émetteurs à Toulon. En multipliant le potentiel de réduction à la pkm à la distance totale, il apparaît qu'un important potentiel de réduction des émissions existe. Il sera donc préférable, en cas d'investissements prévus pour réduire les émissions de GES de se concentrer sur ce besoin. Il apparaît que la différence est principalement due à l'absence de solution de TCU électrifiée, telle que le tramway dans les autres aires urbaines. Les étudiants apparaissant comme d'importants utilisateurs des lignes de TCU, ils optent alors en remplacement pour

le bus, une solution émettrice de GES. A l'aune de ces résultats, une aire urbaine comme Toulon, souhaitant investir dans l'électrification d'une partie de son réseau de bus, pourrait être dirigée vers les lignes desservant l'université.

L'élargissement de l'évaluation environnementale conduit tout de même à rester prudent sur les conseils à prodiguer. En effet, bien que moins poussée que l'étude sur les GES, l'interprétation d'autres impacts environnementaux permet de pointer l'inadéquation pouvant exister entre eux, et donc le besoin de développer une analyse multicritère. Par exemple, les calculs semblent avancer que l'électrification de certaines lignes conduirait à augmenter le rayonnement ionisant, principalement dû ici à la part importante de la production nucléaire dans le mix électrique français.

En conclusion, si les différences entre les aires urbaines s'avèrent, au global, relativement ténues, le découpage par besoins de mobilité permet de privilégier certains investissements par rapport à d'autres, en pointant les potentiels de réduction des émissions. Il permet également d'envisager de tester certaines solutions spécifiques, et de connaître leur impact sur le bilan global. Par exemple, qu'apporterait le remplacement des cars scolaires par des navettes électriques ? Cette partie montre également l'importance de mener une analyse sur plusieurs indicateurs d'impacts environnementaux, une décision visant à diminuer l'un pouvant conduire à augmenter l'autre. Restera dans ces cas-là à prioriser les impacts à diminuer et à prendre les décisions d'investissement en conséquence, mais en connaissance de cause. Ces conclusions sont cependant à nuancer du fait qu'elles concernent l'unique volet environnemental. La mise en place pratique de solutions sera contrainte par des critères socio-économiques qui ne sont pas évalués ici.

IV. Apports scientifiques, limites du travail et perspectives

Ce travail de thèse a abordé la question de l'évaluation environnementale de la mobilité urbaine avec deux regards particuliers : la notion de cycle de vie et celle de besoin de déplacement. La méthodologie mise en place pose au départ les deux hypothèses suivantes :

- Les impacts environnementaux liés aux transports n'ont pas lieu uniquement durant la phase d'usage, mais tout au long du cycle de vie ;
- Le motif d'un déplacement détermine ses modalités de réalisation et par conséquent les impacts environnementaux associés.

Afin de vérifier ces hypothèses, une méthodologie a été développée qui quantifie les impacts environnementaux de la mobilité urbaine à l'aide de l'Analyse de Cycle de Vie (ACV) à partir d'une subdivision besoins de déplacements. Les méthodes d'analyse factorielle (ACP, AFCM) ont été utilisées pour proposer une typologie afin de mettre en avant les disparités pouvant exister entre les aires urbaines. Ce chapitre propose de revenir sur certains points de cette méthodologie. Il se découpe en trois parties.

Tout d'abord, il traitera des apports de la thèse. Dans un premier temps, les apports méthodologiques seront évoqués. Les intérêts de l'utilisation de l'ACV comme méthode d'évaluation seront présentés, puis ceux offerts par l'utilisation des méthodes d'analyse factorielle (en particulier l'ACP) combinées à l'ACV. Ensuite, les intérêts de la subdivision par besoins seront évoqués, notamment pour l'aide à la décision.

La deuxième partie évoquera les limites repérées dans ce travail de thèse. Elle introduira également les éléments mis en œuvre ou imaginés afin de contourner ces limites. Un premier point traitera de celles liées aux données (disponibilité, homogénéité), ayant conduit à restreindre le périmètre d'étude et constituant également un frein envisagé à l'application de la méthodologie à l'ensemble des besoins de déplacement. Ensuite, un focus sera fait sur la problématique des indicateurs en ACV, les problèmes de spatialité étant au centre des limites à une évaluation multicritère incontestable. Enfin, l'absence de quantification précise de l'incertitude sera évoquée.

Dans une dernière partie, des ouvertures seront proposées autour de problématiques discutées au cours de ce dernier chapitre et plus largement au cours de cette thèse. Ainsi l'opportunité d'utiliser la méthodologie pour tester des scénarios de mobilité sera présentée. Puis un point sera fait sur celle d'utiliser les méthodes d'analyses factorielles en aval de l'évaluation, pour l'interprétation des résultats. Ensuite, une focalisation sera faite sur la problématique de la prise en compte des infrastructures dans la base de données ACV Ecoinvent. Enfin, un développement sera fait sur les méthodes de spatialisation mise en œuvre en ACV et le besoin de les appliquer au secteur des transports du fait des freins évoqués précédemment.

IV.1 Apports du travail de thèse

IV.1.1 Développements méthodologiques

Hypothèse 1 : Les impacts environnementaux des transports n'ont pas lieu uniquement lors du déplacement, mais tout au long du cycle de vie (fabrication, maintenance et fin de vie des véhicules, construction, maintenance et fin de vie des infrastructures, production et approvisionnement d'énergie (carburant, électricité), phases d'usage).

La première hypothèse posée dans ce travail de thèse était que les impacts environnementaux, dans le domaine des transports, n'ont pas lieu uniquement lors de la phase d'usage, le déplacement. Elle débouchait sur la question de l'intérêt supposé d'utiliser l'ACV pour l'évaluation de la mobilité urbaine. Cette utilisation de l'ACV pour l'évaluation de la mobilité est un avancement méthodologique en soit. Comme l'a montré la partie consacrée aux méthodes d'évaluation environnementale des transports en Chapitre I, l'ACV est en effet peu utilisée à l'échelle territoriale et a fortiori dans le domaine de la mobilité. Cette partie développe un autre point d'apport méthodologique : l'utilisation des méthodes d'analyse factorielle dans le cadre de l'ACV.

IV.1.1.1 L'ACV pour l'évaluation environnementale de la mobilité urbaine

Les résultats de l'application de la méthodologie à l'agglomération stéphanoise (chapitre II) permettent d'observer que 84% des émissions de GES interviennent lors de la phase d'usage (en considérant l'ensemble des modes de transport). Ce chiffre montre un premier intérêt de considérer les déplacements avec une vision « cycle de vie » puisque 16% d'émissions supplémentaires sont évaluées. Cela est d'ailleurs également remarquable si l'on compare les résultats pour l'agglomération lyonnaise proposés par Bouzouina et al. (2011) qui proposent une moyenne à 1 900 g CO₂ eq par jour par habitant. Nos résultats pour l'agglomération de Saint-Etienne atteignent 2 673 g CO₂ eq par jour par habitant soit une différence de 30% environ (en partie imputables à la prise en compte du cycle de vie complet).

Il faut noter de plus que l'importance de la phase d'usage dans le bilan GES total est accentuée par la part importante d'automobile pour laquelle cette phase occupe une place particulièrement grande. Une comparaison (disponible en chapitre II) montre que la phase d'utilisation n'a pas cette importance pour tous les modes de transport et que par conséquent la part des émissions des autres phases est plus grande. En particulier en France, où le mix électrique est peu carboné, les solutions électriques ont une phase d'usage relativement peu émettrice, qui occupe une place moins importante dans le bilan. Par conséquent, l'intérêt de considérer l'ensemble du cycle de vie est encore renforcé. La raréfaction annoncée des ressources fossiles fait du développement de solutions électriques pour le transport (collectif mais aussi individuel avec le véhicule électrique) une alternative probable dans les scénarios

prospectifs de mobilité dans la mesure où seront trouvés des moyens de production d'électricité renouvelable (Jean-Pierre Nicolas & Morice 2006; Negawatt 2013). Dans cette perspective, la notion de cycle de vie apparaît essentielle pour observer les transferts de pollutions sur les autres phases.

Ainsi, nous validons notre première hypothèse de travail selon laquelle les impacts environnementaux de la mobilité n'ont pas seulement lieu lors de la phase d'usage.

IV.1.1.2 Limite dans l'utilisation de l'ACV

La notion de cycle de vie est à mettre en perspective avec la nécessité évoquée de disposer de plusieurs indicateurs pour le bilan environnemental. La majeure partie de ce travail de thèse s'est concentrée sur les émissions de GES et notamment les potentiels offerts par la subdivision par besoin. Certains résultats plus généraux laissent entrevoir l'importance d'une évaluation multicritère. Par exemple, si l'observation a montré que la part de diesel dans la flotte automobile avait une influence positive sur les émissions de GES, c'est l'inverse pour les émissions d'oxydes d'azote. Encore, certains indicateurs laissent apparaître de possibles impacts du développement de solutions électriques, malgré une réduction importante des émissions de GES. Pour des raisons évoquées dans la suite de ce chapitre, notamment liées à la nécessité de développer des cadres de spatialisation des impacts locaux pour l'ACV, les résultats se sont donc concentrés sur les émissions de GES, bien qu'ils montrent l'intérêt d'une évaluation multicritère. L'intérêt de la subdivision par besoin s'est donc focalisée sur les émissions de GES.

IV.1.1.3 Utilisation des méthodes d'analyse factorielle combinées à l'ACV

Ce travail de thèse utilise les méthodes d'analyse factorielle afin de proposer une classification d'aires urbaines, préalablement à la réalisation de l'ACV. Cette partie propose de donner quelques pistes de réflexion sur l'utilisation potentielle de ces méthodes en évaluation environnementale et en particulier en ACV.

Elles nous ont permis de simplifier la question complexe des enjeux environnementaux de la mobilité des grandes aires urbaines en France, impliquant des données nombreuses et variées, tout en conservant les spécificités au travers de l'identification de cas emblématiques (Figure 50) .



Figure 50 : Simplification par l'ACP

Avant tout, il convient de donner les limites possibles de la typologie proposée. Deux publications sur les déterminants de mobilité ont principalement été utilisées (Dargay 2008; De Witte et al. 2013). Les

choix faits dans l'interprétation de cette littérature, orientés en partie par la donnée disponible pour toutes nos aires urbaines, peuvent être discutés. Nous pensons qu'un travail plus approfondi serait intéressant autour de la détermination d'une typologie d'aires urbaines. Il serait notamment intéressant de pouvoir intégrer des données socio-psychologiques, mais également plus de caractéristiques spatiales. Le Néchet et Aguilera (2011) proposent un certain nombre de déterminants spatiaux. Dans le cadre de cette thèse, les intégrer à la détermination de la typologie s'est avéré compliqué, du fait notamment qu'ils aient été pour l'heure calculés sur peu d'aires urbaines. Ils ont été remplacés par différents indicateurs reflétant l'organisation du territoire (données d'utilisation des sols de la base Corine Land Cover notamment). Il serait également intéressant, dans la mesure d'une application de la méthodologie à plus d'aires urbaines d'intégrer les résultats d'ACV en variables illustratives pour l'ACP. Malgré les améliorations possibles à cette proposition de classification, l'idée d'intégrer cette notion et plus précisément les méthodes d'analyses factorielles à l'ACV peut être intéressante.

Plus de paramétrabilité est prônée en ACV ou du moins, la prise en compte de plus de spécificités dans les bases de données (nouveaux cadres spatio-temporels, différences dans l'utilisation des véhicules selon les besoins, etc.). Deux manières d'imaginer la spatialisation sont évoquées dans la littérature (Humbert 2009) :

- A un niveau très fin, en utilisant les Systèmes d'Informations Géographiques (SIG), difficile à mettre en œuvre, car requérant de nombreuses données locales (notion de site-specific) ;
- En mettant en place des classes (ou archétypes) : en fonction de paramètres prédéterminés, différentes configurations territoriales peuvent être déterminées et utilisées comme état initial. La mise en œuvre est jugée plus aisée et la finesse des résultats convaincante (notion de site-dependent).

La typologie proposée dans ce travail de thèse montrent des premières disparités entre les villes, notamment pour certains besoins de déplacements. Nous pensons qu'il serait donc intéressant de disposer, dans les bases de données, d'un choix plus diversifié de processus de transport, adaptés aux classes proposées. Ainsi, par exemple lors d'une étude à l'échelle d'un bâtiment ou d'un quartier, si la nécessité ou le choix de prendre en compte la mobilité des résidents apparaît, cela pourra être fait dans un contexte local adapté. Si cette préconisation doit être relativisée du fait de la généricité des bases de données ACV, les derniers avancements montrent ce désir d'aller vers plus de paramétrabilité (ex : Ecoinvent V3).

Il semble possible d'utiliser ces méthodes statistiques plus largement dans la détermination de typologie afin d'aller vers plus de prise en compte des spécificités locales en ACV. Par exemple, des typologies d'utilisateurs des transports sont imaginables, ce qui pourrait être facilité par les études déjà disponibles sur les différences entre CSP autour de la mobilité (émissions GES pour les actifs VS inactifs (L. Bouzouina et al. 2011) ou pour les trajets domicile-travail en fonction de la zone de résidence (pôle urbain, espace périurbain, rural, etc.) (DREAL Pays de la Loire 2012)).

Cette partie a donc mis en avant un intérêt à coupler les méthodes d'analyse factorielle à l'ACV dans un sens ACP vers l'ACV. Dans la partie « perspectives », il sera aussi discuté de la possibilité d'utiliser

ces méthodes pour l'analyse des résultats, en pouvant permettre notamment de réduire le nombre d'indicateurs, simplification souvent recherchée par les décideurs ou les industriels car offrant plus de visibilité en termes de communication.

IV.1.2 Apports pour l'aide à la décision

Hypothèse 2 : La mobilité urbaine peut être divisée en besoins de déplacement, qui ne seront pas nécessairement satisfaits de la même manière, impliquant des bilans environnementaux différents.

La deuxième hypothèse traitait de la particularité de chaque besoin de déplacement pour ses modalités de réalisation. Elle menait à la question de l'intérêt d'utiliser une décomposition par besoins de déplacements pour l'évaluation environnementale de la mobilité. Dans cette partie, les enseignements apportés par les chapitres II et III pour répondre à cette question sont résumés. Puis, les limites relatives sont introduites.

La première question de recherche posée était celle de l'intérêt d'une subdivision de la mobilité par besoins pour son évaluation environnementale. Les chapitres II et III ont utilisé cette subdivision pour développer la méthodologie d'évaluation, l'appliquer au cas de l'agglomération de Saint-Etienne puis à d'autres aires urbaines afin de mettre en avant de possibles disparités.

Il est à noter que dans l'optique d'une aide à la décision, la nomenclature de besoins de déplacements semble relativement large et, de fait, elle peut être difficile à appréhender par les décideurs. Il pourrait, dès lors être intéressant de regrouper entre eux certains besoins de manière à obtenir une nomenclature plus restreinte. Cependant, la variabilité existant entre les besoins de déplacement dans une même catégorie (par exemple, les déplacements vers le lycée sont très différents de ceux vers la maternelle) nous ont poussé à conserver, dans le cadre de ce travail, une nomenclature élargie permettant de mieux apprécier les possibilités offertes par la subdivision par besoins.

IV.1.2.1 Enseignements du chapitre II

Sur le cas de l'agglomération de Saint-Etienne, les contributions de chaque besoin de déplacement dans le bilan environnemental total peuvent tout d'abord être observées. Ainsi (si l'on fait abstraction des déplacements « à destination du domicile », responsables à eux-seuls de 35% des émissions de GES), les déplacements « vers le lieu de travail (habituel ou non) » sont responsables d'une part majeure des émissions de GES (environ 46%), suivis des déplacements vers les « grands magasins, hypermarchés et supermarchés » (9%) et des « visites à des parents ou amis » (9%). Viennent ensuite un certain nombre de besoins de déplacements émettant autour de 5% des GES totaux (les trajets de dépôt ou reprise d'une autre personne, les loisirs et ceux vers le petit ou moyen commerce).

Les besoins restants occupent des places unitaires plus marginales dans le bilan total. Cependant, cela peut en partie être imputé au choix de subdivision. Par exemple, les trajets scolaires (bien que responsables de 6% des émissions) ne ressortent pas dans ces premiers résultats du fait qu'ils sont subdivisés en 4 catégories représentant chacune 1 à 2% des émissions. Une première appréciation du poids de chaque besoin sur le bilan total est donc obtenue et pourrait être utilisée par le décideur afin de donner une première orientation à ses actions. Celle-ci est cependant, comme le montrent les résultats très corrélée à la distance annuelle totale parcourue pour le besoin.

La subdivision par besoins permet d'apporter une information supplémentaire à celle évoquée dans le paragraphe précédent. Le choix de cette subdivision a reposé sur l'idée que, pour chacun, un certain nombre de déterminants menaient à une réalisation différenciée, et supposément à un bilan environnemental propre également. Les résultats confirment ces disparités. En effet, dans le cas de l'agglomération stéphanoise, ils montrent que pour une personne.kilomètre réalisée, les émissions de GES peuvent aller de 104 à 271 g CO₂ eq, la médiane se situant à 170 g CO₂ eq et la moyenne à 184 g CO₂ eq. Ces résultats apportent un éclairage nouveau pour la prise de décision. En plus d'identifier les besoins les plus émetteurs dans l'absolu, ils permettent d'observer la marge de manœuvre possible. Ainsi il pourra être intéressant de prioriser les actions sur les besoins représentant une part importante des émissions totales, mais bénéficiant également d'une marge de progression motivante (donc les plus émetteurs à la pkm).

IV.1.2.2 Enseignements du chapitre III

Le chapitre III a permis de confronter cette vision par besoin aux différences entre les aires urbaines. Après avoir proposé une classification urbaine à l'aide de l'Analyse en Composantes Principales, la méthodologie a été appliquée aux données des Enquêtes Ménages Déplacements de Bordeaux, Toulon et Valenciennes, en plus de l'agglomération stéphanoise.

De la même manière, des résultats à l'échelle globale ont tout d'abord été établis. Ainsi, il a pu être mis en avant les différences existant entre les émissions quotidiennes de GES par an et par habitant pour les quatre aires urbaines (allant de 2 362 g CO₂ eq à Valenciennes à 3 444 g CO₂ eq à Toulon). Bien que le peu de cas étudiés ne permette pas de vérifier statistiquement une corrélation entre les émissions par habitant et les distances parcourues, les résultats des quatre aires urbaines semblent aller en ce sens. Cependant, si les résultats d'émissions sont proches entre ces deux cas, un habitant de l'aire urbaine de Toulon émet plus de GES qu'un habitant de celle de Bordeaux, malgré une distance annuelle plus courte, du fait de bilans différents à la pkm parcourue. L'observation des parts modales donne certains enseignements : les émissions de GES ne semblent (à l'échelle des 4 cas étudiées) pas corrélées à la part modale automobile (ni d'ailleurs à celles additionnées des véhicules à combustion interne). La répartition des motorisations diesel et essence semble avoir une influence relativement importante. A Valenciennes notamment où la part de diesel est grande (64%), les émissions à la pkm sont plus faibles qu'ailleurs.

La deuxième part d'enseignements pouvant être tirés des résultats du chapitre III tient dans la comparaison des besoins entre les aires urbaines. De la même manière que cela avait été fait pour l'agglomération de Saint-Etienne, les bilans GES par pkm ont été calculés pour chaque besoin, dans

chaque aire urbaine. Ils vont en moyenne de 101 g CO₂ eq (pour les trajets vers le lycée) à 243 g CO₂ eq (pour les tournées professionnelles). Mais au-delà de ces résultats moyens, les comparaisons montrent des écarts importants d'une aire urbaine à l'autre. Il a alors été possible de dresser un tableau compilant les écarts à la moyenne pour chaque besoin dans chaque aire urbaine. Par exemple, les étudiants toulonnais émettent 40% de GES de plus par pkm pour se rendre à l'université que la moyenne des quatre aires urbaines, ou encore, les valenciennois émettent 21% de GES par pkm de plus que la moyenne pour effectuer leurs achats en petit et moyen commerce. De ces résultats, un tableau regroupant les potentiels de réduction des émissions de GES a été dressé. Il a été considéré, pour chaque besoin, que la moyenne des quatre aires urbaines pouvait être désignée comme objectif à atteindre pour les aires urbaines émettant plus de GES par pkm. Pour chaque aire urbaine et pour chaque besoin, le potentiel de réduction a donc été calculé en multipliant la distance annuelle parcourue pour le besoin à la différence entre les émissions par pkm et la valeur cible, la moyenne.

Les chapitres II et III ont montré les intérêts pour l'aide à la décision de la subdivision en besoins de mobilité ce qui valide notre seconde hypothèse de recherche. Ces intérêts sont néanmoins à relativiser avec certaines limites introduites ici et développées ensuite dans la partie « limites du travail ».

IV.1.2.3 Introduction aux limites relatives à la subdivision par besoins

Un certain nombre de limites peuvent être évoquées concernant l'exploitation de la subdivision par besoins.

Seule une partie des besoins de déplacements a été traitée dans ce travail de thèse. En effet, la nécessité de disposer de jeux de données homogènes et d'une méthodologie formalisée, comparable entre les cas a restreint l'exploitation des résultats aux déplacements enquêtés dans le cadre des EMD. L'obtention d'un tableau de potentiels de réduction permettant un ciblage des actions à prioriser est donc à relativiser avec cette non-exhaustivité. Le fait donc de cibler l'un des 24 besoins retenus ici pourra conduire à manquer un besoin à fort potentiel mais non étudié (parmi les déplacements de week-end, ou ceux de marchandises par exemple). Au cours de ce manuscrit, ces données manquantes ont été approchées (notamment les déplacements de marchandises à Saint-Etienne en chapitre II) mais sans obtenir une homogénéité et une exhaustivité satisfaisantes pour la méthode. Un focus est fait sur les données de déplacement et les pistes à explorer dans la suite de ce chapitre.

La difficulté de mise en œuvre d'une telle méthodologie, en termes de quantité de données nécessaires et de spécifications utiles pour exploiter les différences entre les besoins peut aussi être mise en avant. En effet, pour chaque aire urbaine, les données de déplacements ont nécessité un traitement important menant à l'obtention de personnes.kilomètres annuelles parcourues pour chacun des 24 besoins et chacun des 17 modes de transport (ou catégories de modes). S'ajoute à cela la nécessité de renseigner également certaines modalités de réalisation (taux d'occupation, flottes, consommations, etc.). Cela est, une nouvelle fois, en se basant essentiellement sur les données des EMD.

IV.2 Limites du travail

IV.2.1 Limites relatives aux données

Comme cela a été évoqué précédemment, les problématiques d'accès, de disponibilité voire d'existence de données sont récurrentes dans les sujets de recherche. Cette problématique est par exemple décrite comme l'un des obstacles majeurs dans les projets de recherche sur le climat et l'eau dans le but de développer des politiques à l'échelle de l'Union Européenne (Beniston & Stoffel 2012). C'est souvent un des freins principaux à la mise en cohérence des idées théoriques et de leur réalisation pratique. Ce travail de thèse n'a pas dérogé à la règle et a été confronté à la difficulté de réunir des données permettant de remplir efficacement les objectifs fixés. Ce travail de thèse croise deux types principaux de données : les données de déplacements et les données environnementales.

IV.2.1.1 Données de déplacement

Cette thèse avait pour objet initial l'ensemble des déplacements réalisés en milieu urbain, que ce soit de personnes ou des marchandises, durant une année. Cependant, des données ont pu être collectées de manière très inégale selon les objets. Ces limites impliquées par les données ont poussé à restreindre le développement de la méthodologie dans le temps et dans l'espace. Elle s'est focalisée sur la mobilité locale des personnes, les jours ouvrés. Cette dernière partie donne néanmoins des pistes possibles pour parvenir à une évaluation exhaustive, notamment en termes de données nécessaires.

IV.2.1.1.1 Déplacements de personnes

En France, les déplacements de personnes peuvent se classer en plusieurs catégories, montrant à la fois des différenciations spatiales et temporelles (CGDD 2010) :

- La **mobilité locale** regroupe les déplacements réalisés dans un rayon de moins de 80 kilomètres autour du domicile, sur le territoire national, pendant une période de 24 heures (commençant à 4h du matin le premier jour) ;
- La **mobilité longue distance**, au contraire, recense les déplacements réalisés dans un rayon supérieur à 80 kilomètres à vol d'oiseau autour du domicile (potentiellement à l'étranger) ;
- La **mobilité un jour de semaine** comprend l'ensemble des déplacements réalisés un jour ouvré moyen (du lundi au vendredi) ;
- La **mobilité régulière** regroupe les déplacements domicile-travail, domicile-études et domicile-garderie.

Ce travail de thèse regroupe deux enjeux : proposer une méthodologie donnant une image des impacts environnementaux de la mobilité urbaine et tenir compte des possibles disparités entre les aires urbaines en France. Deux besoins sont donc sous-jacents :

- Disposer d'un jeu de données si possible exhaustif pour évaluer les déplacements urbains ;
- Disposer de jeux de données, pour les différentes aires urbaines, qui puissent être comparés.

La mobilité des ménages, à l'échelle de l'aire urbaine, est étudiée en France au travers des Enquêtes Ménages Déplacements (EMD). C'est en effet l'outil de référence en matière de déplacements des ménages dans les grandes agglomérations. Seuls les jours ouvrés sont enquêtés, mais tous les déplacements sont considérés (quel que soient le motif ou le mode). Les déplacements de week-end ne sont donc pas pris en compte, tout comme ceux réalisés pendant les vacances (Certu 2009).

Si l'ENTD est parfois utilisée en complément pour évaluer les déplacements non pris en compte par l'EMD (Jean-Pierre Nicolas 2013), elle ne permettait pas d'obtenir la vision souhaitée ici à l'échelle de l'aire urbaine avec l'approche par les besoins. De plus les périmètres d'étude n'étant pas les mêmes, l'obtention de jeux de données comparables pour nos différentes aires urbaines n'aurait pas été possible. Il a donc été décidé de limiter l'étude aux déplacements recensés par les EMD, jugeant la comparabilité entre les aires urbaines déterminante dans la méthodologie proposée.

Ce travail a donc connu ses limites dans l'inexistence de jeux de données recensant l'ensemble des déplacements des personnes dans une aire urbaine. Il serait intéressant d'élargir les enquêtes EMD, dans la mesure du possible. Dans un souci de comparabilité entre années, il serait néanmoins important de conserver la même méthodologie pour le recensement des déplacements actuellement étudiés, et de chercher à l'élargir aux déplacements de week-end et longue distance. Plusieurs étapes sont imaginables, requérant selon nous des investissements variables :

- **Les déplacements de week-end** pourraient être recensés de manière relativement similaire à ceux des jours ouvrés si ce n'est qu'il n'est pas nécessairement envisageable de pouvoir enquêter le dimanche. Les déplacements du samedi et du dimanche devraient donc être tous deux recensés le lundi. Ces déplacements, n'appartenant pas à la mobilité régulière, sont peut-être plus variables, incertains et irréguliers, ce qui pourra également poser d'incontestables biais statistiques.
- **Les déplacements longue distance** sont moins nombreux et plus irréguliers. Leur évaluation pose donc *a priori* plus de questions en termes de représentativité statistique. Leur côté plus exceptionnel est un frein à l'évaluation sur une semaine, qui serait trop incertaine statistiquement. Ces déplacements devraient donc être recensés sur une année complète. Cela peut s'avérer lourd en termes d'enquêtes, surtout si le but recherché est d'avoir une image exhaustive des déplacements, incluant l'ensemble des modes de déplacements de personnes (train, bus, avion, etc.).
- **Les déplacements de personnes extérieures à l'aire urbaine** sont difficiles à évaluer. En effet, ils ne peuvent l'être dans le cadre des EMD puisque réalisés par divers tiers non résidents dans l'aire urbaine (tourisme, séjours professionnels, visites à des amis, etc.).

Une possibilité serait d'enquêter parmi les populations des lieux d'hébergement temporaire (hôtels, auberges de jeunesse, etc.), permettant de recenser une partie des déplacements, mais pas tous, cependant. Ensuite, une série de questions supplémentaires pourraient être ajoutée dans les questionnaires aux ménages afin de connaître les pratiques de leurs visiteurs, à l'année. Une nouvelle fois, ce rajout risque d'impliquer une lourdeur supplémentaire aux enquêtes qui constitue un frein important.

- Les déplacements posant probablement le plus de difficulté sont **les transits**. En effet, s'il est possible d'en recenser le nombre de véhicules (par des enquêtes de type « enquête cordon » ou enquêtes minéralogiques), il est plus compliqué d'obtenir des informations sur les motifs des transits ou encore les personnes les effectuant.

Ces préconisations se heurtent malheureusement à différentes barrières. Celle de la représentativité statistique a déjà été évoquée, tout comme celle de la nécessité de combiner différentes méthodologies, tous les déplacements ne pouvant pas être recensés par celle actuellement utilisée. Enfin, le défi de ce type d'enquête consiste souvent à proposer un questionnaire simple, clair et peu chronophage. Y rajouter des séries de questions supplémentaires implique donc le risque d'obtenir moins de réponses et d'augmenter l'incertitude.

IV.2.1.1.2 Déplacement de marchandises

L'obtention de données pour les déplacements de marchandises s'est avérée particulièrement compliquée et *a fortiori* celle de jeux de données comparables pour les différentes grandes aires urbaines de France. Il n'existe pas, à l'heure actuelle, de résultats issus d'enquêtes standardisées telles que peuvent l'être les EMD pour les personnes. La méthodologie s'en approchant le plus est l'enquête TMV (Transport de Marchandises en Ville), qui a été évoquée dans ce manuscrit et utilisée pour le cas de l'agglomération stéphanoise (Patier & Routhier 2009; Routhier 2002; Segalou et al. 2002). Cependant, cette méthodologie s'inscrit davantage dans l'optimisation de la logistique urbaine que dans le recensement des déplacements à proprement parler. Actuellement, les quelques résultats parus ne fournissent pas les informations qui seraient nécessaires pour appliquer la méthodologie d'évaluation proposée ici. Pour approcher le bilan GES dans le cadre du cas d'application de Saint-Etienne Métropole, de nombreuses approximations ont dû être faites à partir du projet de logistique urbaine ECLUSE, mené à Saint-Etienne et des enquêtes TMV réalisées à Bordeaux, Marseille et Dijon. Les enquêtes TMV ne possèdent pas de volet dédié aux enjeux environnementaux. Elles utilisent le logiciel de modélisation FRETURB ne prenant pas lui-même ces enjeux en compte. De plus, FRETURB permet une estimation du nombre de mouvements (expédition ou réception de marchandises), mais pas du nombre de tkm générées. Afin de pouvoir appliquer notre méthodologie au transport de marchandises, un certain nombre d'informations nécessaires a été relevé. Pour chaque déplacement, seraient utiles, *a minima* :

- **La distance parcourue** : l'obtention de cette information ne semble a priori pas problématique. Cependant, actuellement, les enquêtes TMV n'offrent pas directement cette information. Elles recensent en différents points du territoire, les

mouvements (arrivées ou départs de marchandise). La distance de déplacement serait donc une information supplémentaire nécessaire, idéalement dans les enquêtes TMV ou à défaut dans un nouveau type d'enquête analogues aux EMD.

- **Le(s) motif(s) du déplacement** : afin de pouvoir tirer des informations sur les besoins de déplacement, il est important de disposer du motif, selon une nomenclature standardisée. Actuellement, un mouvement recensé par l'enquête TMV est caractérisé par une activité. Cette nomenclature pourrait convenir, mais mériterait d'être affinée. La nature de l'activité ne semble pas suffisante et il serait nécessaire d'avoir de plus des informations sur les produits transportés. Par exemple, la collecte des déchets ménagers pourrait être subdivisée, selon le type des déchets transportés qui peut influencer le bilan environnemental (transport de matières dangereuses par exemple). Il est ainsi envisageable de proposer une nomenclature reliée plus directement au besoin que celle actuellement proposée et permettant de prendre mieux en compte les différences de réponses en fonction du besoin impliqué par le produit transporté (camion frigorifique pour la conservation de la chaîne du froid, utilisation possible du vélo pour la messagerie légère, etc.).
- **Le type de véhicule utilisé** : plusieurs informations sont utiles ici : le type de carburant, le modèle, la date de mise en service (permettant de définir la norme EURO respectée), la consommation moyenne (ou mieux, la consommation en fonction du chargement). Actuellement, les enquêtes TMV donnent seulement une répartition des véhicules en fonction de leur PTAC. Ce premier paramètre mériterait d'être complété des informations évoquées ici.
- **La quantité de marchandise transportée** : actuellement, il n'est possible que de faire des suppositions, en fonction des informations parcellaires sur les modes et de leurs taux de chargement moyen. Cependant, dans l'optique d'une nomenclature plus précise, des taux de remplissage différenciés seraient utiles, à l'image des taux d'occupation spécifiques aux besoins disponibles pour les personnes.

L'obtention de ces données fait cependant face à un problème supplémentaire que pour celles des déplacements de personnes. En effet, si un individu ne voit généralement pas de souci à divulguer des informations (qui resteront anonymes) sur son ménage et ses déplacements, le transport de marchandises revêt lui des enjeux différents. Pour des raisons de stratégie commerciale et/ou économique, les industriels expédiant ou recevant des marchandises, aussi bien que les transporteurs, tendent à protéger ce type de données. Une difficulté supplémentaire est le recours fréquent aux tournées. Les entreprises de transports sont amenées à transporter des marchandises de différents types en même temps, pour optimiser les trajets. Cela rend difficile de déterminer les motifs de chaque déplacement ou plus précisément les parts à allouer à chacun d'eux.

IV.2.1.2 Données environnementales

Il a été choisi d'utiliser, comme base de données environnementale de départ Ecoinvent (EI) dans sa version 2.2. Un certain nombre d'ajustements ont cependant été réalisés et explicités plus tôt dans ce manuscrit. Pour d'autres, la nécessité d'amélioration a été relevée. Cette partie propose de revenir sur les limites relevées des bases de données ACV concernant la mobilité.

Outre le fait que les bases de données ACV accusent pour l'heure un déficit de données dans le domaine de la mobilité individuelle (H.-J. Althaus 2011), celles existantes se basent, pour la plupart sur le cas de la Suisse, en particulier dans Ecoinvent. Ainsi, les consommations des véhicules, les types de carburants représentés ou encore les taux d'occupation des véhicules sont renseignés à partir de données collectées majoritairement en Suisse. Le premier ajustement a donc été d'adapter ces données au cas français. Cependant ces adaptations ne peuvent se faire de manière directe (voir l'exemple du taux d'occupation sur la fiche véhicule en annexe 6). La facilité d'adaptation, de paramétrabilité est l'un des objectifs avancés de la prochaine version d'Ecoinvent (Ecoinvent V3) qui sera discuté plus loin dans ce chapitre.

Ensuite, la base de données ne propose pas une diversité représentative de la réalité. Par exemple, pour l'automobile, trois véhicules diesel et trois véhicules essence sont disponibles, dont les émissions sont basées sur les normes EURO 3, 4 et 5. Pour ces différents véhicules, seules les phases d'usage changent, les autres restent identiques (fabrication, entretien et fin de vie du véhicule, fabrication, entretien et fin de vie de la route). Le modèle de caisse retenu est le même pour tous les véhicules (il est aussi utilisé pour le véhicule électrique par exemple). Or, selon les modèles, certains de ces paramètres peuvent varier (matériaux utilisés, équipements, finitions, processus industriel). Le lieu de fabrication peut également être un paramètre important puisqu'il va conditionner l'accès aux matières premières (acier renforcé et aluminium en tête) donc les étapes de transport nécessaires ou encore le mix électrique (dans EI, plus d'un tiers des émissions de GES pour la phase de fabrication sont celles émises par la production d'électricité).

Les phases d'usages sont donc différenciées et modélisées pour représenter la situation moyenne suisse entre 2002 et 2004. Les données d'émissions sont, pour la plupart, issues de l'agrégation de différentes données disponibles. Pour les émissions du pot d'échappement, les mesures réalisées à l'aide du cycle NEDC (utilisé pour la certification des véhicules dans l'Union Européenne (normes EURO)). Pour chaque véhicule (type de carburant + norme EURO), les facteurs d'émissions sont calculés sur une distribution moyenne représentative du cas suisse en termes de taille, âge et système de traitement des polluants émis. Peu de possibilités sont donc offertes pour construire une flotte automobile paramétrable pour être représentative de la réalité.

Il est néanmoins prévu une évolution dans les inventaires de transport et en particulier automobile d'Ecoinvent. La version 3 devrait en effet proposer de pouvoir paramétrer, par exemple, la masse totale du véhicule et sa consommation d'énergie, à la guise de l'utilisateur (Del Duce et al. 2012). Suite à ce travail de thèse, nous pensons qu'il serait en effet judicieux de proposer dans les bases de données des véhicules plus paramétrables, voire un choix plus large de véhicules selon les besoins.

IV.2.1.3 Taille des jeux de données

L'une des limites à la subdivision par besoins est la quantité de données nécessaires et par conséquent la taille des jeux de données à manipuler.

En effet, pour parvenir à une évaluation discrétisée par besoins, de nombreuses données sont requises, signifiant à la fois un travail poussé de collecte, mais aussi de traitement. Ainsi, en se concentrant uniquement sur les déplacements considérés dans cette thèse, le nombre de pkms parcourues annuellement pour chacun des 24 besoins et chacun des 17 modes de transport (ou catégories de modes) était nécessaire. Or les données d'EMD recensent des nombres de déplacements effectués par un individu par besoins et par modes. Un traitement important (expliqué dans le chapitre II) a donc dû être réalisé afin d'obtenir des pkms, basé principalement sur d'autres informations données par les EMD, mais souvent partielles (distance moyenne d'un déplacement pour certains modes, distance moyenne de déplacements pour certains motifs). Ces informations ont donc été complétées de données de littérature permettant l'obtention de la matrice des pkms. Ce traitement a été répété pour les différentes aires urbaines. S'ajoute à cela la nécessité de renseigner également certaines modalités de réalisation (taux d'occupation, flottes, consommations, etc.).

Une partie de cette difficulté a été levée, pour l'évaluation des aires urbaines de Bordeaux, Toulon et Valenciennes. En effet, le développement du cas de Saint-Etienne a permis de mettre au point un système de collecte et de traitement relativement performant, adaptable rapidement aux aires urbaines suivantes. Cependant, malgré l'utilisation de la méthode standardisée des EMD, des nuances ont été remarquées dans les fichiers de données obtenus. Deux colonnes pouvaient par exemple être inversées d'une EMD à l'autre. Il est donc difficile de prévoir, *a priori*, un système entièrement automatisé pour l'obtention d'un fichier Excel standardisé des données nécessaires à l'ACV. Mais la difficulté a néanmoins été théoriquement sensiblement diminuée à l'aide du cas stéphanois, cela étant confirmé par la pratique sur les autres aires urbaines.

La seconde difficulté de travailler avec autant de données a résidé dans l'implémentation dans le logiciel d'ACV Simapro. Le fonctionnement du logiciel est tel qu'il fallait, manuellement rentrer chaque donnée au bon emplacement. Durant la période de test de la méthodologie, synonyme de modifications régulières de tout ou grande partie des données, cela signifiait modifier manuellement les 408 (24 besoins * 17 modes) ainsi que les données supplémentaires (taux d'occupation, flottes, consommations, etc.). Cette quantité de données rendait également ainsi plus probable d'éventuelles erreurs (ne serait-ce que les fautes de frappe) et plus difficile leur détection.

Une partie de cette difficulté a cependant été levée avec l'utilisation de la version Developer du logiciel ACV Simapro couplée au fichier Excel standardisé. Cette version permet de créer des liens directs et dynamiques entre des fichiers Excel et le logiciel de calcul. Simapro ira donc chercher directement la valeur souhaitée (un nombre de pkms automobile par exemple) dans une cellule précise d'un fichier Excel.

Il était important de pouvoir lever ces difficultés afin de proposer les bases solides d'un outil d'aide à la décision. Si seul le périmètre EMD (et également une base pour celui des marchandises) est pour l'heure standardisé, il apparaît relativement simple de compléter le fichier avec les données souhaitées. La première implémentation d'une nouvelle solution à tester requiert quatre étapes illustrées sur la Figure 51 :

- **Etape 1** : le rajout d'une colonne correspondante dans le fichier Excel standardisé (à la suite du tableau de données existant) ;
- **Etape 2** : le rajout, si nécessaire de données complémentaires dans le fichier Excel (du type taux d'occupation d'un véhicule) ;
- **Etape 3** : la création du processus souhaité dans Simapro (ou l'adaptation d'un processus existant dans Ecoinvent) ;
- **Etape 4** : la création du lien entre des données Excel et leurs emplacements dans Simapro.

Cela étant réalisé une fois, il sera possible d'utiliser cette nouvelle solution dans tous les scénarios de mobilité qu'un utilisateur souhaite tester ensuite.

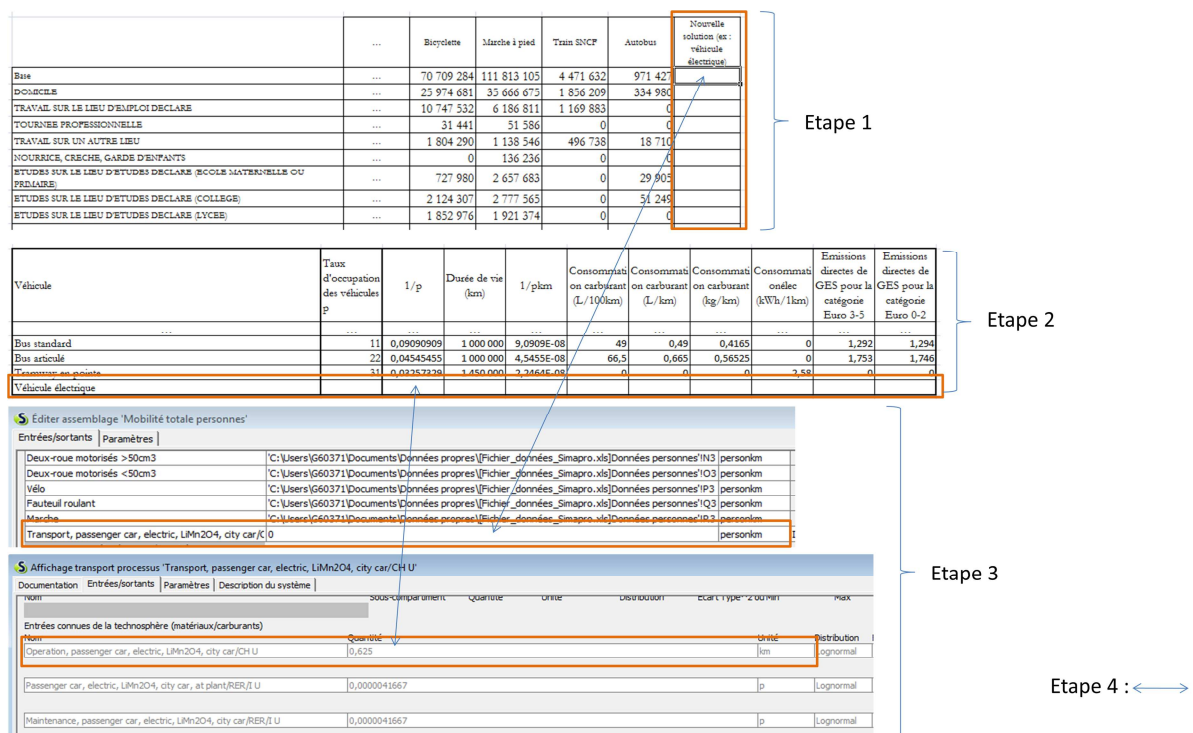


Figure 51 : Description des quatre étapes pour l'insertion d'une nouvelle solution de mobilité dans la méthodologie (exemple du véhicule électrique)

IV.2.2 Limites relatives aux indicateurs ACV

La partie précédente a dressé un panorama des limites liées aux données. Celle qui suit propose d'évoquer celles relatives aux indicateurs.

Ce travail de thèse a pris le parti de se concentrer essentiellement sur les émissions de GES, dans les différentes propositions méthodologiques proposées et testées. Ainsi l'évaluation de l'opportunité de subdiviser la mobilité en besoins ou encore les exemples d'application ont principalement été développés sur les émissions des GES. Cependant, l'ACV est une méthode multicritère offrant la possibilité d'étudier une multitude de flux de polluants et c'est l'un des avantages mis en avant pour son choix comme méthode d'évaluation. Le domaine des transports est source de plusieurs problématiques environnementales ou sanitaires (Citepa 2011). Prendre une décision sur le seul critère des émissions de GES pose problème. En effet, il est possible que ces décisions, visant à réduire l'impact sur le changement climatique entraîne une augmentation des émissions d'autres polluants et donc d'autres impacts potentiels.

Dans le cas de notre travail sur la mobilité, l'intérêt d'élargir l'évaluation à d'autres indicateurs d'impacts a été montré. En chapitre III, notamment, l'évaluation globale par la méthode de caractérisation IMPACT 2002+ a mis en exergue que les comparaisons pouvaient différer selon les impacts potentiels abordés. Par exemple, la part modale importante de deux-roues à Toulon semble impliquer des émissions plus importantes de composés organiques volatils non méthaniques (NMVOC) et de BTX (Bentène, Toluène, Xylène) conduisant à un plus fort score sur l'impact potentiel « respiratory organics ». De même, l'importante utilisation du tramway, utilisant l'électricité implique à Bordeaux un score important pour l'impact « ionizing radiation » (du fait de la part du nucléaire dans le mix électrique français).

Cependant, cette caractérisation en impacts est sujette à discussions et ne saurait être, en l'état, utilisée à des fins d'aide à la décision. C'est pourquoi il a décidé de ne pas analyser davantage les résultats obtenus et de rester à l'évocation de l'importance de disposer d'autres indicateurs dans un développement ultérieur de la méthodologie. Les principales limites des indicateurs d'impact se situent dans leur capacité à être représentatifs de la réalité dans le cas d'enjeux locaux ou régionaux (Potting & M. Hauschild 1997). Nous sommes conscients que cette limitation aux émissions de GES constitue une limite actuelle de la méthodologie et certains indicateurs dont il nous semblerait judicieux de disposer. Un focus sera fait plus tard, dans la partie « perspectives », sur la spatialisation en ACV.

- Enjeux pour la santé humaine : les impacts des transports sur la santé humaine sont des enjeux forts pour le secteur des transports. Dans l'exemple de la méthode de caractérisation IMPACT 2002+, utilisée dans cette thèse, l'indicateur endpoint (ou indicateur de dommage) « santé humaine » associe 5 catégories d'impact intermédiaires : toxicité humaine, radiations ionisantes, oxydation photochimique, effets respiratoires et destruction de la couche d'ozone. Ces indicateurs sont exprimés en DALY (disability adjusted life year) rendant compte du nombre d'années en bonne santé perdues. Plusieurs limites méthodologiques réduisent cependant la capacité de ces indicateurs à

rendre compte de la réalité (Boize et al. 2008). L'ACV ne tient pas compte des effets de seuils. Ensuite, les enjeux sur la santé humaine sont des problématiques locales, dont l'ACV peine à rendre compte. Elle ne tient pas compte non plus de la temporalité des émissions, particulièrement importante pour les polluants atmosphériques sujets à des phénomènes de dispersion et donc de dilution rapide. Ces différents éléments mettent donc en question la représentativité de la réalité de ces émissions sur la santé humaine. Différents laboratoires de recherche se penchent activement sur ces questions, notamment celle de la spatialisation afin d'améliorer la prise en compte de ces enjeux.

- Modification du territoire : le secteur des transports a un fort impact sur le territoire, notamment par le développement d'infrastructures (Fernández-Sánchez & Rodríguez-López 2010) mais aussi par la production d'agrocarburants :
 - o Impacts sur la biodiversité : L'ACV ne permet pas à l'heure actuelle d'évaluer les impacts sur la biodiversité (Geyer et al. 2010). Les liens entre occupation du territoire (Land Use) et biodiversité sont recherchés, plaçant l'hétérogénéité de l'occupation des sols comme un traceur révélateur de la perte de biodiversité (De Baan et al. 2013). La perte de biodiversité peut être observée lors d'un changement d'affectation des sols. Pour certains systèmes spécifiques, il est également possible d'observer l'évolution de la biodiversité au long du cycle de vie. C'est le cas par exemple pour les forêts (Winter & Brambach 2011). Cependant, ces recherches se confrontent, elles aussi aux problématiques de spatialisation (Urban et al. 2012) et certaines options sont explorées pour coupler l'ACV aux SIG telle que celle proposée par Geyer et al (2010).
 - o Impacts indirects du changement d'affectation des sols : la problématique des émissions indirectes de GES liées au changement d'affectation des sols (CAS) a été relevée notamment lors de l'ACV des agrocarburants de première générations commanditée par l'ADEME. La Commission Européenne s'est par ailleurs saisie également de ce problème des impacts indirects du changement d'affectation des sols (Koponen et al. 2012). La déforestation, à des fins de production d'agrocarburants implique par exemple une disparition des puits de carbone que constituent les forêts. Au-delà des émissions de GES, les terres agricoles utilisées pour les agrocarburants ne le sont pas pour l'alimentation, impliquant une pression sur la ressource alimentaire.
- Impacts sur la ressource en eau : la ressource en eau est impactée par le secteur des transports. L'exemple des enjeux liés à la production d'agrocarburants est explicité ici :
 - o Réserves : la consommation d'eau nécessaire à la production d'agrocarburants est peu évaluée par les études sur les agrocarburants qui se concentrent sur les émissions de GES et la consommation énergétique (Faist Emmenegger et al. 2011). Pourtant, elle implique une pression forte sur la ressource.
 - o Eutrophisation : des amendements sont apportés à des fins d'augmenter les rendements de la production d'agrocarburants. Cet apport a un impact sur l'eutrophisation. L'indicateur d'impact « eutrophisation » existe en ACV.

Cependant il n'est pas spatialisé et ne reflète donc pas finement la réalité de cet enjeu régional.

- Enjeux liés à la production d'électricité : si l'électricité est relativement peu utilisée aujourd'hui par les transports en phase d'usage (en comparaison avec la ressource fossile), les développements annoncés pourraient changer la donne (augmentation de la part de véhicules électriques notamment). En France, cela a un effet positif sur les émissions de GES, du fait d'un mix électrique assez peu carboné. Cependant, la démocratisation des solutions électriques pourrait nécessiter de pouvoir tenir compte d'enjeux supplémentaires. Les études sont nombreuses concernant les émissions de GES des filières énergétiques (Turconi et al. 2013; Padey et al. 2012) (et de façon moindre celles de NO_x et de SO₂), un manque d'indicateurs permettant d'évaluer la durabilité de ces filières est tout de même relevé, notamment pour la filière nucléaire (Stamford & Azapagic 2011). Une nouvelle fois ce manque reflète les difficultés méthodologiques de l'ACV à rendre compte des impacts locaux.
- Le bruit : le bruit est un enjeu important du secteur des transports. Cependant il n'est actuellement pas étudié en ACV. Il serait donc intéressant de pouvoir disposer d'un indicateur « bruit » qui pourrait se construire sur le modèle de l'indicateur midpoint proposé par Marchand et al (2012) afin de quantifier les odeurs générées par la filière déchets. Une nouvelle fois, cet enjeu est local et devra donc être étudié dans un cadre spatialisé.

IV.2.3 Incertitudes

Ce travail de thèse ne présente pas de calcul d'incertitudes. Comme nous l'avons évoqué en chapitre III, les résultats présentés doivent être relativisés par rapport aux différentes incertitudes sur les données. Ces incertitudes peuvent se décomposer en deux catégories :

- celle liée aux données propres au système (données de déplacements, taux d'occupation, renseignements sur les flottes, etc.) ;
- celle liée aux données d'inventaire de cycle de vie, et donc à la base de données Ecoinvent.

Pour une comparaison, le fait d'utiliser des jeux de données similaires limite les problèmes d'incertitude. En effet, la hiérarchisation des scénarios (les aires urbaines dans notre cas) restera vraie. Dans une telle étude comparative, il est en effet intéressant de disposer de données provenant d'une source commune ou suivant une méthodologie commune.

Les données de déplacements utilisées ici ont volontairement été réduites aux déplacements couverts par les EMD ayant pour effet de limiter l'incertitude sur cette partie à celle induite par la méthodologie standardisée CERTU. Cette incertitude est variable selon les données observées mais toujours minimisée par le choix de grands échantillons pour l'enquête (ne dépassant pas les 2% dans le cas de Bordeaux par exemple (BVA & La Cub 2009)).

De même l'utilisation d'une seule base de données ACV et donc d'inventaires (identiquement adaptés au cas français) limite l'incertitude sur les données environnementales à celles induites par Ecoinvent et les méthodes de caractérisation utilisées.

Enfin, une incertitude existe sur les différents résultats présentés. Un calcul plus précis permettrait d'apporter une confiance supplémentaire à la méthodologie. Cela ne remet cependant pas en cause les résultats comparatifs du fait de l'utilisation principale de jeux de données identiques, provenant de méthodologies standardisées.

En conclusion, si la comparaison des différents cas urbains n'est pas remise en cause du fait d'utilisation de bases de données similaires, un calcul d'incertitudes permettrait de conforter les résultats absolus, à l'échelle d'une aire urbaine.

IV.3 Perspectives

IV.3.1 Potentialités pour le test de scénarios

La méthodologie permet d'ajouter de nouveaux éléments dans un scénario afin de tester leur pertinence environnementale. Elle permet surtout de rajouter ces éléments de manière pertinente, en lien avec le besoin de déplacement qu'ils concernent. Parfois, un changement de comportements ou encore une décision politique peuvent entraîner des modifications seulement sur une partie des déplacements. La subdivision par besoin permet alors de considérer cette modification telle qu'elle intervient dans la réalité (et non d'un point de vue global).

Par exemple, le passage de la semaine de quatre jours à celle de quatre jours et demi va entraîner une augmentation des voyages domicile-école. Cependant, ces trajets étant relativement peu émetteurs à la pkm par rapport à la moyenne, il paraît important de pouvoir tester l'effet d'une telle mesure en utilisant un bilan à la pkm adapté (et non le bilan GES moyen). Il est possible d'observer l'impact environnemental d'une telle mesure, par exemple sur le cas de l'agglomération stéphanoise. Chaque année, environ 13 675 000 pkms sont réalisées pour les trajets domicile-école (vers l'école primaire). Rajouter une demi-journée par semaine augmente le nombre de $(1/4) * 13\,675\,000 = 3\,418\,750$ pkms. Le cas d'application a permis d'évaluer à 172 g CO₂ eq le bilan GES pour une pkm pour ce besoin. La mesure impliquerait donc une augmentation des émissions annuelles de 590 t CO₂ eq environ. A noter que cette estimation ne tient pas compte des déplacements évités (activités extra-scolaires, promenades, etc.) et une étude complémentaire serait nécessaire afin d'affiner cet exemple. Ici, sans la subdivision par besoins, les résultats auraient été une augmentation de 630 t CO₂ eq environ (avec un bilan à la pkm moyen pour Saint-Etienne de 184 g CO₂ eq). La différence entre les deux calculs serait donc de moins de 10%, ce qui semble ici peu significatif. Pour d'autres besoins, pour lesquels l'écart entre la moyenne et le bilan pour le besoin est plus grand, l'intérêt de la subdivision est plus parlant. La suite de cette partie propose de s'intéresser au télétravail, permettant d'éviter des déplacements domicile-travail, particulièrement émetteurs.

Ce travail de thèse s'est attaché à observer la mobilité physique (que l'on peut qualifier de traditionnelle). Cependant, du fait d'enjeux économiques et environnementaux grandissants, des solutions alternatives se développent. Leur but est, pour le même service rendu, de supprimer le déplacement habituel par une autre solution. Peuvent être cités par exemple la collecte pneumatique des déchets (permettant de supprimer les déplacements des bennes de collecte des ordures ménagères), le e-commerce (mutualisant une part des déplacements par des livraisons à domicile optimisées), la visioconférence (réduisant les déplacements des intervenants) ou encore le télétravail (limitant le nombre de déplacements domicile-travail).

L'impact de ces solutions est difficilement observable actuellement dans les évaluations d'impacts environnementaux de la mobilité. Ces alternatives à la mobilité traditionnelle suppriment une part des déplacements mais sont difficilement quantifiables. Cela est en partie dû également à leur actuelle marginalité. Toutefois, il est envisageable que l'augmentation du coût des déplacements (induite

notamment par celle du prix des ressources fossiles) et le développement constant des Technologies de l'Information et de la Communication (TIC) conduisent au développement de ces solutions. Et ces alternatives ont un coût environnemental. Bien que parfois mises en avant du fait du rôle bénéfique qu'elles jouent en diminuant le trafic automobile, ces solutions ont un impact qui doit être évalué également de manière globale. En effet, si 5 personnes restent travailler chez elles, ce sont autant d'effets induits (chauffage, ordinateur, éclairage, etc.), si bien qu'une analyse fine est nécessaire pour évaluer le coût environnemental global qui ne se limite pas au trajet évité.

La méthodologie proposée dans ce travail de thèse offre la possibilité d'intégrer facilement ces nouvelles mobilités. En effet, ces dernières sont souvent propres à un nombre limité de besoins de déplacements. Par exemple, le télétravail ou la visioconférence concernent essentiellement les motifs professionnels. Le e-commerce supprime surtout des déplacements pour achats. Elles vont donc permettre d'éviter un certain nombre de kilomètres effectués par des modes de transport traditionnels, mais sur des besoins spécifiques, ayant, nous l'avons vu, des bilans environnementaux différents. Il apparaît intéressant de pouvoir substituer les solutions alternatives aux bons déplacements. Par exemple, un déplacement domicile-travail étant particulièrement émetteur, il sera plus révélateur de lui substituer une part de télétravail que de le faire à la totalité des déplacements.

IV.3.1.1 Exemple du télétravail

Cette partie propose de discuter plus en détail du cas du télétravail, qui est un exemple emblématique des alternatives à la mobilité. Tout d'abord, un état de la situation du télétravail en France est dressé, permettant d'estimer les potentiels de développement de cette méthodologie. Ensuite, l'intérêt de la différenciation par besoins est observé sur cet exemple.

IV.3.1.1.1 Généralités sur le télétravail

La volonté d'opter pour le télétravail dépend de plusieurs paramètres tels que la possibilité de le faire (nature de l'activité et volonté de l'entreprise) mais aussi, l'âge, le sexe, le type d'activité professionnelle ou encore le niveau de compétence (Bélanger 1999). Il tend à se démocratiser d'années en années. Ainsi, la France est en passe de combler son retard sur certains voisins européens, avec 16,7% de la population active travaillant en dehors de son bureau plus d'un jour par semaine (De Mazenot 2013), tandis que selon le Centre d'Analyses Stratégique (CAS), 50% de la population exercerait en 2015 une activité télétravaillable (Ferhenbach et al. 2009).

Intuitivement, l'économie de trajets domicile-travail, souvent réalisés en automobile laisse penser que le télétravail a un effet bénéfique sur l'environnement. En observant les trajets des télétravailleurs, il apparaît ainsi une réduction significative des impacts, également dans le cas de télétravail dans les centres de mutualisation (Mokhtarian & Varma 1998). Cependant, en faisant l'analyse de cycle de vie comparée du télétravail, il apparaît que cette réduction des impacts n'est pas si évidente. Un certain nombre d'analyses de sensibilité montre qu'elle est très dépendante de quelques paramètres (Brulliard et al. 2008) :

- La distance entre le domicile et le lieu de travail habituel ;
- L'efficacité énergétique du bureau, au lieu de travail ;
- L'efficacité énergétique du bureau, au domicile ;
- Le niveau de mutualisation des bureaux au lieu de travail : cela permet de partager certaines dépenses, essentiellement énergétiques (chauffage, éclairage, etc.) et donc leurs impacts.

Un programme national sur le télétravail aux Etats-Unis s'est heurté à la difficulté méthodologique d'imaginer un télétravail à grande échelle et ses possibles conséquences, en particulier environnementales. Pour un télétravailleur unique, les gains environnementaux ont été jugés minimes au regard du coût de mise en œuvre (Nelson et al. 2007).

Egalement, le choix du télétravail implique de considérer l'impact sur l'utilisation de l'espace. Pour garder une efficacité satisfaisante dans l'activité professionnelle, le télétravail doit se faire avec le minimum d'interaction possible avec la vie hors travail donc idéalement dans un bureau dédié, coupé du reste du logement. De plus, le télétravail s'effectue dans la majorité des cas seulement quelques jours par semaine, ce qui oblige l'entreprise à conserver un bureau pour les autres jours. Ainsi, cela crée une immobilisation supplémentaire de surface.

Peu considérés dans les études, les effets rebonds du télétravail devraient être pris en compte dans le bilan environnemental (Le Pochat 2011). En effet, il serait intéressant d'étudier l'effet que peut avoir le télétravail sur le reste des activités. Seules des hypothèses sont émises ici. Par exemple, l'un des arguments positifs annoncés est que le gain de temps par la suppression des trajets domicile-travail entraîne une augmentation des activités extra-professionnelles. Cependant, celles-ci ont aussi des impacts sur l'environnement. Les télétravailleurs résidant habituellement loin de leur lieu de travail, une part d'entre eux utilise le train lorsqu'ils doivent se rendre au travail. Une augmentation de la part de télétravail pourrait impliquer une diminution des utilisateurs réguliers du train et pourquoi pas induire la suppression de certaines lignes.

Au-delà de l'aspect environnemental, il convient de considérer les conséquences sociales et professionnelles, plus largement étudiées. Ainsi, le télétravail permet à la fois une organisation de ses journées différente puisque les trajets, souvent chronophages, sont supprimés. Cependant, il minimise également un certain nombre d'interactions sociales (avec les collègues ou les managers notamment) qui peuvent avoir un effet bénéfique sur l'efficacité ou la prise de décisions (Wilton et al. 2011). Ainsi, un certain nombre d'interrogations demeurent sur la durée de travail et les risques d'accidents associés, les risques d'inégalités entre les employés du fait de leur éloignement du management, l'absence de formation des équipes de management vis-à-vis du travail à distance (De Mazenot 2013). Il est ainsi important de mettre en place des solutions d'interaction efficaces entre les travailleurs à distance et leurs collègues (Pulido & López 2005).

IV.3.1.1.2 Intérêt de la subdivision par besoin pour la prise en compte du bilan GES du télétravail

Cette partie cherche à évaluer l'intérêt de la subdivision en besoins de déplacements pour évaluer l'incidence du remplacement d'une part des trajets domicile-travail par le télétravail. Dans cette thèse, la pertinence du télétravail au regard des émissions de GES n'est pas évaluée en soit. Seule l'est la différence observable en termes d'émissions de GES évitées que l'on subdivise (en considérant donc le bilan à la pkm spécifique aux trajets domicile-travail, soit 232 g CO₂ eq / pkm) ou non (en considérant un bilan à la pkm moyen, soit 184 g CO₂ eq / pkm) la mobilité en besoins.

Il est supposé que 5% des trajets domicile-travail sont supprimés, du fait du télétravail. C'est-à-dire qu'il est considéré que 10% des actifs pratiquent le télétravail pour la moitié du temps. La quantité de GES évitée est alors calculée pour le cas de Saint-Etienne, dans le cas d'une subdivision en besoins et dans le cas d'un calcul moyen des émissions de GES dans l'agglomération. En 2009, les trajets domicile-travail ont représenté environ 225 millions de pkms dans l'agglomération de Saint-Etienne. Dans le cas du scénario proposé plus haut, 11,25 millions de pkms seraient évités chaque année. Cela représente alors en termes d'émissions de GES :

- Avec une subdivision par besoins : $0,232 * 11,25 = 2,61$ millions kg CO₂ eq = 2 610 t CO₂ eq.
- Sans subdivision par besoins : $0,184 * 11,25 = 2 070$ t CO₂ eq.

En considérant donc un scénario plutôt bas, une différence annuelle de 540 t CO₂ eq apparaît dans le calcul des émissions de GES évitées selon la méthodologie choisie. Avant même d'analyser l'impact (positif ou négatif) qu'aurait le télétravail sur les émissions de GES, cette différence représente à elle seule environ 1% des émissions annuelles de GES dues aux déplacements domicile-travail. De plus, selon l'une ou l'autre des méthodologies, les émissions évitées par le télétravail varient donc d'un ordre de grandeur de 20%.

En conclusion, cet exemple met en avant l'intérêt d'une différenciation par besoin pour le test de scénarios d'alternatives à la mobilité physique (ou traditionnelle).

IV.3.2 Utilisation des méthodes d'analyse factorielle dans l'analyse des résultats

L'ACV présente l'avantage d'être multicritère et de pouvoir donc rendre compte d'impacts environnementaux divers. Cependant, cela peut s'avérer, dans certaines circonstances désavantageux, notamment dans le cas où différents indicateurs donnent des conclusions opposées. En effet, les décideurs, industriels ou politiques sont souvent à la recherche d'indicateurs simples, compréhensibles, mais surtout peu nombreux. En outre, l'esprit humain perd la capacité de hiérarchiser des scénarios à partir d'un certain nombre d'indicateurs (Krippendorff 2004). C'est notamment le cas pour la comparaison de différents scénarios ou solutions complexifiée par la multiplication d'indicateurs. L'avis

d'expert peut permettre de sélectionner parmi le panel de résultats les indicateurs qu'il va être pertinent d'utiliser. Certaines méthodes d'agrégation peuvent être utilisées. L'ACV propose également des moyens de comparer entre eux les indicateurs (telles que la normalisation ou encore la monétarisation). Cette partie traite de la perspective d'utiliser les méthodes d'analyse factorielle dans le but de réduire le nombre d'indicateurs obtenus par l'ACV.

Les méthodes d'analyse factorielle peuvent, comme évoqué, être utilisées en amont, dans la création de cadres plus spécifiques dans les bases de données. Elles pourraient aussi être utilisées en aval, pour l'interprétation des résultats en regroupant entre eux différents indicateurs, se comportant de la même manière sur un système donné. C'est par exemple ce que propose dans sa thèse de doctorat Pérez Gallardo (2013). Partant des résultats qu'il obtient en utilisant notamment la méthode de caractérisation IMPACT 2002+ pour l'ACV de systèmes de production d'énergie photovoltaïque, il utilise l'ACP afin d'observer si certains indicateurs suivent les mêmes tendances, dans la comparaison de différents scénarios. Il note alors la possibilité de n'observer que 4 indicateurs, au lieu de 15 au départ. Ce choix de décrire le système grâce à quelques indicateurs peut-être contesté. En effet, les indicateurs finalement retenus ne sont pas nécessairement les plus pertinents pour le système étudié.

Notre préconisation serait plutôt de chercher à construire de nouveaux indicateurs, sans unité, basés sur les composantes principales identifiées dans l'ACP. Ainsi si par exemple les résultats montrent que 2 composantes principales regroupent une grande part de la variance, elles pourront constituer deux nouveaux indicateurs permettant de comparer des systèmes entre eux. C'est le principe des indicateurs composites. Les composantes principales pourront être expliquées et les variables les constituant être explicitées.

Cependant, une difficulté réside dans le fait que chaque enjeu est exprimé, par les indicateurs ACV dans des unités différentes. Cela implique des valeurs pas nécessairement comparables entre elles. L'ACP devra donc être réalisée sur la matrice normée. Mais, de fait, une information sera alors inexistante : la pertinence de chaque enjeu pour le système étudié. Nous pensons donc que l'utilisation de l'ACP devra être précédée d'une étape de normalisation des impacts ACV.

IV.3.3 Prise en compte des infrastructures

Les infrastructures ont été conservées telles qu'elles sont prises en compte dans Ecoinvent 2.2. Considérées de manière isolée, ces infrastructures ne soient pas réellement représentatives de la réalité⁴³. Cependant, l'impact relatif des infrastructures dans le cycle de vie des modes de transport dans Ecoinvent étant jugé cohérent – par avis d'experts – il a été décidé de conserver la modélisation ainsi. Ce travail de thèse se place à l'échelle de l'ensemble des déplacements et non spécifiquement sur les infrastructures.

⁴³ Ce problème est issu de discussions avec Agnès Jullien et Michel Dauvergne, qui travaillent, à l'IFSTTAR, sur l'ACV d'infrastructures de transport.

Cependant, différentes discussions ont identifié une manière plus appropriée pour prendre en compte ces infrastructures et qui pourrait de plus avoir un apport intéressant dans le contexte de notre méthodologie. Cette partie se concentrera sur l'exemple de la route qui est l'infrastructure la plus développée et utilisée sur l'ensemble du territoire urbain. De plus, son utilisation par de nombreux modes de transport pose des questions importantes sur les règles d'allocation. Cependant, ce qui est dit ici est transposable aux autres infrastructures de transport.

IV.3.3.1 Règles d'allocation

Dans Ecoinvent, l'ensemble du réseau routier est considéré d'un seul bloc. L'ensemble des déplacements y ayant lieu sont alors recensés. Pour chaque mode de transport, la distance totale parcourue pendant la durée de vie de la route et la masse moyenne nette (véhicule + chargement moyen) sont renseignées. Pour chaque véhicule, il est alors possible d'obtenir la distance et la masse.distance totales imprimées au réseau routier. La distance et la masse.distance totales (tous modes confondus) sont également disponibles. Il est considéré que la route est construite indépendamment des différents véhicules y circulant. Une allocation kilométrique est utilisée pour la phase de construction de la route. En revanche, il est considéré que l'usure et la fin de vie sont proportionnelles à la masse d'un véhicule (plus il est lourd, plus il use). Une allocation en fonction de la masse.distance nette est alors utilisée.

Or, il s'avère, après discussion avec experts, qu'une route est en fait dimensionnée pour le plus lourd. Il n'existe pas dans la réalité un seul type de route, mais bien plusieurs, conditionnés par les véhicules devant y circuler et plus particulièrement par le plus lourd d'entre eux. Par exemple, un trottoir ne sera pas construit de la même manière qu'une voie de stationnement ou une voie de bus, puisque pas soumis aux mêmes efforts (Sayagh 2007). De manière simplifiée, plus une route est dimensionnée pour des véhicules lourds, plus elle a un impact important sur l'environnement, du fait de la quantité de matériaux et de liants utilisés. Ainsi, il semble incorrect d'attribuer à une tkm effectuée en vélo la même part d'impact qu'à une tkm effectuée en camion, puisque s'il n'y avait pas eu de camion, l'impact de l'infrastructure aurait été moindre. Il serait donc intéressant d'imaginer une autre manière d'allouer les impacts. Dans la suite, nous faisons une proposition de règle d'allocation différenciée pour chaque mode de transport.

Imaginons une route recevant trois types de véhicules différents V_1 , V_2 , V_3 de masses respectives $m_1 < m_2 < m_3$. Notons R_1 , R_2 et R_3 les routes telles qu'elles auraient été dimensionnées pour recevoir respectivement comme plus lourd véhicules les types V_1 , V_2 et V_3 . Il est alors possible de noter I_{c1} , I_{c2} et I_{c3} les impacts respectifs de la construction des routes R_1 , R_2 et R_3 ; et de même I_{ef1} , I_{ef2} et I_{ef3} les impacts relatifs à leur entretien et leur fin de vie (Tableau 42).

Tableau 39 : Caractéristiques des trois routes proposées pour l'exemple

Dénomination de la route	Véhicules supportés	Impact de la phase de construction	Impact des phases d'entretien et de fin de vie
R1	V1	Ic ₁	Ief ₁
R2	V2 et V1	Ic ₂	Ief ₂
R3	V3, V2 et V1	Ic ₃	Ief ₃

Il est possible de calculer :

- $\Delta Ic_{(3,2)} = Ic_3 - Ic_2$: la différence d'impacts entre les constructions des routes R3 et R2 ;
- $\Delta Ic_{(2,1)} = Ic_2 - Ic_1$: la différence d'impacts entre les constructions des routes R2 et R1 ;
- $\Delta Ief_{(3,2)} = Ief_3 - Ief_2$: la différence d'impacts entre les entretiens et fin de vie des routes R3 et R2 ;
- $\Delta Ief_{(2,1)} = Ief_2 - Ief_1$: la différence d'impacts entre les entretiens et fin de vie des routes R2 et R1.

Alors, l'impact $\Delta Ic_{(3,2)}$ devra être attribué aux seuls véhicules de type V3 (par une allocation kilométrique entre les véhicules de type V3). L'impact $\Delta Ief_{(3,2)}$ sera lui aussi attribué aux véhicules de type V3 (avec cette fois une allocation en fonction de la masse.distance nette).

L'impact $\Delta Ic_{(2,1)}$ devra être attribué aux véhicules de types V2 et V3 (allocation kilométrique) et de même $\Delta Ief_{(2,1)}$ (allocation par masse.distance nette).

Enfin, le reste de l'impact Ic_1 sera alloué (kilométrique) entre les véhicules de types V1, V2 et V3 tout comme Ief_1 (allocation par masse.distance).

Ainsi, si on définit les propriétés des véhicules comme suit :

Tableau 40 : Propriétés d'un véhicule de type Vi

Type de véhicule	Distances annuelles parcourues par l'ensemble des véhicules de ce type pendant la durée de vie de la route	Masse.distances annuelles effectuées par les véhicules de ce type pendant la durée de vie de la route	Impact de la construction pour le véhicule	Impact de l'entretien et la fin de vie pour le véhicule
Vi	km _{Vi,Rj} (sur des routes de type Rj)	tkm _{Vi,Rj} (sur des routes de type Rj)	Ic _{Vi}	Ief _{Vi}

Et respectivement KM_j et TKM_j les distances et masses.distances totales effectuées sur une route de type R_j (tous véhicules confondus).

Il est possible de calculer les impacts Ic et Ief attribué à chacun des types de véhicules. Par exemple, pour un véhicule de type V3 :

$$Ic_{V3} = \Delta Ic_{(3,2)} * \frac{km_{V3,R3}}{KM_3} + \Delta Ic_{(2,1)} * \frac{km_{V3,R2}}{KM_2} + Ic_1 * \frac{km_{V3,R1}}{KM_1}$$

$$Ief_{V3} = \Delta Ief_{(3,2)} * \frac{tkm_{V3,R3}}{TKM_3} + \Delta Ief_{(2,1)} * \frac{tkm_{V3,R2}}{TKM_2} + Ief_1 * \frac{tkm_{V3,R1}}{TKM_1}$$

Et, en généralisant :

$$Ic_{Vn} = \sum_0^n \Delta Ic_{(p,p-1)} * \frac{km_{Vn,Rp-1}}{KM_{p-1}}$$

$$Ief_{Vn} = \sum_0^n \Delta Ief_{(p,p-1)} * \frac{tkm_{Vn,Rp-1}}{TKM_{p-1}}$$

Cette proposition de règle d'allocation pourrait permettre d'affiner les résultats pour la méthodologie mise en place dans ce travail. Bien qu'en travaillant à l'échelle globale, on a pu considérer acceptable l'allocation proposée par Ecoinvent, cette nouvelle proposition pourrait affiner l'évaluation et en particulier avec la décomposition par besoins de mobilité. En effet, les besoins diffèrent notamment par leurs répartitions modales. Attribuer des impacts différenciés à chaque mode permettra donc d'accentuer les particularités de chaque besoin, pour se rapprocher encore de la réalité. Actuellement, il est considéré qu'un vélo roule nécessairement sur le même type de route qu'un camion. Les pistes cyclables, où sont effectués une part des déplacements cyclistes ont pourtant un impact *a priori* moindre sur l'environnement. L'impact des infrastructures pour un déplacement en vélo est donc surestimé, et par conséquent celui d'un besoin de déplacement à forte part modale de vélo.

Les travaux réalisés par l'IFSTTAR, au travers notamment du logiciel ECORCE permettraient de modéliser les différents types de route. Ensuite, pour chaque mode de transport modélisé, une part de chaque route serait allouée, en correspondance avec le cas étudié. Il serait alors possible d'observer si des différences apparaissent entre les besoins. Le fait d'allouer une part de route relative au cas étudié permettrait de plus d'observer d'éventuelles différences entre les aires urbaines (qui ne possèdent pas les mêmes réseaux routiers).

IV.3.3.2 Distance à la carrière

Dans la suite sera évoquée la problématique de la spatialisation en ACV et donc de la localisation des événements conduisant à des émissions de polluants ou consommation de ressources. Dans cette logique, l'impact d'une infrastructure peut aussi changer en fonction de l'endroit où elle est construite. En effet, une composante forte du bilan d'une infrastructure routière est la distance aux carrières ou autres filières fournissant les matériaux (Sayagh 2007). Bien que la construction des infrastructures

occupe une place relativement marginale dans le bilan GES de la mobilité, cette distance à la carrière peut tout de même être un paramètre important à prendre en compte. En effet, une simple analyse de sensibilité sur la distance à la carrière montre qu'un doublement de la distance (à tonnage équivalent) représentera pour un milliard de pkms automobiles (l'ordre de grandeur du nombre de pkms automobiles en une année à Saint-Etienne) plusieurs centaines de tonnes de CO₂ eq supplémentaires (Tableau 41). Si ce paramètre n'apparaît pas comme le plus sensible à l'échelle de la mobilité totale, il serait tout de même intéressant de pouvoir le paramétrer davantage.

Tableau 41 : Analyse de sensibilité sur l'influence de la distance à la carrière sur le bilan GES du trafic automobile

Masse.distance à la carrière en tkm (Initialement : 3,87)	Emissions de GES pour 1 my de route (en kg CO₂ eq)	Emissions associées pour 1 pkm d'automobile (en kg CO₂ eq)	Pour 1Mard de pkms (en kg CO₂ eq)
2	9,78	0,158	158 456 660
4	10,2	0,159	158 625 700
8	10,9	0,159	158 963 770

Cette composante n'est actuellement pas prise en compte dans les bases de données, puisqu'une valeur moyenne est utilisée. Cela serait envisageable dans une optique de plus de possibilités de spatialisation offerte par les bases de données ACV.

IV.3.4 Analyse de Cycle de Vie, impacts à horizons géographiques variables et spatialisation

Plusieurs fois, au cours de ce chapitre, la notion de spatialisation a été évoquée, notamment comme un frein à l'obtention d'indicateurs d'impacts locaux et régionaux représentatifs de la réalité. La recherche en ACV foisonne sur le sujet, notamment ces dernières années. Cette partie propose dans un premier temps un résumé des informations dispensées par la littérature sur la spatialisation en ACV. Dans un second temps, elle propose de se placer à l'échelle de notre travail et d'observer les pistes qui nous semblent intéressantes à explorer pour la spatialisation en ACV, appliquée au sujet de la mobilité urbaine.

IV.3.4.1 Apports potentiels de la spatialisation en ACV

Les impacts environnementaux peuvent se situer à différentes échelles spatiales. En ACV, ils se classent traditionnellement en trois groupes (Tableau 42) : global, régional et local. La méthodologie ACV est particulièrement adaptée pour la prise en compte des impacts environnementaux globaux, tel

que l'impact sur le changement climatique. En revanche, elle l'est moins pour les impacts dits locaux ou régionaux. Dès 1997, l'absence de différenciation spatio-temporelle est identifiée comme une limite à la représentativité de l'ACV des impacts réels (Potting & M. Hauschild 1997).

Tableau 42 : Echelle spatiale des différentes catégories d'impact en ACV, d'après (Aissani 2008; Marchand 2013)

Echelle Globale	Echelle régionale	Echelle locale
Réchauffement climatique	Pollution photochimique	
Déplétion de la couche d'ozone	Acidification	Toxicité
Epuisement des ressources non renouvelables	Eutrophisation	Ecotoxicité
		Nuisances (bruit, odeurs, impacts sur le paysage)

Depuis quelques années cependant, la spatialisation des impacts est devenue un axe de recherche privilégié en ACV. Deux questions sont en jeu :

- Les effets de la concentration de polluants pouvant avoir un effet direct sur l'environnement ou la santé (les épisodes de forte concentration en polluants de l'air, l'été, pouvant provoquer des troubles respiratoires sur les populations à risque par exemple) (Dresen & Jandewerth 2012) ;
- La qualité des milieux récepteurs, potentiellement plus impactés par l'émission de certains polluants (l'émission de nutriments aura un effet empiré dans un milieu déjà eutrophe, comme cela est le cas en Bretagne par exemple) (Helmes et al. 2012).

S'il ne faut pas nécessairement chercher à ce que l'ACV puisse concurrencer les modélisations de dispersion des polluants utilisées, par exemple, pour représenter les flux de polluants des transports sur certains axes d'une ville, il serait néanmoins intéressant de disposer de moyens de prendre en compte la localisation des émissions. Ainsi, plusieurs secteurs de la recherche en ACV tendent vers la prise en compte des spécificités spatiales, tant pour la gestion des déchets (Bellon-Maurel et al. 2013) que pour la ressource en eau (Boulay et al. 2011; Manneh et al. 2009; Humbert 2009) ou encore la production d'électricité (Beloin-Saint-Pierre & Blanc 2011).

Si l'usage de la ressource en eau peut avoir des conséquences sur les écosystèmes, l'homme et les générations futures (Bayart et al. 2010), ce sont essentiellement celles sur l'homme et sa santé qui sont observées dans le cadre des recherches sur les méthodes de prise en compte de la spatialisation en ACV, notamment menées par le CIRAIG (Centre interuniversitaire de recherche sur le cycle de vie des produits, procédés et services) et Quantis dans le cadre du développement de la méthode de caractérisation IMPACT World+. Il est considéré que l'homme utilise l'eau douce pour sept usages distincts : les besoins domestiques, l'agriculture, l'industrie, la pêche, la production d'énergie hydraulique, les transports et les loisirs. Chacune de ces activités a des effets tant sur la quantité que sur la qualité de la ressource. Pour chaque processus nécessitant de l'eau, l'impact sur la santé humaine va être mesuré en calculant la différence entre le volume d'eau entrant dans le processus et le volume en sortant, pondérés de leurs facteurs de caractérisations respectifs. Ces facteurs de caractérisation sont fonctions du devenir

des polluants dans l'environnement (et donc de la qualité initiale de ce dernier), des risques d'exposition et des effets associés (Boulay et al. 2011). La ressource en eau n'est cependant pas la même en tout point de la planète. De plus, la capacité des populations à gérer son utilisation (et donc à compenser une éventuelle dégradation en quantité ou qualité) est dépendante des capacités économiques. Le principe de la méthode avancée dans IMPACT World+ est de diviser la planète en différents territoires, correspondant par exemple aux bassins versants. A chacun est alors attribué un stress hydrique, fonction des différents paramètres évoqués précédemment. Ainsi, un même processus n'aura pas le même impact selon l'endroit où il intervient. Ainsi, par exemple, le Canada qui était représenté initialement par un référentiel unique, peut être divisé en 172 bassins versants ou encore 538 zones pour la pollution atmosphérique (Manneh et al. 2009). Ensuite, deux méthodes existent pour attribuer à un territoire un facteur d'impact :

- la méthode « archetype », que nous avons traduit par « typologie » qui consiste à déterminer les facteurs d'impact en fonction de la valeur de certains paramètres influents ;
- la méthode « geographic » qui consiste à construire un référentiel du territoire étudié à l'aide des systèmes d'information géographiques (SIG) (Dresen & Jandewerth 2012; Geyer et al. 2010) ;

Si les deux méthodes semblent toutes deux donner des résultats fiables, l'utilisation d'une typologie est plus pratique puisqu'elle ne suppose pas de devoir introduire le SIG dans les bases de données ACV (Humbert 2009).

Les recherches actuelles visent donc à attribuer à certains territoires une note initiale, qui va déterminer leur réceptivité à un enjeu environnemental. Un exemple beaucoup étudié est l'empreinte eau. Le territoire est divisé en bassins versants. A chacun est attribué un stress hydrique, fonction de la qualité de la ressource en eau (quantité, qualité). Ainsi, un même processus industriel, requérant de l'eau n'aura pas le même impact sur un territoire où le stress hydrique est déjà important que sur un territoire où il est faible. Une généralisation de ce mécanisme est imaginable pour d'autres enjeux environnementaux. Par exemple, la production d'un déchet pourrait voir son impact augmenter sur un territoire où aucune filière de gestion n'est mise en place. L'émission de nutriments pourrait être considérée comme plus problématique sur un territoire déjà particulièrement eutrophe. Ou encore l'émission de particules par le transport pourrait être jugée plus dangereuse dans une zone déjà chargée (par le transport ou un autre secteur (industrie, construction, etc.)). Cette idée de spatialisation nécessite un travail dès l'amont, sur les bases de données. C'est d'ailleurs ce que commence à proposer Ecoinvent, dans sa version 3.

Cette partie a traité jusqu'ici de la notion de spatialisation dans l'ACV. De manière analogue, la question de la temporalité se pose en ACV. En effet, jusqu'à présent, cette notion n'est pas prise en compte. Par exemple, lors d'un déplacement automobile, la part d'un polluant qui avait été émise lors de sa fabrication, et qui doit lui être allouée, est simplement ajoutée aux autres flux du même polluant. Cette notion de temporalité pose évidemment un problème pour les impacts locaux (pour les mêmes raisons qu'évoquées pour la spatialité) mais également pour les impacts globaux. Par exemple, les GES ont tous une durée de vie spécifique qui fait que leur PRG décroît dans le temps. Ainsi, il paraît

intéressant de pouvoir prendre en compte cette notion. Beloin Saint-Pierre et Blanc (2011) proposent un cadre spatio-temporel, prenant en compte les deux notions. Il s'agit d'appréhender la variabilité spatiotemporelle des impacts (Beloin-Saint-Pierre & Blanc 2011). Le principe d'utiliser plusieurs processus unitaires différents dans différents cadres spatiaux pour caractériser une même technologie (Mutel & Hellweg 2009) est élargi au paramètre « temps ».

IV.3.4.2 Spatialisation et mobilité

Bien que notre travail ne s'inscrive pas directement dans les recherches sur la spatialisation des impacts, il est possible d'en extraire des pistes de réflexion autour de la mobilité. Deux points principaux peuvent être évoqués ici :

- La mise en place d'une classification, cohérente avec le courant majoritaire dans la recherche actuelle ;
- L'utilisation des EMD et les possibilités non exploitées qu'elles offrent.

IV.3.4.2.1 Utilisation de la classification pour la spatialisation

Comme cela a été évoqué précédemment, l'utilisation d'archétypes (ou de classes d'une typologie) semble moins coûteuse à mettre en œuvre que les SIG à des fins de spatialisation en ACV. Notre choix de travailler sur une typologie urbaine pourrait être utilisé dans ce sens, à plusieurs niveaux.

Dans ce travail, l'état initial des aires urbaines n'a pas été considéré. Il serait intéressant de disposer, pour les différentes classes, des bruits de fond pour les différents polluants observés. Comme nous l'avons dit, c'est une des raisons principales pour lesquelles le passage de l'observation des flux à la caractérisation en impact (pour l'environnement ou la santé humaine) est biaisée. Dans les études de dispersion des polluants atmosphériques des transports, des fonds de cartes sont utilisés, afin de représenter, par exemple, la concentration initiale d'un tronçon de route en particules, avant d'y ajouter les véhicules. Comme nous l'avons dit, le but n'est pas d'obtenir ce niveau de détail. Il serait cependant intéressant de chercher à attribuer, à chaque typologie un état initial, fonction de différents paramètres (implantation d'industrie émettrice sur le territoire, variables météorologiques pouvant influencer la dispersion, etc.). Ces différents paramètres pourraient être intégrés dès l'amont, dans la détermination des classes par l'ACP. Ils fourniraient ainsi une information supplémentaire, directement liée aux impacts environnementaux, à la détermination de la typologie. Une nouvelle fois, l'ACP (ou plus largement les méthodes d'analyse factorielle) peut être utilisée dans le cadre élargi de notre méthodologie. Si bien que ces méthodes apparaissent comme des outils d'intérêt potentiel tout au long du déroulement de la méthodologie. Sur la Figure 52, les principales étapes de la méthodologie sont présentées en bleu, ainsi que les étapes supplémentaires possibles évoquées dans ce chapitre. Les potentialités d'utiliser les méthodes d'analyse factorielle sont désignées (par simplification) par le sigle « ACP ».

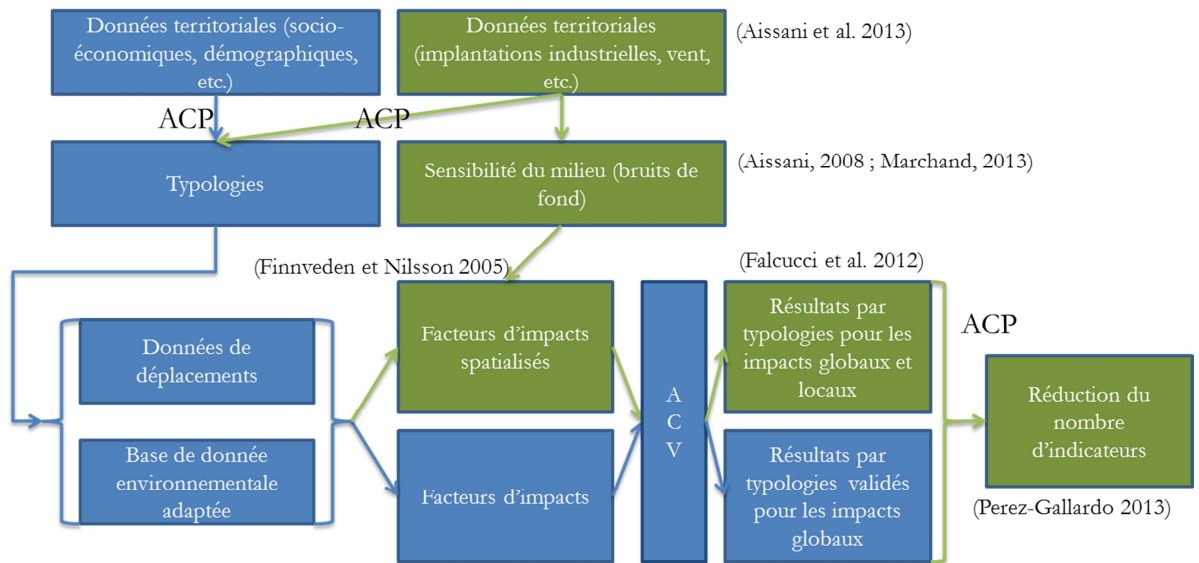


Figure 52 : Représentation générale de la méthodologie (en bleu) et des étapes complémentaires possibles (en vert)

Ensuite, les déplacements sont parfois pris en compte dans des travaux dont le but premier n'est pas nécessairement l'étude de la mobilité. Par exemple, pour comparer différents scénarios d'implantation d'un bâtiment ou d'un écoquartier, les déplacements induits par les usagers sont parfois pris en compte (notamment s'il s'agit de comparer différents sites d'implantation). Ces déplacements sont cependant modélisés de manière relativement grossière. Dans une volonté de mieux considérer les différences spatiales, il serait intéressant selon nous de disposer de données différenciées pour la mobilité. Ainsi, un utilisateur pourra lorsqu'il veut tester le bénéfice d'implanter un écoquartier à Valenciennes ou Toulon, inclure une vision plus réaliste des déplacements des habitants.

IV.3.4.2.2 Opportunités supplémentaires des données d'EMD

Le deuxième point concerne l'opportunité qu'offre l'usage des EMD comme source principale de données de déplacements. En effet, si cela n'a pas été fait ici, il est possible d'obtenir des données zonées pour les EMD. Pour réaliser les EMD, un découpage du territoire en différentes zones est effectué. Il serait donc envisageable d'appliquer notre méthodologie par besoins à chacune de ces zones puis de dresser une cartographie des résultats. Il sera alors intéressant d'identifier les zones où des investissements dans les solutions de mobilité adaptées aux différents besoins seraient les plus bénéfiques. La subdivision par besoin permettrait de plus de sélectionner les domaines à améliorer et potentiellement les solutions à apporter (par exemple sera-t-il préférable d'investir dans un Centre de Distribution Urbain ou dans des nouvelles solutions de transport scolaire ?). Ainsi, l'apport que peut apporter la subdivision par besoin au niveau de l'aire urbaine pourra également être bénéfique à l'intérieur d'une même agglomération, en différenciant les zones.

Ensuite, comme cela a été évoqué précédemment, la méthodologie développée semble applicable à l'ensemble des EMD. Le lien avec Excel permet une certaine automatisation et laisse également

entrevoir la possibilité de traiter rapidement des jeux de données homogènes. Si, comme cela a été remarqué, de petites nuances existent entre les EMD, il apparaît que les données qu'elles produisent sont relativement homogènes (du fait de la standardisation de la méthode). Il est donc tout à fait imaginable de pouvoir appliquer la méthodologie aux résultats d'EMD, et d'obtenir ainsi une évaluation environnementale des EMD, basée sur les besoins de déplacements. En outre, cette évaluation systématique pourra donner l'occasion de confronter plus largement la proposition de classification aux résultats des EMD.

Conclusion générale

La prise de conscience des problématiques environnementales s'accompagne de plus en plus d'objectifs de mitigation et réduction des impacts. L'ensemble des activités anthropiques sont observées sous le prisme de l'évaluation environnementale et régulièrement de nouvelles cibles sont fixées. Parmi elles, le secteur des transports participe tout d'abord aux émissions de gaz à effet de serre (GES), responsable en France de 26% d'entre elles, portées notamment par les émissions de CO₂ (34% des émissions en France) (Citepa 2011). Malgré les diverses actions entreprises, les transports représentent une part toujours croissante des émissions de GES. En France, elles ont augmenté de 13,1% entre 1990 et 2004 (Bernstein et al. 2008). Le secteur des transports est également un enjeu fort pour la pollution atmosphérique. Il est en effet responsable de 20% des émissions annuelles de monoxyde de carbone (CO), 52% de celles d'oxydes d'azote (NOx), 14% des particules fines (PM_{2.5}) et 15% des émissions de composés organiques volatils (COV). Localement, et notamment en milieu urbain, cette part peut augmenter (allant jusqu'à 70% pour les particules fines par exemple) (Citepa 2011). Le développement de solutions de transport supposent de plus la mise en place d'infrastructures et également la fabrication de véhicules, engendrant des problématiques supplémentaires, telles que la raréfaction de certaines ressources naturelles, l'occupation de l'espace ou encore des atteintes à la biodiversité. S'ajoutent à cela des problématiques économiques (la raréfaction des ressources et particulièrement la fin annoncée des carburants fossiles tendent à augmenter le coût d'un déplacement) et sociales (les différentes mesures économiques prises peuvent entraîner une inégalité en matière de mobilité, vecteur reconnu de lien social (Preston & Rajé 2007; Kaufmann 2008)).

Devant l'ensemble de ces enjeux, les différents acteurs du territoire doivent s'organiser. Des scénarios d'avenir sont proposés (DATAR 2012; Jean-Pierre Nicolas & Morice 2006; Negawatt 2013), une législation évolutive est mise en place et les enjeux environnementaux deviennent une composante à part entière de nouveaux projets liés aux transport, que ce soit au niveau des infrastructures avec les études d'impact sur l'environnement (Code de l'environnement 1976) ou à celui des plans de déplacements urbains (PDU) intégrant désormais un volet environnemental (Certu 2011). Des solutions existent et peuvent être de plusieurs ordres (liste non exhaustive) :

- comportementales :
 - promotion des modes de transports doux ;
 - covoiturage ;
 - éco-conduite ;
- technologiques :
 - amélioration des solutions existantes (motorisations, carburants, matériels) ;
 - émergence de nouvelles solutions (véhicules électrique et hybride rechargeable) ;
- économiques :
 - investissements dans les transports en commun ;

- taxes sur les transports ;
- alternatives :
 - remplacement d'une part des déplacements physiques par des solutions virtuelles (télétravail, e-commerce).

L'ensemble des scénarios ou solutions proposés, mais également l'état actuel de la situation, doivent pouvoir être analysés. Ainsi, une réflexion est menée sur les indicateurs permettant d'évaluer les scénarios prospectifs pour la mobilité (Gallez 2002) et plus largement la durabilité en matière de déplacements (Robert Joumard & Jean-Pierre Nicolas 2010). En matière d'environnement, différentes méthodes d'évaluation existent. Parmi elles, l'Analyse de Cycle de Vie (ACV) est un outil normalisé (ISO 14040 2006; ISO 14044 2006) quantifiant les impacts environnementaux tout au long du cycle de vie (« du berceau à la tombe ») d'un produit ou service. Elle tient ainsi compte des possibles transferts de pollution entre les phases du cycle de vie. Elle présente également l'intérêt d'être multicritère. Très peu utilisée à l'échelle territoriale, l'ACV montre, à l'échelle des véhicules, que l'évaluation environnementale de la seule phase d'usage ne reflète pas l'ensemble des impacts environnementaux. Par exemple, elle ne tient pas compte d'environ 20% des émissions de GES pour un déplacement automobile (Spielmann et al. 2007; Kakudate et al. 2002; Finkbeiner & Hoffmann 2006) et révèle l'intérêt de considérer l'ensemble du cycle de vie dans l'évaluation (M. V. Chester & Horvath 2009). Pour certaines technologies, mais également pour certains enjeux environnementaux, cette part non prise en compte par la phase d'usage est encore accentuée.

Le territoire urbain est au cœur de la problématique des transports. Regroupant une part importante de la population, il est sujet à des enjeux particuliers, notamment en termes d'organisation. La concentration des populations est source à la fois de contraintes et d'opportunités pour proposer des alternatives à l'automobile. La part modale des transports collectifs, par exemple, y est plus grande qu'en milieu rural. Au cœur de la problématique de la mobilité se situe également l'individu dont les besoins de mobilité impliquent les déplacements. Tous ces besoins ne sont pas identiques. Ainsi l'individu ne choisira pas nécessairement la même solution de déplacement selon le besoin. Il choisira un mode de transport adapté à ses attentes en termes de confort, rapidité, fiabilité, etc. La mobilité est donc déterminée par de nombreux paramètres socio-économiques, démographiques ou encore spatiaux.

L'ensemble des considérations évoquées a conduit à proposer, dans le cadre de ce travail, une méthodologie d'évaluation des impacts environnementaux de la mobilité urbaine, se basant sur deux hypothèses principales :

- Les impacts environnementaux liés aux transports n'ont pas lieu uniquement durant la phase d'usage, mais tout au long du cycle de vie.
- Les modalités de réalisation d'un déplacement dépendent de son motif. Cela va donc impliquer des bilans environnementaux différents en fonction du besoin de déplacement.

Afin de prendre en compte ces deux hypothèses de travail, la méthodologie que nous proposons met à la fois en œuvre l'Analyse de Cycle de Vie pour l'estimation des impacts environnementaux et une subdivision de la mobilité par besoins de déplacement.

Le développement et le test de la méthodologie ont été effectués sur un cas d'application : l'Agglomération de Saint-Etienne Métropole (chapitre II de ce manuscrit). Cela a permis de se confronter à la réalité du terrain. Deux nomenclatures de besoins de déplacements ont été identifiées, pour la mobilité des personnes et celle des marchandises. Pour les personnes, la nomenclature des motifs de déplacement utilisée dans pour les Enquêtes Ménages Déplacements (EMD) a été utilisée (Certu 2009). Ainsi, 24 besoins de déplacements ont été recensés, pouvant se regrouper en 6 catégories : professionnels, scolaires, achats, personnels, autres motifs et déplacements à destination du domicile. Pour la mobilité des marchandises, la nomenclature proposée par les enquêtes Transports de Marchandises en Ville (TMV) a été utilisée (Chiron-Augereau 2009). Elle retient 17 catégories regroupées en deux catégories principales : les échanges entre établissements économiques et les autres flux (collecte des déchets, hôpitaux, déménagements, etc.). Les enquêtes TMV recensent également les déplacements d'achats des particuliers, aussi pris en compte dans la nomenclature des besoins de déplacement des personnes.

Les données de déplacement proviennent à la fois de la littérature et d'une collecte de terrain, auprès des services de l'agglomération, de la société des transports stéphanois (STAS) ou encore du prestataire de l'Enquête Ménages Déplacements (EMD). Pour le transport de marchandises, des données obtenues par le logiciel de modélisation FRETURB dans le cadre du projet Ecluse, avec la méthodologie TMV ont été utilisées. Pour caractériser les déplacements, deux types de données nécessaires ont été identifiés. Tout d'abord, une répartition précise des déplacements en distance par besoin de la nomenclature et par mode de transport est utile. Ensuite, des informations complémentaires ont été collectées sur les modes de transport à Saint-Etienne (flottes, consommations moyennes, etc.) mais aussi sur les modalités d'utilisation particulières de certains modes (notamment le taux d'occupation des véhicules). Une matrice de la mobilité locale des personnes a été obtenue en pkm par mode et par motif. Pour les transports de marchandises, une matrice en tkm par mode et par motif a également été construite, mais avec la nécessité de fortes hypothèses et simplifications.

Les données environnementales ont comme socle la base de données Ecoinvent 2.2 (Frischknecht 2008), référence en ACV. Chaque mode de transport nécessaire a été adapté ou créé si nécessaire afin de pouvoir modéliser le cas stéphanois. Chacun a été construit de manière à représenter au mieux le cas de Saint-Etienne, lorsque des données existaient (par exemple pour la consommation des bus de la STAS) ou, à défaut, le cas français lorsque des données spécifiques à Saint-Etienne n'ont pu être collectées. Chacun des modes de transport pour les personnes et de marchandises ont respectivement pour unité de référence la pkm et la tkm. Pour cela des analyses de sensibilité ont été effectuées sur les inventaires Ecoinvent sur les taux d'occupation, la consommation, les émissions directes et la durée de vie kilométrique de chaque mode étudié et compilées dans un catalogue de fiches synthétiques.

Dans un premier temps, l'évaluation s'est concentrée sur les émissions de gaz à effet de serre (GES). Les premiers résultats ont montré que la mobilité locale des stéphanois les jours ouvrés (périmètre

EMD) émet chaque année environ 270 kilotonnes de CO₂ eq. Pour 375 000 habitant et 250 jours ouvrés, cela représente environ 2,8 kg CO₂ eq par jour par habitant, soit environ 700 kg CO₂ eq par an par habitant (pour la mobilité locale les jours ouvrés). Cette valeur a pu être comparée à d'autres études de la mobilité afin de confirmer que l'ordre de grandeur des résultats proposés par la méthodologie était acceptable. Ils se sont avérés supérieurs (entre 20 et 30%) ce qui étaient attendu du fait de l'utilisation de l'ACV prenant en compte les impacts tout au long du cycle de vie. L'apport de la subdivision par besoins a pu être observé sur le cas stéphanois. Il apparaît que la part de chaque besoin dans le bilan total des émissions est très corrélée à la distance annuelle parcourue pour le besoin. Cependant des bilans à la pkm disparates ont pu être observés allant de 104 à 271 g CO₂ eq par pkm (avec une moyenne à 184 g CO₂ eq par pkm). Les différences entre les impacts environnementaux de chaque besoin laissent entrevoir des potentiels d'amélioration différents pouvant orienter la prise de décision. En effet, pour orienter les investissements, il sera intéressant de tenir compte bien sûr de l'emprise du besoin sur le bilan total, mais également des marges de progression qu'il offre. D'autres impacts potentiels ont été évalués à l'aide de la méthode de caractérisation IMPACT 2002+, mettant en avant l'intérêt de disposer d'une méthode d'évaluation multicritère. En effet les résultats ne suivent pas nécessairement la même tendance pour tous les indicateurs (par l'exemple les émissions de COV).

Le cas d'application stéphanois a permis d'apporter des premiers éléments de réponse aux questionnements apportés par les hypothèses de recherche. Tout d'abord, l'intérêt de la méthodologie ACV a été tout d'abord mis en avant par la part d'impact non prise en compte traditionnellement dans les évaluations GES de la mobilité (environ 16%). Ce résultat intervient de plus dans une situation où l'automobile (pour laquelle la phase d'usage occupe une place importante) est omniprésente. Dans l'optique d'une diminution de la part modale automobile (avancée dans certains scénarios prospectifs), l'intérêt d'une vision cycle de vie grandira encore. Ensuite, bien que les résultats n'aient pas été développés pour des raisons méthodologiques, l'aspect multicritère de l'ACV apparaît présenter un intérêt au vu des quelques tests réalisés. Enfin, le cas de Saint-Etienne a permis de mettre en avant la pertinence d'une subdivision par besoins. En effet, la disparité des résultats obtenus pour la réalisation d'une pkm laisse entrevoir des potentiels intéressants, notamment en matière d'aide à la décision.

L'objet de la thèse étant l'observation de la mobilité à l'échelle des grandes aires urbaines, nous avons ensuite cherché à l'extrapoler à d'autres cas urbains en France. L'hypothèse a été faite qu'il existe des disparités entre les aires urbaines pouvant conduire à une réalisation différente des besoins de mobilité. A partir de revues de littérature sur les déterminants de mobilité (De Witte et al. 2013; Dargay 2008), une proposition de typologie d'aires urbaines a été faite en utilisant les méthodes statistiques d'analyses factorielles. Un jeu de données a été collecté pour les 36 aires urbaines de plus de 250 000 habitants (hors Ile de France) et pour 44 variables sociaux-démographiques, spatiales ou propres aux trajets, pouvant influencer la mobilité. L'Analyse en Composantes Principales (ACP) a été appliquée, couplée à une Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) afin de faire une proposition de classification urbaine. Bien que les caractéristiques géographiques au sens propre (localisation en France) n'aient pas été prises en compte dans l'ACP, la classification montre des regroupements régionaux. Pour trois classes ainsi déterminées, il a été décidé d'appliquer la méthodologie aux aires urbaines les plus proches du centre de gravité. La méthodologie a ainsi été appliquée aux aires urbaines de Valenciennes, Toulon et Bordeaux.

Les résultats de l'application de la méthodologie d'évaluation aux cas types montrent tout d'abord des différences de bilans à l'échelle globale. Il apparaît que les habitants des aires urbaines de Bordeaux et Toulon émettent plus de GES par an (autour de 3 400 g CO₂ eq par jour par hab) que ceux de Saint-Etienne (2 700 g CO₂ eq par jour par hab) puis de Valenciennes (2 400 g CO₂ eq par jour par hab) qui sont les moins émetteurs. S'il apparaît que ce résultat est lié à la distance annuelle parcourue par ces habitants, ce n'est pas la seule raison (puisque les habitants de Toulon émettent légèrement plus de GES que ceux de Bordeaux, malgré une distance annuelle moins importante). De fait, les émissions de GES par pkm varient d'une aire urbaine à l'autre (allant en moyenne de 0,169 kg CO₂ eq par pkm à Valenciennes à 0,184 kg CO₂ eq par pkm à Toulon et Saint-Etienne). Plusieurs paramètres entrent en jeu pour expliquer cette différence (répartitions modales, part de diesel/essence dans la flotte, différences spécifiques sur les besoins). Ensuite, les émissions de GES par pkm différenciées par besoin ont été observées pour les quatre aires urbaines. Les résultats montrent des disparités importantes pour certains besoins particuliers. Les trajets vers l'université, ceux vers la crèche ou nourrice et ceux pour la recherche d'emploi sont ceux présentant le plus de disparités. Cependant, ces différences à la pkm sont à relativiser avec la faible part de ces déplacements dans le total. Un tableau des émissions théoriquement évitables par besoin et par aire urbaine a été proposé. Pour chaque besoin et chaque aire urbaine, le nombre de pkm annuelles a été multiplié à l'écart à la moyenne des quatre aires urbaines, fixant cette moyenne comme une cible théorique acceptable. Ainsi, il est possible d'orienter les décideurs vers les besoins offrant le plus de potentialités. Comme pour le chapitre II sur le cas de Saint-Etienne, l'application de la méthodologie à d'autres indicateurs ACV a confirmé l'intérêt d'une évaluation multicritère, en montrant par exemple les impacts d'une grande part de tramway à Bordeaux sur les enjeux environnementaux liés à la production d'électricité (tandis que sur les émissions de GES, cette part importante de tramway indiquait un effet positif).

La méthodologie développée peut avoir plusieurs apports à l'évaluation environnementale de la mobilité urbaine. Tout d'abord, la notion de cycle de vie et l'utilisation de l'ACV, permet la prise en compte des émissions hors phase d'usage non prises en compte par les méthodes traditionnelles d'évaluation environnementale de la mobilité urbaine. Ensuite, l'utilisation de l'ACV laisse entrevoir une évaluation multicritère dont l'intérêt a été évoqué au cours des paragraphes précédents. Enfin, la subdivision par besoins montre son utilité possible, pour l'aide à la décision notamment en permettant une priorisation des actions vers les besoins offrant le plus de potentiel de réduction des impacts. Cependant, ces différents apports sont à relativiser avec les limites du travail relevées.

La première limite, dans le cadre de ce travail, est que faute de données fiables et homogènes, la méthodologie n'a pas, comme cela avait été envisagé au départ, pu être appliquée à l'ensemble des déplacements urbains. Seuls les déplacements recensés dans les Enquêtes Ménages Déplacements ont été étudiés précisément tout au long du travail. Ceux de marchandises ont été approchés pour le cas stéphanois, afin de préjuger des opportunités d'évaluation, mais non sans d'importantes hypothèses simplificatrices. Si des pistes ont été données afin d'élargir le périmètre d'étude, il sera cependant nécessaire de vérifier la bonne applicabilité de la méthodologie à l'ensemble des déplacements si davantage de données sont disponibles à l'avenir. Ensuite, les résultats se sont concentrés sur les émissions de GES. Bien que l'aspect multicritère de l'ACV ait été mis en avant, les freins

méthodologiques relevés ont poussé à préférer développer la méthodologie autour de ces émissions, dont la caractérisation est fiable en ACV. Cependant, l'intérêt d'une évaluation multicritère, et notamment d'enjeux locaux, a été mis en avant sur quelques calculs d'application. La partie « perspectives » a permis l'évocation des travaux de recherche actuels menés sur la spatialisation en ACV et qui devraient permettre d'améliorer la prise en compte des impacts locaux ou régionaux.

Parmi les perspectives offertes par ce travail, on peut noter la possibilité d'utiliser la méthodologie dans le test de scénarios. Plus encore, la vision par besoins apporte une précision en permettant d'effectuer ces tests sur les besoins appropriés et donc d'observer des effets plus proches de la réalité. Cet outil peut donc avoir un apport pour l'aide à la décision sur des scénarios tels que l'exemple du télétravail donné. A des fins d'aide à la décision, ou de communication, il n'est cependant pas envisageable de proposer un nombre trop important d'indicateurs qui ne permettrait pas aux décideurs de s'y retrouver. En perspective pour l'aide à la décision, l'hypothèse d'une réduction du nombre d'indicateurs (dans l'optique d'une évaluation multicritère réussie) par les méthodes d'analyse factorielle est évoquée. Enfin, quelques discussions intervenues au cours de cette thèse autour de la problématique des infrastructures de transport en ACV a permis de proposer quelques pistes d'amélioration qui mériteraient selon nous d'être développées.

En conclusion, ce travail de thèse a permis de proposer une méthodologie montrant des apports à la fois méthodologiques et pratiques (pour l'aide à la décision ou le test de scénarios). Certains points importants restent néanmoins à améliorer pour lesquels des pistes de réflexion ont été données afin de proposer, à terme, une méthodologie cycle de vie, multicritère et basée sur les besoins, applicable à l'ensemble des déplacements.

Bibliographie

- Aatmeeyata, Kaul, D.S. & Sharma, M., 2009. Traffic generated non-exhaust particulate emissions from concrete pavement: A mass and particle size study for two-wheelers and small cars. *Atmospheric Environment*, 43(35), pp.5691–5697.
- De Abreu e Silva, J., Morency, C. & Goulias, K.G., 2012. Using structural equations modeling to unravel the influence of land use patterns on travel behavior of workers in Montreal. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 46(8), pp.1252–1264.
- ADEME, 2005. *Bilan Carbone d'une activité industrielle ou tertiaire - Guide méthodologique de la méthode (version 3.0) : objectifs, résultats exploitables, choix méthodologiques*, ADEME.
- ADEME, 2010a. Chapitre 4 - Prise en compte des transports. In *Bilan Carbone - Entreprises et Collectivités - Guide des facteurs d'émissions - Version 6.1*. ADEME, p. 97.
- ADEME, 2003. *Logiciel IMPACT-ADEME - Version 2.0*, Paris: ADEME. Available at: <http://www2.ademe.fr> [Accessed February 13, 2012].
- ADEME, 2010b. PDE - Plan de déplacements en entreprise. Available at: <http://www2.ademe.fr/> [Accessed August 5, 2013].
- ADEME, 2012. *Véhicules particuliers vendus en France - Données et Références 2012th ed.*, ADEME.
- Air Pays de la Loire, 2006. Les oxydes d'azote. Available at: <http://www.airpl.org/>.
- Aissani, L., 2008. *Intégration des paramètres spatio-temporels et des risques d'accident à l'Analyse de Cycle de Vie : Application à la filière hydrogène énergie et à la filière essence*. Sciences et Génie de l'Environnement. Saint-Etienne: Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne.
- Albergel, A., Segalou, E. & De Rham, C., 2006. *Mise en place d'une méthodologie pour un bilan environnemental physique du transport de marchandises en ville: consommation, émissions, qualité de l'air*, ADEME, Ministère des transports, de l'équipement, du tourisme et de la mer, LET.
- Althaus, H.-J., 2011. Modern individual mobility. *The international journal of life cycle assessment*, 17(3), pp.267–269.
- Ampasel, 2009. *Cadastre des émissions de CO2 et bilan énergétique - Application à l'agglomération de Saint-Etienne Métropole*,
- Andersson, B.A. & Råde, I., 2001. Metal resource constraints for electric-vehicle batteries. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 6(5), pp.297–324.
- Andre, J. et al., 2004. *Modelling of cold start emissions for passenger cars*, Available at: <http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00546087> [Accessed June 10, 2013].
- André, M. et al., 2006. Real-world European driving cycles, for measuring pollutant emissions from high- and low-powered cars. *Atmospheric Environment*, 40(31), pp.5944–5953.

- André, M., 2004. The ARTEMIS European driving cycles for measuring car pollutant emissions. *Science of the Total Environment*, 334-335, pp.73–84.
- Anger, B., Théry, F. & Levacher, D., 2012. Pour une caractérisation minimale des sédiments fins : application d'une démarche pour leur valorisation en matériaux routiers. In XIIèmes Journées Nationales Génie Côtier - Génie Civil. Cherbourg (France), p. pp 973–984.
- Annema, J.A. & Van Wee, B., 2008. Transport policy in Dutch election manifestos: Estimating the environmental impact. *Transport Policy*, 15(5), pp.283–290.
- Arteconi, A. et al., 2010. Life-cycle greenhouse gas analysis of LNG as a heavy vehicle fuel in Europe. *Applied Energy*, 87(6), pp.2005–2013.
- Asensio, J., Matas, A. & Raymond, J.L., 2001. *Petrol consumption and redistributive effects of its taxation in Spain*, Departament d'Economia Aplicada, Universitat Autònoma de Barcelona. Available at: <http://www.ecap.uab.es/RePEc/doc/wp0109.pdf>.
- Atkinson, R., 2000. Atmospheric chemistry of VOCs and NOx. *Atmospheric Environment*, 34(12–14), pp.2063–2101.
- AudaB, 2008. *Observatoire déplacement-transport - Chiffres clés*, Besançon.
- Auroux, 1982. *Loi n° 82-689 du 4 août 1982 relative aux libertés des travailleurs dans l'entreprise. Loi dite loi Auroux*,.
- De Baan, L., Alkemade, R. & Koellner, T., 2013. Land use impacts on biodiversity in LCA: a global approach. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 18(6), pp.1216–1230.
- Baccaïni, B., Sémécurbe, F. & Thomas, G., 2007. Les déplacements domicile-travail amplifiés par la périurbanisation. , (1129).
- Bacon, R.W., 1995. Combined trips and the frequency of shopping. *Journal of Retailing and Consumer Services*, 2(3), pp.175–183.
- Bahor, B. et al., 2010. Life-Cycle Assessment of Waste Management Greenhouse Gas Emissions Using Municipal Waste Combustor Data. *Journal of Environmental Engineering*, 136(8), p.749.
- Banister, D., Button, K.J. & Button, K., 1993. *Transport, the environment and sustainable development*, E & FN Spon.
- Bare, J., 2011. TRACI 2.0: the tool for the reduction and assessment of chemical and other environmental impacts 2.0. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 13(5), pp.687–696.
- Barret, C. et al., 2011. Le nouveau zonage en aires urbaines : Avignon s'étend fortement. *INSEE*. Available at: http://www.insee.fr/fr/themes/document.asp?reg_id=19&ref_id=17918.
- Bartolozzi, I., Rizzi, F. & Frey, M., Comparison between hydrogen and electric vehicles by life cycle assessment: A case study in Tuscany, Italy. *Applied Energy*, (0). Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261912002255> [Accessed October 31, 2012].
- Baudrillard, J., 1996. *La société de consommation* Gallimard., Gallimard.

- Bayart, J.-B. et al., 2010. Framework for assessment of off-stream freshwater use within LCA. *International Journal of Life Cycle Assessment*, (15), p.439.
- Beckx, C. et al., 2013. Assessing the environmental impact associated with different trip purposes. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 18, pp.110–116.
- Bee, A.G., 1993. The Golden Century of Oil 1950–2050—The depletion of a resource: C. J. Campbell Kluwer Academic; 1991; ISBN 07923 1442 5; Price Dfl 190; £64. *Marine and Petroleum Geology*, 10(2), pp.182–183.
- Beevers, S.D. et al., 2012. Trends in NO_x and NO₂ emissions from road traffic in Great Britain. *Atmospheric Environment*, 54, pp.107–116.
- Bélanger, F., 1999. Workers' propensity to telecommute: An empirical study. *Information & Management*, 35(3), pp.139–153.
- Bellon-Maurel, V. et al., 2013. What scientific issues in Life Cycle Assessment applied to waste and biomass valorization ? Editorial. *Waste and Biomass Valorization*, 4(2), pp.377–383.
- Beloin-Saint-Pierre, D. & Blanc, I., 2011. New spatiotemporally resolved LCI applied to photovoltaic electricity. In *LCM 2011 - Life Cycle Management, Berlin□: Germany (2011)*. Life Cycle Management 2011. Berlin, Germany, p. 12.
- Beniston, M. & Stoffel, M., 2012. Obstacles to data access for research related to climate and water: Implications for science and EU policy-making. *Environmental Science and Policy*, 17, pp.41–48.
- Benítez-López, A., Alkemade, R. & Verweij, P.A., 2010. The impacts of roads and other infrastructure on mammal and bird populations: A meta-analysis. *Biological Conservation*, 143(6), pp.1307–1316.
- Bernstein, L., Pachauri, R. & Reisinger, A., 2008. *Climate Change 2007: Synthesis Report*, Geneva, Switzerland: International Panel on Climate Change - IPCC.
- Bertalanffy, L.V., 1968. *General System Theory: Foundations, Development, Applications* Revised edition., George Braziller Inc.
- Berthet, T., Inddigo & Cédís, 2012. *Transport et écologie - Comprendre la démarche pour agir aujourd'hui dans sa collectivité et sur son territoire*, Le passager clandestin.
- Bhat, C.R., 1998. Analysis of travel mode and departure time choice for urban shopping trips. *Transportation Research Part B: Methodological*, 32(6), pp.361–371.
- Bhat, C.R. & Koppelman, F.S., 1993. An endogenous switching simultaneous equation system of employment, income, and car ownership. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 27(6), pp.447–459.
- BIO Intelligence Service & ADEME, 2010. *Analyses de Cycle de Vie appliquées aux biocarburants de première génération consommés en France - synthèse*, France: ADEME.
- Bischoff, J. & Calzada, C., 2011. *Enjeu de la mobilité durable en Meurthe-et-Moselle*, INSEE.
- Blouet, A. & Rivoire, E., 1995. *L'écobilan: les produits et leurs impacts sur l'environnement*, Paris: Dunod.

- Böcker, L., Prillwitz, J. & Dijst, M., 2013. Climate change impacts on mode choices and travelled distances: a comparison of present with 2050 weather conditions for the Randstad Holland. *Journal of Transport Geography*, 28, pp.176–185.
- Boezen, H.M. et al., 1999. Effects of ambient air pollution on upper and lower respiratory symptoms and peak expiratory flow in children. *Lancet*, 353(9156), pp.874–878.
- Boiteux, M., Baumstark, L. & Commissariat Général au Plan, 2001. *Transports : choix des investissements et coût des nuisances*, La Documentation française.
- Boize, M. et al., 2008. Pertinence de l'analyse de cycle de vie (ACV) pour l'évaluation des impacts sanitaires : comparaison avec l'évaluation quantitative des risques sanitaires (EQRS). *Environnement, Risques & Santé*, 7(4), pp.265–277.
- Borge, R. et al., 2012. Comparison of road traffic emission models in Madrid (Spain). *Atmospheric Environment*, 62, pp.461–471.
- De Borger, B. & Wuyts, B., 2011. The structure of the labor market, telecommuting, and optimal peak period congestion tolls: A numerical optimization model. *Regional Science and Urban Economics*, 41(5), pp.426–438.
- Boulay, A.-M. et al., 2011. Regional Characterization of Freshwater Use in LCA: Modeling Direct Impacts on Human Health. *Environmental Science & Technology*, (45), pp.8948–8957.
- Bourg, D. & Buclet, N., 2005. L'économie de fonctionnalité. Changer la consommation dans le sens du développement durable. *Futuribles*, (313), pp.27–38.
- Bouzouina, L., Nicolas, J. -P. & Vanco, F., 2011. Évolution des émissions de CO2 liées aux mobilités quotidiennes: une stabilité en trompe l'œil. *Recherche Transports Sécurité*, 27(2), pp.128–139.
- Bouzouina, Louafi & Nicolas, Jean-Pierre, 2007. Empreinte écologique liée à la mobilité locale - application aux quartiers Mas du Taureau-pré de l'Herpe.
- Brandt, A.R., Plevin, R.J. & Farrell, A.E., 2010. Dynamics of the oil transition: Modeling capacity, depletion, and emissions. *Energy*, 35(7), pp.2852–2860.
- Breheny, M., 1997. Urban compaction: feasible and acceptable? *Cities*, 14(4), pp.209–217.
- Brueckner, J.K., 2000. Urban Sprawl: Diagnosis and Remedies. *International Regional Science Review*, 23(2), pp.160–171.
- Bruegmann, R., 2001. Urban Sprawl. In Editors-in-Chief: Neil J. Smelser & Paul B. Baltes, eds. *International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences*. Oxford: Pergamon, pp. 16087–16092. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B0080430767044168> [Accessed April 10, 2013].
- Brulliard, C., Boyle, P. & McCorkell, G., 2008. *Teleworking Life Cycle Analysis*, Australia: Telstra.
- BVA & La Cub, 2009. *Enquête Ménages Déplacements réalisée dans l'agglomération Bordelaise en 2008-2009*, Bordeaux: Communauté urbaine de Bordeaux.
- Cameron, I., Kenworthy, J.R. & Lyons, T.J., 2003. Understanding and predicting private motorised urban mobility. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 8(4), pp.267–283.

- Capony, A. et al., 2013. Monitoring and environmental modeling of earthwork impacts: A road construction case study. *Resources, Conservation and Recycling*, 74, pp.124–133.
- Capot, R. & Rodriguez, P., 2011. Le nouveau zonage en aires urbaines : extension modérée de la périurbanisation en Nord-Pas-de-Calais. *INSEE*. Available at: http://www.insee.fr/fr/themes/document.asp?reg_id=19&ref_id=17918.
- Carre, J.R., 1998. Mobilité urbaine et déplacements non motorisés : situation actuelle, évolutions, pratiques et choix modal. *TEC (TRANSPORT, ENVIRONNEMENT, CIRCULATION)*, (148), pp.19–25.
- CCFA, C. des constructeurs français automobiles, 2012. *Analyse et statistiques*, Available at: <http://www.ccfa.fr/Edition-2012> [Accessed March 4, 2013].
- Certu, 2011. *Evaluation environnementale des plans de déplacements urbains - analyse des premières pratiques et préconisations*, Lyon.
- Certu, 2009. Guide méthodologique : l'Enquête Ménages Déplacements "Standard Certu."
- CERTU, 2009. *Le stationnement public en France en 2005 : Les données de l'enquête Certu dans 166 villes*, CD-ROM, CERTU.
- CERTU, 2011. *Panorama des transports collectifs urbains dans les agglomérations de plus de 250 000 habitants - Situation 2008 et évolutions - Hors Île de France*, CERTU.
- Certu & CETE Nord-Picardie, 2008. Distances de déplacements et effet de serre - Où sont les enjeux en milieu urbain ?
- CGDD, 2010. Définitions et concepts de la mobilité régulière et locale. Available at: http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/fileadmin/documents/Themes/Transports/Transport_de_voyageurs/Deplacements/Mobilite_reguliere_et_locale/Definitions%20et%20concepts.pdf.
- Chan, C.-C., Lin, S.-H. & Her, G.-R., 1994. Office workers's exposure to volatile organic compounds while commuting and working in Taipei City. *Atmospheric Environment*, 28(14), pp.2351–2359.
- Chen, C. et al., 2010. LCA allocation procedure used as an incitative method for waste recycling: An application to mineral additions in concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, 54(12), pp.1231–1240.
- Chester, M. & Horvath, A., 2008. Environmental Life-cycle Assessment of Passenger Transportation: A Detailed Methodology for Energy, Greenhouse Gas and Criteria Pollutant Inventories of Automobiles, Buses, Light Rail, Heavy Rail and Air v.2. Available at: <http://www.escholarship.org/uc/item/5670921q> [Accessed June 13, 2013].
- Chester, M.V. & Horvath, A., 2009. Environmental assessment of passenger transportation should include infrastructure and supply chains. *Environmental Research Letters*, 4(2), p.8.
- Loi Chevènement, 1999. *LOI no 99-586 du 12 juillet 1999 relative au renforcement et à la simplification de la coopération intercommunale*,
- Chiron-Augereau, V., 2009. *Du transport de marchandises en ville à la logistique urbaine, quels rôles pour un opérateur de transports publics urbains ? L'exemple de la RATP*. Paris-Est.

- CIMBéton, 2005. *Analyse du cycle de vie de structures routières*,
- CIRAIG, 2009. *Analyse de cycle de vie comparative des chaussées en béton de ciment et en béton bitumineux à des fins d'intégration de paramètres énergétiques et environnementaux au choix des types de chaussées*, Montreal (Canada).
- Citepa, 2011. Emissions dans l'air en France.
- Claramunt, C. & Thériault, M., 2001. A UML-based modelling approach for analysing travel behaviour.
- Clauzade, C. et al., 2010. Life cycle assessment of nine recovery methods for end-of-life tyres. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 15(9), pp.883–892.
- Code de l'environnement, 1976. *Loi n°76-629 du 10 juillet 1976 RELATIVE A LA PROTECTION DE LA NATURE*,
- Colombert, M. et al., 2011. Analyse de cycle de vie à l'échelle du quartier□: un outil d'aide à la décision? Le cas de la ZAC Claude Bernard à Paris (France). *Environnement urbain*, 5, p.c1.
- Consoli, F., 1993. *Guidelines for Life-cycle Assessment: A Code of Practice*, Society of Environmental Toxicology and Chemistry, (SETAC).
- Cornut, P. & Louchard, O., 2007. *Changement climatique et transports. Manuel de recommandations à l'attention des acteurs territoriaux - Réseau Action Climat France*, Réseau Action Climat. Available at: <http://www.decitre.fr/livres/changement-climatique-et-transports-5552002531013.html> [Accessed August 23, 2013].
- Costanza, 2000. The dynamics of the ecological footprint concept. *Ecological Economics*, 32, pp.341–345.
- Currie, G. & Delbosc, A., 2011. Exploring the trip chaining behaviour of public transport users in Melbourne. *Transport Policy*, 18(1), pp.204–210.
- Curtis, L. et al., 2006. Adverse health effects of outdoor air pollutants. *Environment international*, 32(6), pp.815–830.
- D'Agosto, M. de A. & Ribeiro, S.K., 2009. Assessing total and renewable energy in Brazilian automotive fuels. A life cycle inventory (LCI) approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(6–7), pp.1326–1337.
- Dagsvik, J.K. et al., 2002. Potential demand for alternative fuel vehicles. *Transportation Research Part B: Methodological*, 36(4), pp.361–384.
- Daly, H.E., 1990. Toward some operational principles of sustainable development. *Ecological Economics*, 2(1), pp.1–6.
- Danard, J., 2013. Mission TMV / Projets et Perspectives.
- Dargay, J., 2008. Personal Transport Choice. *OECD Journal: General Papers*, 2008(2), pp.59–93.
- Dargay, J. & Gately, D., 1999. Income's effect on car and vehicle ownership, worldwide: 1960–2015. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 33(2), pp.101–138.
- DATAR, 2012. *Des systèmes spatiaux en perspective* La documentation française.,

- Defra, 2007. A review of recent developments in, and the practical use of, ecological footprinting methodologies.
- Delfino, R.J., 2002. Epidemiologic evidence for asthma and exposure to air toxics: linkages between occupational, indoor, and community air pollution research. *Environmental Health Perspectives*, 110(Suppl 4), pp.573–589.
- Deschamps, J. & Tailliez, P., 2013. Envoyé spécial - Y a-t-il du poison dans l'air? *Y a-t-il du poison dans l'air?*
- Dimitriou, H.T., 1991. Cities and automobile dependence: An international sourcebook: Peter Newman and Jeffry Kenworthy Gower, Aldershot, UK, 388pp. *Utilities Policy*, 1(4), pp.352–354.
- Dissanayake, D. & Morikawa, T., 2008. Impact assessment of satellite centre-based telecommuting on travel and air quality in developing countries by exploring the link between travel behaviour and urban form. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 42(6), pp.883–894.
- Dockery, D.W. & Pope, C.A., 3rd, 1994. Acute respiratory effects of particulate air pollution. *Annual review of public health*, 15, pp.107–132.
- Doyle, T. & Prout, S., 2012. Indigenous student mobility, performance and achievement: Issues of positioning and traceability. *International Journal of Educational Research*, 54, pp.41–49.
- DREAL Pays de la Loire, 2012. *Emissions de CO2 en Pays de la Loire - Des pistes pour réduire l'usage de la voiture au quotidien*,
- Dresen, B. & Jandewerth, M., 2012. Integration of spatial analyses into LCA—calculating GHG emissions with geoinformation systems. *The International Journal of Life Cycle Assessment*. Available at: <http://www.springerlink.com/content/y2h4p2617221865j/> [Accessed February 17, 2012].
- Dreyer, L.C., Niemann, A.L. & Hauschild, Michael Z., 2003. Comparison of Three Different LCIA Methods: EDIP97, CML2001 and Eco-indicator 99. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 8(4), pp.191–200.
- Del Duce, A. et al., 2012. New passenger transport data.
- Dumas, M., 2012. L'économie de la fonctionnalité: une voie nouvelle vers un développement durable? *Relations industrielles*, 67(2), p.333.
- Dupont-Kieffer, A. et al., 2010. Environment Energy Assessment of Trips (EEAT): An updated approach to assess the environmental impacts of urban mobility, The case of Lille Region. In *Proceedings of the 12th WCTR conference*. 12th World Conference on Transport Research. Available at: <http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00615150> [Accessed June 12, 2013].
- Duprat, P., 2010. En Midi-Pyrénées, la voiture est reine.
- Dupré, A. & Rigollet, L., 2011. Déplacements domicile-travail et domicile-études en Rhône-Alpes.
- Dupuy, G., 1999. *La dépendance automobile*, Economica.
- EEA, 2007. *CLC2006 technical guidelines*, Copenhagen (Denmark): European Environment Agency.
- Epures, 2010. *Comment se déplacent les habitants de la communauté d'Agglomération de Saint-Etienne Métropole?*,

- Faist Emmenegger, M. et al., 2011. Taking into account water use impacts in the LCA of biofuels: an Argentinean case study. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 16(9), pp.869–877.
- 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.
- Favez, J.-Y., Weilenmann, M. & Stilli, J., 2009. Cold start extra emissions as a function of engine stop time: Evolution over the last 10 years. *Atmospheric Environment*, 43(5), pp.996–1007.
- Le Féon, S. et al., 2012. Global warming impact assessment of urban mobility using motivation trip perspective - a case study of Saint-Etienne, France. *International Journal of Environmental Science and Engineering Research*, Vol 3(3), pp.86–101.
- Ferhenbach, J. et al., 2009. *Le développement du télétravail dans la société numérique de demain*, France: La Documentation française.
- Fernández-Sánchez, G. & Rodríguez-López, F., 2010. A methodology to identify sustainability indicators in construction project management—Application to infrastructure projects in Spain. *Ecological Indicators*, 10(6), pp.1193–1201.
- Finkbeiner, M. & Hoffmann, R., 2006. Application of Life Cycle Assessment for the Environmental Certificate of the Mercedes-Benz S-Class (7 pp). *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 11(4), pp.240–246.
- Flachsbart, P., 1999. Human exposure to carbon monoxide from mobile sources. *Chemosphere - Global Change Science*, 1(1–3), pp.301–329.
- Flamm, M., 2004. *Comprendre le Choix Modal - Les déterminants des pratiques modales et des représentations individuelles de transport*. Lausanne: Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- Flandrin, Y., 2002. *Mesure des émissions automobiles de composés organiques volatils et de dérivés carbonylés: application à la modélisation eulérienne de la pollution atmosphérique*. Thèse de doctorat. France: Université Lille 1 - Sciences et technologies.
- Fleischer, G. & Schmidt, W.-P., 1996. Functional unit for systems using natural raw materials. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 1(1), pp.23–27.
- Flouri, E., Mavroveli, S. & Midouhas, E., 2013. Residential mobility, neighbourhood deprivation and children's behaviour in the UK. *Health & Place*, 20, pp.25–31.
- Flynn, B.S. et al., 2012. Weather factor impacts on commuting to work by bicycle. *Preventive Medicine*, 54(2), pp.122–124.
- Forum international des transports. et al., 2008. *Des chaussées à longue durée de vie pour routes à forte circulation*, Paris: OCDE/FIT.
- Frischknecht, R., 2008. *The Ecoinvent Database: a success story*, 2nd International ecoinvent Meeting - Lausanne.
- Frischknecht, R. & Rebitzer, G., 2005. The ecoinvent database system: a comprehensive web-based LCA database. *Journal of Cleaner Production*, 13(13–14), pp.1337–1343.
- Funazaki, A. et al., 2003. Automobile life cycle assessment issues at end-of-life and recycling. *JSAE Review*, 24(4), pp.381–386.

- Gabathuler, H., 2006. The CML Story: How Environmental Sciences Entered the Debate on LCA. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 11(S1), pp.127–132.
- Galbraith, J.K., 1998. *The affluent society*, Houghton Mifflin Harcourt.
- Gallez, C., 1995. *Budgets Energie Environnement Déplacements (BEED) en Ile-de-France*, Arcueil - INRETS.
- Gallez, C., 2002. Indicateurs de comparaison de scenarios prospectifs peut-on elargir le debat sur l'avenir de la mobilite urbaine? *Recherche - Transports - Sécurité*, 77, pp.281–295.
- García Sánchez, J.A. et al., 2012. Comparison of Life Cycle energy consumption and GHG emissions of natural gas, biodiesel and diesel buses of the Madrid transportation system. *Energy*, 47(1), pp.174–198.
- Gascon, M.-O. et al., 2005. *Calcul a posteriori des distances dans les enquêtes ménages déplacements*, Lyon: CERTU.
- Geng, X. et al., 2011. A systematic decision-making approach for the optimal product–service system planning. *Expert Systems with Applications*, 38(9), pp.11849–11858.
- Geyer, R. et al., 2010. Coupling GIS and LCA for biodiversity assessments of land use. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 15(5), pp.454–467.
- Giannouli, M. et al., 2007. Waste from road transport: development of a model to predict waste from end-of-life and operation phases of road vehicles in Europe. *Journal of Cleaner Production*, 15(11–12), pp.1169–1182.
- Gkatzoflias, D et al., 2012. *COPERT 4 Computer programme to calculate emissions froms road transport - Users Manual*, European Topic Center on Air and Climate Change - ETC-ACC.
- Goedkoop, M. & Spriensma, R., 2001. *The Eco-indicator 99 - A damage oriented method for Life Cycle Assessment*, Netherlands: PRé Consultants B. V.
- Gondran, N. & Boutaud, A., 2009. Empreinte écologique et transports : un nouvel outil face à de nouveaux défis. *Liaison Energie-Francophonie*, (81), pp.27–30.
- Grenelle, 2010. *Loi n° 2010-788 du 12 juillet 2010 portant engagement national pour l'environnement*, Available at: <http://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000022470434>.
- Grosjean, C. et al., 2012. Assessment of world lithium resources and consequences of their geographic distribution on the expected development of the electric vehicle industry. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(3), pp.1735–1744.
- Gruber, P.W. et al., 2011. Global Lithium Availability. *Journal of Industrial Ecology*, 15(5), pp.760–775.
- Guseo, R., Dalla Valle, A. & Guidolin, M., 2007. World Oil Depletion Models: Price effects compared with strategic or technological interventions. *Technological Forecasting and Social Change*, 74(4), pp.452–469.
- Habibi, S. & Asadi, N., 2011. Causes, Results and Methods of Controlling Urban Sprawl. *Procedia Engineering*, 21, pp.133–141.
- Haes, H.A.U. de et al., 2002. *Life-Cycle Impact Assesement: Striving Towards Best Practice*, Society of Environmental Toxicology and Chemistry.

- Hani, M., 2009. Chaînage des déplacements et pratiques d'achats des familles. Le cas de l'agglomération du Havre. *Géocarrefour*, VOL 84-1-2/2009(VOL 84-1-2/2009), pp.113–121.
- Hauschild, M., 2006. Spatial Differentiation in Life Cycle Impact Assessment: A decade of method development to increase the environmental realism of LCIA. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 11(1), pp.11–13.
- Hawkins, T.R. et al., 2012. Comparative Environmental Life Cycle Assessment of Conventional and Electric Vehicles. *Journal of Industrial Ecology*, p.no–no.
- He, K. et al., 2005. Oil consumption and CO2 emissions in China's road transport: current status, future trends, and policy implications. *Energy Policy*, 33(12), pp.1499–1507.
- Heijungs, R., 2010. Uncertainty analysis in LCA - Concepts, tools, and practice.
- Heinen, E., Maat, K. & Wee, B. van, 2011. The role of attitudes toward characteristics of bicycle commuting on the choice to cycle to work over various distances. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 16(2), pp.102–109.
- Heinonen, J. & Junnila, S., 2011. Case study on the carbon consumption of two metropolitan cities. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 16(6), pp.569–579.
- Helmes, R.J.K. et al., 2012. Spatially explicit fate factors of phosphorous emissions to freshwater at the global scale. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 17(5), pp.646–654.
- Hensher, D.A., 2008. Empirical approaches to combining revealed and stated preference data: Some recent developments with reference to urban mode choice. *Research in Transportation Economics*, 23(1), pp.23–29.
- Hernández, J., García, L. & Ayuga, F., 2004. Assessment of the visual impact made on the landscape by new buildings: a methodology for site selection. *Landscape and Urban Planning*, 68(1), pp.15–28.
- Hickman, A., J., 1999. *Methodology for Calculating Transport Emissions and Energy Consumption*, Transport Research Laboratory.
- Hickman, J. et al., 1999. METHODOLOGY FOR CALCULATING TRANSPORT EMISSIONS AND ENERGY CONSUMPTION. Available at: <http://trid.trb.org/view.aspx?id=707881> [Accessed November 8, 2012].
- Hill, A., Lynch, A. & Dalley-Trim, L., 2012. Positive educational responses to Indigenous student mobility. *International Journal of Educational Research*, 54, pp.50–59.
- Hodgson, P. et al., 2012. Can bus really be the new tram? *Research in Transportation Economics*. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0739885912000819> [Accessed October 2, 2012].
- Hofstetter, P. & Müller-Wenk, R., 2005. Monetization of health damages from road noise with implications for monetizing health impacts in life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, 13(13–14), pp.1235–1245.
- Hourdez, P., 2005. Une histoire de la conjecture de Zahavi□: constance des budgets-temps de transport.

- Humbert, S., 2009. Making regionalization a reality in life cycle assessment of human health impacts caused by pollutants. In LCA Forum DF39. Zurich (Switzerland).
- Husson, F., Lê, S. & Pagès, J., 2009. *Analyse de données avec R*, Presses universitaires de Rennes.
- Insee, 2013a. Définition Insee□: Aire urbaine. Available at: <http://www.insee.fr/fr/methodes/default.asp?page=definitions/aire-urbaine.htm> [Accessed February 26, 2013].
- Insee, 2013b. Définition Insee□: Unité urbaine. Available at: <http://www.insee.fr/fr/methodes/default.asp?page=definitions/unite-urbaine.htm> [Accessed February 26, 2013].
- Insee, 2011. La distance et le motif de déplacement sont les principaux déterminants de l'utilisation de la voiture. Available at: http://www.insee.fr/fr/themes/document.asp?reg_id=12&ref_id=18271&page=decimal/dec2012314/dec2012314_p12.htm [Accessed February 21, 2012].
- INSEE, 2007. Insee - Territoire - Un habitant de pôle urbain émet deux fois moins de CO2 que la moyenne pour se rendre à son lieu de travail ou d'études. Available at: http://www.insee.fr/fr/themes/document.asp?ref_id=ip1357 [Accessed August 30, 2012].
- INSEE, 2011. Niveau de diplôme selon l'âge en 2011. Available at: http://www.insee.fr/fr/themes/tableau.asp?reg_id=0&ref_id=nattef07232 [Accessed October 1, 2013].
- INSEE, 2009. *Recensement de la population 2009*, France.
- Institut de la statistique du Québec, 2009. L'empreinte écologique : revue de littérature et analyse critique. Available at: http://www.stat.gouv.qc.ca/publications/develop_durable/empreinte_eco.htm [Accessed February 9, 2012].
- ISO, 1997. ISO 14040 - Management environnemental - Analyse du cycle de vie - Principes et cadre.
- ISO, 1998. ISO 14041 - Management environnemental - Analyse du cycle de vie - Analyse de l'inventaire.
- ISO, 2000a. ISO 14042 - Management environnemental - Analyse du cycle de vie - Evaluation de l'impact du cycle de vie.
- ISO, 2000b. ISO 14043 - Management environnemental - Analyse du cycle de vie - Interprétation du cycle de vie.
- ISO 14040, 2006. ISO 14040 - Management environnemental - Analyse du cycle de vie - Principes et cadre.
- ISO 14044, 2006. ISO 14044 - Management environnemental - Analyse du cycle de vie - Exigences et lignes directrices.
- Iucu, R., Pânișoară, I.-O. & Pânișoară, G., 2011. The Professional Mobility of Teachers - new tendencies in the global society. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 11, pp.251–255.

- Le Jeannic, T., 1997. Trente ans de périurbanisation : extension et dilution des villes. *Economie et statistique*, 307(1), pp.21–41.
- Le Jeannic, T. & Razafindranovona, T., 2009. *Près d'une heure quotidienne de transport : les disparités se réduisent mais demeurent*, Insee / SOeS.
- Jeger, F., 2001. *Une estimation du parc automobile à l'aide des durées de vie des véhicules*, Paris.
- Joliet, O et al., 1994. Life-cycle analysis of biodegradable packing materials compared with polystyrene chips the case of popcorn. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 49, pp.253–266.
- Joliet, Olivier et al., 2003. IMPACT 2002+: A new life cycle impact assessment methodology. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 8(6), pp.324–330.
- Joliet, Olivier, Saadé, M. & Crettaz, P., 2005. *Analyse du cycle de vie: Comprendre et réaliser un écobilan*, PPUR presses polytechniques.
- Joly, I., Masson, S. & Petiot, R., 2006. Les déterminants de la demande en transports collectifs urbains : comparaison internationale et analyse économétrique. *Cahiers scientifiques du transport (Les)*, (50). Available at: <http://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00372167> [Accessed March 29, 2013].
- Joumard, Robert & Nicolas, Jean-Pierre, 2010. Transport project assessment methodology within the framework of sustainable development. *Ecological Indicators*, 10(2), pp.136–142.
- Jullien, Agnès & François, D., 2006. Soil indicators used in road environmental impact assessments. *Resources, Conservation and Recycling*, 48(2), pp.101–124.
- Kahn, M.E., 2000. The environmental impact of suburbanization. *Journal of Policy Analysis and Management*, 19(4), pp.569–586.
- Kakudate, K. et al., 2002. Calculation model of CO2 emissions for Japanese passenger cars. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 7(2), pp.85–93.
- Kaufmann, V., 2008. *Les paradoxes de la mobilité : Bouger, s'enraciner* 2008th ed., PPUR.
- Kaufmann, V., Ministère de l'Écologie, du D. durable et de l'Énergie & Nord-Picardie, C. d'Etudes T. de l'Équipement, 1999. *Mobilité et vie quotidienne : synthèse et questions de recherche*, Available at: <http://portail.documentation.developpement-durable.gouv.fr/dri/document.xsp?id=Drast-OUV00001255&n=1&q=sdxdocid%3A%7CDrast-OUV00001255%7C&> [Accessed March 5, 2013].
- Kaur, S., Nieuwenhuijsen, M. & Colville, R., 2005. Personal exposure of street canyon intersection users to PM2.5, ultrafine particle counts and carbon monoxide in Central London, UK. *Atmospheric Environment*, 39(20), pp.3629–3641.
- Keller, F., 2008. *Comment limiter les émissions de CO2 des voitures ?*, Sénat. Available at: <http://www.senat.fr/rap/r07-361/r07-361.html>.
- Kitamura, R. et al., 2000. Micro-simulation of daily activity-travel patterns for travel demand forecasting. *Transportation*, 27(1), pp.25–51.

- Klemm, R.J. et al., 2000. Is daily mortality associated specifically with fine particles? Data reconstruction and replication of analyses. *Journal of the Air & Waste Management Association* (1995), 50(7), pp.1215–1222.
- Kley, D. et al., 1999. Photochemical oxidants: state of the science. *Environmental pollution* (Barking, Essex: 1987), 100(1-3), pp.19–42.
- Koponen, K. et al., 2012. GHG emission performance of various liquid transportation biofuels in Finland in accordance with the EU sustainability criteria. *Applied Energy*, (0), p.9.
- Korsu, E., 2012. *La ville cohérente penser autrement la proximité* La Documentation Française (29 août 2012)., Paris: La Documentation française.
- Kreutzberger, E.D., 2008. Distance and time in intermodal goods transport networks in Europe: A generic approach. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 42(7), pp.973–993.
- Krippendorff, K., 2004. *Content analysis: an introduction to its methodology*, Thousand Oaks, Calif.: Sage.
- Kushnir, D. & Sandén, B.A., 2012. The time dimension and lithium resource constraints for electric vehicles. *Resources Policy*, 37(1), pp.93–103.
- Lacour, S., 2011. Cours de pollution atmosphérique. Available at: http://cerea.enpc.fr/fich/doc_ENPC_transport.pdf [Accessed June 15, 2011].
- Lainé, F., 2010. La mobilité professionnelle□: facteurs structurels et spécificités de l'Île-de-France. *Economie et statistiques*, (431 - 432).
- Larousse, 2013a. mobilité. *Larousse.fr - Dictionnaires*. Available at: <http://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/mobilit%C3%A9/51890> [Accessed February 26, 2013].
- Larousse, 2013b. urbain, urbaine. *Larousse.fr - Dictionnaires*. Available at: http://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/urbain_urbaine/80662 [Accessed February 26, 2013].
- Larousse, 2013c. urbanisme nom masculin (de urbain) - Encyclopédie Larousse. *Larousse.fr - Encyclopédie*. Available at: <http://www.larousse.fr/encyclopedie/nom-commun-nom/urbanisme/100337> [Accessed April 3, 2013].
- LAURE, 1996. *Loi n° 96-1236 du 30/12/96 sur l'air et l'utilisation rationnelle de l'énergie*,
- Laurent, A., Olsen, S.I. & Hauschild, Michael Zwicky, 2011. Normalization in EDIP97 and EDIP2003: updated European inventory for 2004 and guidance towards a consistent use in practice. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 16(5), pp.401–409.
- Lavielle, J.-P. et al., 2008. *Evolution des rythmes sociaux et étalement de l'heure de pointe*, Certu / ENTPE.
- Lecouls, H. & Klöpffer, W., 2010. Note on the critical review of the study “Life Cycle Assessment for the different used tyres recycling methods” prepared for Aliapur by Ecobilan. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 15(9), pp.893–895.
- Leduc, G. et al., 2010. How can our cars become less polluting? An assessment of the environmental improvement potential of cars. *Transport Policy*, 17(6), pp.409–419.

- Lefebvre, H., Ecochard, M. & Balladur, J., 1967. *L'Urbanisme aujourd'hui* : Mythes et réalités, débat entre Henri Lefebvre, Jean Balladur et Michel Ecochard, Centre d'études socialistes.
- Lenzen, M. & Murray, S.A., 2001. A modified ecological footprint method and its application to Australia. *Ecological Economics*, 37(2), pp.229–255.
- Li, Z. & Ouyang, M., 2011. A win-win marginal rent analysis for operator and consumer under battery leasing mode in China electric vehicle market. *Energy Policy*, 39(6), pp.3222–3237.
- Loiseau, E. et al., 2012. Évaluation environnementale de territoires: apports, limites et adaptation du cadre méthodologique de l'Analyse du Cycle de Vie. In Conférence Interdisciplinaire sur l'Ecologie Industrielle et Territoriale. Troyes, France, p. 8.
- Loti, 1982, 1982. *Loi n° 82-1153 du 30 décembre 1982 d'orientation des transports intérieurs*, Available at: <http://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=LEGITEXT000006068730>.
- Lucas, A., Neto, R.C. & Silva, C.A., 2012. Impact of energy supply infrastructure in life cycle analysis of hydrogen and electric systems applied to the Portuguese transportation sector. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(15), pp.10973–10985.
- Ma, H. et al., 2012. A new comparison between the life cycle greenhouse gas emissions of battery electric vehicles and internal combustion vehicles. *Energy Policy*, 44, pp.160–173.
- Mackett, R., 2003. Why do people use their cars for short trips? *Transportation*, 30(3), pp.329–349.
- Mak, K.L. & Hung, W.T., 2008. Developing air pollutant profiles using routine monitoring data in road tunnels: A note. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 13(6), pp.404–411.
- Manneh, R. et al., 2009. Spatial variability and optimal regional scale for intake fractions linked to a Canadian emission. In Montréal (Canada).
- Marchand, M., 2013. *Considération de la différenciation spatiale dans l'évaluation des impacts environnementaux locaux au moyen de l'Analyse du Cycle de Vie (ACV) - Application à la gestion des déchets ménagers*. Sciences de la matière. Rennes: Université de Rennes 1.
- Maslow, A.H., 1987. *Motivation and Personality* 3rd Revised edition., Longman Asia Ltd ,Hong Kong.
- Matheys, J. et al., 2007. Influence of functional unit on the life cycle assessment of traction batteries. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 12(3), pp.191–196.
- Maurel, F. et al., 2009. *Localisation des ménages et usage de l'automobile: résultats comparés de plusieurs enquêtes et l'apport de l'enquête nationale transports et déplacements*, Commissariat général au développement durable, Service de l'économie, de l'évaluation et de l'intégration du développement durable.
- Mavroidis, I. & Chaloulakou, A., 2011. Long-term trends of primary and secondary NO₂ production in the Athens area. Variation of the NO₂/NO_x ratio. *Atmospheric Environment*, 45(38), pp.6872–6879.
- De Mazenot, X., 2013. *Livre blanc sur le télétravail et les nouveaux espaces de travail*, France: zevillage.net.
- MEDDE & CGDD, 2011. Les émissions de gaz à effet de serre par secteur en France. Available at: <http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/lessentiel/ar/199/1080/emissions-gaz-effet-serre-secteur-france.html> [Accessed March 10, 2012].

- MEEDDM, 2009. *Lancement du plan national pour le développement des véhicules électriques et hybrides - Dossier de Presse*, France: Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement Durable et de la Mer.
- Mélèse, J., 1982. *L'Analyse modulaire des systèmes de gestion*: Une méthode efficace pour appliquer la théorie des systèmes au management 3e éd., Éditions Hommes et techniques.
- Miedema, J.H. & Moll, H.C., 2013. Lithium availability in the EU27 for battery-driven vehicles: The impact of recycling and substitution on the confrontation between supply and demand until 2050. *Resources Policy*, 38(2), pp.204–211.
- Millward, H., Spinney, J. & Scott, D., 2013. Active-transport walking behavior: destinations, durations, distances. *Journal of Transport Geography*, 28, pp.101–110.
- Mitomo, H. & Jitsuzumi, T., 1999. Impact of telecommuting on mass transit congestion: the Tokyo case. *Telecommunications Policy*, 23(10-11), pp.741–751.
- Moigne, J.-L.L., 1999. *La modélisation des systèmes complexes*, Dunod.
- Mokhtarian, P.L. & Varma, K.V., 1998. The trade-off between trips and distance traveled in analyzing the emissions impacts of center-based telecommuting. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 3(6), pp.419–428.
- Monzón, A. & Rodríguez-Dapena, A., 2006. Choice of mode of transport for long-distance trips: Solving the problem of sparse data. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 40(7), pp.587–601.
- Mukherjee, P. & Viswanathan, S., 2001. Carbon monoxide modeling from transportation sources. *Chemosphere*, 45(6–7), pp.1071–1083.
- Muñiz, I. & Galindo, A., 2005. Urban form and the ecological footprint of commuting. The case of Barcelona. *Ecological Economics*, 55(4), pp.499–514.
- Murray, H.A., 1938. *Explorations In Personality*, Oxford University Press. Available at: <http://archive.org/details/explorationsinpe031973mbp> [Accessed April 17, 2013].
- Mutel, C. & Hellweg, S., 2009. Regionalized Life Cycle Assessment: Computational Methodology and Application to Inventory Databases. *Environmental Science & Technology*, 43, pp.5797–5803.
- Nankervis, M., 1999. The effect of weather and climate on bicycle commuting. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 33(6), pp.417–431.
- Nansai, K. et al., 2001. Life-cycle analysis of charging infrastructure for electric vehicles. *Applied Energy*, 70(3), pp.251–265.
- Nathan, F., 2008. Measuring sustainability: Why the ecological footprint is bad economics and bad environmental science. *Ecological Economics*, 67(4), pp.519–525.
- Le Néchet, F., 2010. Quantifier l'éloignement au modèle de Bussière: monocentrisme contre "Acentrisme". In T. C. Foltête J.-C., ed. *Actes des Neuvièmes Rencontres de Théo Quant*, Besançon. Besançon, France, p. 19 p. Available at: <http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00616963> [Accessed January 31, 2013].

- Le Néchet, F. & Aguilera, A., 2011. Déterminants spatiaux et sociaux de la mobilité domicile-travail dans 13 aires urbaines françaises□: Une approche par la forme urbaine, à deux échelles géographiques. In ASRDIF 2011. Available at: <http://hal-enpc.archives-ouvertes.fr/hal-00696445> [Accessed May 27, 2013].
- Negawatt, 2013. *Scénario Negawatt 2011 - dossier de synthèse*, Association Negawatt.
- Nelson, P., Safirova, E. & Walls, M., 2007. Telecommuting and environmental policy: Lessons from the ecommute program. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 12(3), pp.195–207.
- Newman, P. & Kenworthy, Jeffrey R., 1999. *Sustainability and cities: overcoming automobile dependence*, Island Press.
- Nicolas, J., Pochet, P. & Poimboeuf, H., 2002. Mobilité urbaine et développement durable: quels outils de mesure pour quels enjeux? *Les Cahiers Scientifiques du Transport*, 41, pp.53–76.
- Nicolas, Jean-Pierre, 2013. *Mobilité quotidienne et développement urbain durable*. Habilitation à Diriger des Recherches (HDR). Lyon: Université Lumière Lyon 2.
- Nicolas, Jean-Pierre & Morice, N., 2006. *Scénarios prospectifs pour le projet SIMBAD*, LET.
- Nolan, A., 2002. *The Determinants of Urban Households' Transport Decisions: A Microeconomic Study using Irish Data*, Royal Economic Society. Available at: <http://econpapers.repec.org/paper/ecjac2002/150.htm> [Accessed June 17, 2013].
- Notter, D.A. et al., 2010. Contribution of Li-Ion Batteries to the Environmental Impact of Electric Vehicles. *Environmental Science & Technology*, 44(17), pp.6550–6556.
- Ntziachristos, Leonidas et al., 2009. COPERT: A European Road Transport Emission Inventory Model. In I. N. Athanasiadis et al., eds. *Information Technologies in Environmental Engineering*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, pp. 491–504. Available at: http://rd.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-540-88351-7_37#page-1 [Accessed June 10, 2013].
- Observatoire de l'environnement - Mairie de Toulouse, 2008. Empreinte écologique.
- OEET, 2011. *Evaluation énergie - environnement des infrastructures de transport*, France: oeet.
- Office de tourisme de Saint-Etienne Métropole, 2013. Carte du territoire. *Saint-Etienne Atelier Visionnaire*. Available at: saint-etiennetourisme.com/fr/a-voir-a-faire/carte-du-territoire/.
- Oppenchaim, N., 2011. *Mobilité quotidienne, socialisation et ségrégation□: une analyse à partir des manières d'habiter des adolescents de zones urbaines sensibles*. Université Paris-Est. Available at: <http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00715983> [Accessed March 4, 2013].
- Orfeuil, J.-P., 1984. Les budgets énergie transport: un concept, une pratique, des résultats. , (2), pp.23–29.
- Orfeuil, J.-P. & Massot, M.-H., 2005. Penser les mobilités de demain□: Essai de clairvoyance prospective. Available at: http://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00560518_v1/ [Accessed February 9, 2012].

- Ory, D.T. et al., 2004. When is Commuting Desirable to the Individual? *Growth and Change*, 35(3), pp.334–359.
- Pachauri, R.K. et al., 2008. *Bilan 2007 des changements climatiques rapport de synthèse*, Geneve: GIEC.
- Pacheco, A.F., Martins, M.E.S. & Zhao, H., 2013. New European Drive Cycle (NEDC) simulation of a passenger car with a HCCI engine: Emissions and fuel consumption results. *Fuel*. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236113002482> [Accessed June 19, 2013].
- Padey, P. et al., 2012. A Simplified Life Cycle Approach for Assessing Greenhouse Gas Emissions of Wind Electricity. *Journal of Industrial Ecology*, p.11.
- Paravantis, J.A. & Georgakellos, D.A., 2007. Trends in energy consumption and carbon dioxide emissions of passenger cars and buses. *Technological Forecasting and Social Change*, 74(5), pp.682–707.
- Parra, M.A. et al., 2008. Exposure to volatile organic compounds (VOC) in public buses of Pamplona, Northern Spain. *Science of The Total Environment*, 404(1), pp.18–25.
- Pasi, S., 2007. *Le transport de voyageurs par chemin de fer*, Luxembourg: Eurostat.
- Patier, D. & Routhier, J.-L., 2009. Une méthode d'enquête du transport de marchandises en ville pour un diagnostic en politiques urbaines. Available at: http://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00456068_v1/ [Accessed February 10, 2012].
- Petiot, R., 2001. *La fraude au stationnement: enjeux et analyse économique des comportements*. Lyon: Université Lumière Lyon 2.
- Peuportier, B.L., 2001. Life cycle assessment applied to the comparative evaluation of single family houses in the French context. *Energy and Buildings*, 33(5), pp.443–450.
- Picherit, M.-L., 2010. *Évaluation environnementale du véhicule électrique*: Méthodologies et application. Ecole des Mines de Saint-Etienne.
- Le Pochat, S., 2011. Rebound effect in LCA practice - A review and a focus on ICT.
- Pochet, P., 2003. TRAVEL PRACTICES AND ACCESS TO THE CAR AMONG THE ELDERLY: CURRENT DEVELOPMENTS AND ISSUES.. *Recherche-transports-sécurité*. Available at: <http://trid.trb.org/view.aspx?id=608307> [Accessed March 4, 2013].
- Potting, J., 2000. Spatial Differentiation in Life Cycle Impact Assessment A Framework, and Site-Dependent Factors to Assess Acidification and Human Exposure. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 5(2), pp.77–77.
- Potting, J. & Hauschild, M., 1997. Predicted Environmental Impact and Expected Occurrence of Actual Environmental Impact. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 2(4), pp.209–216.
- Prendergast, L.S. & Williams, R.D., 1981. Individual travel time budgets. *Transportation Research Part A: General*, 15(1), pp.39–46.
- Preston, J. & Rajé, F., 2007. Accessibility, mobility and transport-related social exclusion. *Journal of Transport Geography*, 15(3), pp.151–160.

- Pulido, J.C.R. & López, F.J.M., 2005. Teleworking in the information sector in Spain. *International Journal of Information Management*, 25(3), pp.229–239.
- Quételard, B., 2010. Se rendre au travail ou faire ses courses motive toujours un déplacement quotidien sur deux. Le recours à la voiture se stabilise.
- Quin, C., Duprez, F. & Bourgis, N., 2001. Exemples de coûts unitaires de déplacements. In *Compte National du Transport de Voyageurs*. Ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement, p. 46.
- Rantik, M., Kommunikationsforskningsberedningen (Sweden) & Chalmers tekniska högskola. Institutionen för Transportteknik, 1999. *Life cycle assessment of five batteries for electric vehicles under different charging regimes*, Stockholm: [Swedish Transport and Communications Research Board.
- Raux, C. et al., 2005. Bilans énergétiques Transport-Habitat et méthodologie BETEL. ETHEL. Rapport R2. Available at: <http://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00101248> [Accessed June 12, 2013].
- Raux, C. & Andan, C. d'Études T. de l'Équipement, 1988. *Analyses des comportements de mobilité individuelle quotidienne. Une synthèse bibliographique.*, Paris: Laboratoire d'Économie des Transports (LET). Available at: <http://portail.documentation.developpement-durable.gouv.fr/crdaln/document.xsp?id=Cdu-0040476> [Accessed June 14, 2013].
- Reap, J. et al., 2008. A survey of unresolved problems in life cycle assessment. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 13(4), pp.290–300.
- Rees, W. E., 1992. Ecological footprints and appropriated carrying capacity: what urban economics leaves out. *Environment and Urbanization*, 4(2), pp.121–130.
- Rees, Williams E., Wackernagel, M. & Testemale, P., 1998. *Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth (New Catalyst Bioregional Series)*, New Society Publishers.
- Réthoré, O. & Le Féon, S., 2010. L'analyse de cycle de vie, outil préférentiel de quantification des impacts environnementaux. *Encyclopédie du Développement Durable*. Available at: <http://encyclopedie-dd.org/encyclopedie/economie/l-analyse-du-cycle-de-vie-acv.html> [Accessed February 16, 2012].
- Rhee, H.-J., 2008. Home-based telecommuting and commuting behavior. *Journal of Urban Economics*, 63(1), pp.198–216.
- Rhee, H.-J., 2009. Telecommuting and urban sprawl. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 14(7), pp.453–460.
- Riga-Karandinos, A.-N. & Saitanis, C., 2005. Comparative assessment of ambient air quality in two typical Mediterranean coastal cities in Greece. *Chemosphere*, 59(8), pp.1125–1136.
- Risch, E. et al., L'analyse de cycles de vie (ACV) des systèmes d'assainissement: un outil complémentaire d'aide à la décision. *Sciences, eaux & territoires*, (9), pp.82–90.
- Rosnay, J. de, 1977. *Le microscope - Vers une vision globale*, Seuil.
- Routhier, J.-L., 2002. Du transport de marchandises en ville à la logistique urbaine. Available at: <http://portail.documentation.developpement-durable.gouv.fr/dri/document.xsp?id=Drast-ART00000014> [Accessed February 10, 2012].

- Russo, F. & Comi, A., 2012. The Simulation of Shopping Trips at Urban Scale: Attraction Macro-Model. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 39, pp.387–399.
- De Saint Pol, T., 2009. Evolution of obesity by social status in France, 1981–2003. *Economics & Human Biology*, 7(3), pp.398–404.
- Sandow, E. & Westin, K., 2010. The persevering commuter – Duration of long-distance commuting. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 44(6), pp.433–445.
- Sayagh, S., 2007. *Approche multicritère de l'utilisation de matériaux alternatifs dans les chaussées*. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.
- Sayagh, S. et al., 2010. Sensitivity of the LCA allocation procedure for BFS recycled into pavement structures. *Resources, Conservation and Recycling*, 54(6), pp.348–358.
- Scarabello, J., 2011. En Aquitaine, 12 grandes aires urbaines structurent le territoire. *INSEE*. Available at: http://www.insee.fr/fr/themes/document.asp?reg_id=4&ref_id=17895.
- Schafer, A., 2000. Regularities in Travel Demand□: An International Perspective. *Journal of Transportation and Statistics*, 3(3).
- Schäfer, A., Heywood, J.B. & Weiss, M.A., 2006. Future fuel cell and internal combustion engine automobile technologies: A 25-year life cycle and fleet impact assessment. *Energy*, 31(12), pp.2064–2087.
- Scheiner, J., 2010. Interrelations between travel mode choice and trip distance: trends in Germany 1976–2002. *Journal of Transport Geography*, 18(1), pp.75–84.
- Schmidt, W.-P. et al., 2004. Life cycle assessment of lightweight and end-of-life scenarios for generic compact class passenger vehicles. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 9(6), pp.405–416.
- Schubert, S.F. & Turnovsky, S.J., 2011. The impact of oil prices on an oil-importing developing economy. *Journal of Development Economics*, 94(1), pp.18–29.
- Schuckert, M., 1996. Life Cycle Analysis: Getting the total picture on vehicle engineering alternatives. *Automotive Engineering*. Available at: <http://trid.trb.org/view.aspx?id=556076> [Accessed April 22, 2013].
- Schwartz, J., Dockery, D.W. & Neas, L.M., 1996. Is daily mortality associated specifically with fine particles? *Journal of the Air & Waste Management Association (1995)*, 46(10), pp.927–939.
- Segalou, E., Routhier, J.-L. & Durand, S., 2002. Les transports de marchandises et l'urbanisme: d'une prise en compte législative à la simulation des interactions. Available at: http://halshs.archives-ouvertes.fr/docs/00/10/62/78/PDF/ASRDLF_2002.pdf [Accessed February 9, 2012].
- Seguin, S. et al., 2009. Les déplacements à Nantes Métropole□: la pole position de la voiture contestée.
- Serve, F., 2009. Conjecture/loi de Zahavi, effets de sas, et politiques de déplacements dans le Grand Nouméa. *Pensées urbaines*. Available at: <http://villes.blog.lemonde.fr/2009/10/15/conjectureloi-de-zahavi-effets-de-sas-et-politiques-de-deplacements-dans-le-grand-noumea/> [Accessed April 10, 2013].

- Shaw, R.P., 1992. The impact of population growth on environment: The debate heats up. *Environmental Impact Assessment Review*, 12(1–2), pp.11–36.
- Silvestre, P., 1986. Drainage routier: rôle de l'environnement hydrique. *Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées.*, (145), pp.69–78.
- Siturv, 2012. *Enquête Ménages Déplacements Valenciennes*, Valenciennes.
- Smeets, E. & Weterings, R., 1999. *Environmental Indicators: Typology and Overview*, Copenhagen (DK): European Environment Agency. Available at: <http://www.eea.europa.eu/publications/TEC25> [Accessed April 18, 2013].
- Smith, C.J. & Tate, E.J., 2012. The effect of the UK Vehicle Scrappage on passenger car CO2 emissions. In *Transport and Air Pollution*. Thessaloniki (Greece), p. 7.
- SOeS, 2013. *Les comptes des transports en 2012 - Premiers résultats*, CGDD.
- SOeS, 2010. Une expertise de l'empreinte écologique.
- De Solere, R., 2009. Répartition modale des déplacements selon le motif. *Certu*. Available at: http://www.certu.fr/fr/_Mobilit%C3%A9_et_d%C3%A9placements-n25/Connaissance_de_la_mobilit%C3%A9-n41/Donn%C3%A9es_de_la_mobilit%C3%A9-n43/Repartition_modale_des_deplacements_selon_le_motif-a1647-s_article_theme.html [Accessed August 23, 2012].
- Spielmann, M. et al., 2007. Transport Services. In *Ecoinvent reports*.
- Spielmann, M. & Althaus, H.-J., 2007. Can a prolonged use of a passenger car reduce environmental burdens? Life Cycle analysis of Swiss passenger cars. *Journal of Cleaner Production*, 15(11–12), pp.1122–1134.
- Spielmann, M., De Haan, P. & Scholz, R.W., 2008. Environmental rebound effects of high-speed transport technologies: a case study of climate change rebound effects of a future underground maglev train system. *Journal of Cleaner Production*, 16(13), pp.1388–1398.
- SRU, 2000. *Loi Solidarité et Renouvellement Urbain*,
- Stamford, L. & Azapagic, A., 2011. Sustainability indicators for the assessment of nuclear power. *Energy*.
- Stanley, J.K. et al., 2011. Mobility, social exclusion and well-being: Exploring the links. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 45(8), pp.789–801.
- Stébé, J.-M. & Marchal, H., 2010. *La sociologie urbaine* 2ème édition., PUF.
- Sullivan, J.L., Costic, M.M. & Han, W., 1998. *Automotive Life Cycle Assessment: Overview, Metrics, and Examples*, Warrendale, PA: SAE International. Available at: <http://papers.sae.org/980467/> [Accessed April 22, 2013].
- Talbot, J., 2001. Les déplacements domicile-travail - De plus en plus d'actifs travaillent loin de chez eux. , (767).
- Teulon, H., Boidot-Forget, M. & Epelly, O., 1995. *Life Cycle Assessment: A Tool for Improvement in Car Design*, Warrendale, PA: SAE International. Available at: <http://www.sae.org/technical/papers/951833> [Accessed April 22, 2013].

- Thobani, M., 1984. A nested logit model of travel mode to work and auto ownership. *Journal of Urban Economics*, 15(3), pp.287–301.
- Thorpe, A. & Harrison, R.M., 2008. Sources and properties of non-exhaust particulate matter from road traffic: A review. *Science of The Total Environment*, 400(1–3), pp.270–282.
- Toffoletto, L. et al., 2007. LUCAS - A New LCIA Method Used for a Canadian-Specific Context. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 12(2), pp.93–102.
- Train, K., 1980. A Structured Logit Model of Auto Ownership and Mode Choice. *The Review of Economic Studies*, 47(2), p.357.
- Traut, E. et al., 2012. Optimal design and allocation of electrified vehicles and dedicated charging infrastructure for minimum life cycle greenhouse gas emissions and cost. *Energy Policy*, 51, pp.524–534.
- Trégoût, B., 2010. *La mobilité des Français - Panorama issu de l'enquête nationale transports et déplacements 2008 - Commissariat Général au Développement Durable*, Paris: CGDD.
- Tsai, D.-H., Wu, Y.-H. & Chan, C.-C., 2008. Comparisons of commuter's exposure to particulate matters while using different transportation modes. *Science of The Total Environment*, 405(1–3), pp.71–77.
- Tsai, Y., 2005. Quantifying Urban Form: Compactness versus 'Sprawl. *Urban Studies*, 42, pp.141–161.
- Tsamboulas, D. & Mikroudis, G., 2000. EFECT – evaluation framework of environmental impacts and costs of transport initiatives. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 5(4), pp.283–303.
- Tunstall, H., Pickett, K. & Johnsen, S., 2010. Residential mobility in the UK during pregnancy and infancy: Are pregnant women, new mothers and infants “unhealthy migrants”? *Social Science & Medicine*, 71(4), pp.786–798.
- Turconi, R., Boldrin, A. & Astruo, T., 2013. Life cycle assessment (LCA) of electricity generation technologies: Overview, comparability and limitations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- United Nations, 1998. Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change.
- United Nations, D. of E. and S.D.P., 2002. *World urbanization prospects: the 2001 revision*, United Nations Publications.
- Urban, B. et al., 2012. Spatially differentiated examination of biodiversity in LCA (Life Cycle Assessment) on national scale exemplified by biofuels. *Agriculture and Forestry Research*, 3.
- Valiquette, F., 2010. *Typologie des chaînes de déplacements et modélisation descriptive des systèmes d'activités des personnes*. masters. École Polytechnique de Montréal. Available at: <http://publications.polymtl.ca/405/> [Accessed August 26, 2013].
- Vande Walle, S. & Steenberghen, T., 2006. Space and time related determinants of public transport use in trip chains. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 40(2), pp.151–162.
- Verdon, B. et al., 2008. Mobilité urbaine et réduction des émissions de gaz à effet de serre.

- Vial, E. et al., 2009. *Analyse critique FCBA de l'étude CimBeton "qualité environnementale des bâtiments"*, FCBA.
- Vincent, S., 2008. *Les "altermobilités" : analyse sociologique d'usage de déplacements alternatifs à la voiture individuelle. Des pratiques en émergence*. Doctorat de Sociologie. Paris: Université Paris 5 - René Descartes.
- Watzlawick, P., Beavin, J.H. & Jackson, D.D. (Donald D.A., 1979. *Une logique de la communication*, Seuil.
- Van Wee, B., Rietveld, P. & Meurs, H., 2006. Is average daily travel time expenditure constant? In search of explanations for an increase in average travel time. *Journal of Transport Geography*, 14(2), pp.109–122.
- Wegener, M., 1994. Operational Urban Models State of the Art. *Journal of the American Planning Association*, 60(1), pp.17–29.
- Will, F.G., 1996. Impact of lithium abundance and cost on electric vehicle battery applications. *Journal of Power Sources*, 63(1), pp.23–26.
- Wilton, R.D., Páez, A. & Scott, D.M., 2011. Why do you care what other people think? A qualitative investigation of social influence and telecommuting. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 45(4), pp.269–282.
- Winter, S. & Brambach, F., 2011. Determination of a common forest life cycle assessment method for biodiversity evaluation. *Forest Ecology and Management*, 262(12), pp.2120–2132.
- De Witte, A. et al., 2013. Linking modal choice to motility: A comprehensive review. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 49, pp.329–341.
- Xiu, G. et al., 2004. Characterization of major water-soluble inorganic ions in size-fractionated particulate matters in Shanghai campus ambient air. *Atmospheric Environment*, 38(2), pp.227–236.
- Yoon, B., Kim, S. & Rhee, J., 2012. An evaluation method for designing a new product-service system. *Expert Systems with Applications*, 39(3), pp.3100–3108.
- Zackrisson, M., Avellán, L. & Orlenius, J., 2010. Life cycle assessment of lithium-ion batteries for plug-in hybrid electric vehicles – Critical issues. *Journal of Cleaner Production*, 18(15), pp.1519–1529.
- Zahavi, Y. & Talvitie, A., 1980. Regularities in travel time and money expenditures. *Transportation Research Record*, (750), pp.13–19.
- Zahavi, Yacov & Ryan, J., 1980. Stability of Travel Components Over Time.
- Van Zeijts, H., Leneman, H. & Wegener Sleeswijk, A., 1999. Fitting fertilisation in LCA: allocation to crops in a cropping plan. *Journal of Cleaner Production*, 7(1), pp.69–74.
- Zhao, P., 2010. Sustainable urban expansion and transportation in a growing megacity: Consequences of urban sprawl for mobility on the urban fringe of Beijing. *Habitat International*, 34(2), pp.236–243.

Annexes

Annexe 1 : Seuils réglementaires d'émissions de NO_x dans l'air

Différents seuils sont fixés par décret pour les concentrations de polluants atmosphériques. A partir de certains seuils, des mesures doivent être prises (information de la population, conseils de précaution, interdictions). L'exemple des NO_x est donné ici.

---> sept niveaux de seuils pour le dioxyde d'azote (décret 2002-213 du 15/02/02)		
valeurs limites niveaux maximaux de pollution atmosphérique à ne pas dépasser	40 µg/m ³ ⁽¹⁾ 200 µg/m ³ ⁽²⁾ 200 µg/m ³ ⁽³⁾	en moyenne annuelle en moyenne horaire en moyenne horaire
seuils d'alerte niveaux de pollution atmosphérique au-delà desquels une exposition de courte durée présente un risque pour la santé humaine ou de dégradation de l'environnement et à partir desquels des mesures d'urgence doivent être prises	400 µg/m ³ 200 µg/m ³ ⁽⁴⁾	en moyenne horaire
seuil de recommandation et d'information niveau de pollution atmosphérique qui a des effets limités et transitoires sur la santé en cas d'exposition de courte durée et à partir duquel une information de la population est susceptible d'être diffusée	200 µg/m ³	en moyenne horaire
objectif de qualité niveau de qualité de l'air à atteindre dans une période donnée	40 µg/m ³	en moyenne annuelle
---> un niveau de seuil pour les oxydes d'azote (décret 2002-213 du 15/02/02)		
valeur limite niveau maximal de pollution atmosphérique à ne pas dépasser	30 µg/m ³ ⁽⁵⁾	en moyenne annuelle

(1) valeur applicable à compter du 01/01/2010 (marge de tolérance applicable en 2006 : 8)
 (2) à ne pas dépasser plus de 175 h/an (percentile 98 annuel)
 (3) à ne pas dépasser plus de 18 h/an (percentile 99,8 annuel), valeur applicable à compter du 01/01/2010 (marge de tolérance applicable en 2006 : 40)
 (4) si la procédure de recommandation et d'information a été déclenchée la veille et le jour même et que les prévisions font craindre un nouveau risque de déclenchement pour le lendemain
 (5) pour la protection de la végétation

Figure 53 : Seuils réglementaires d'émissions de NO_x dans l'air (Air Pays de la Loire, 2006)

Annexe 2 : Revue des méthodes d'évaluation recensées dans la littérature

Un tableau comparatif de méthodes d'évaluation environnementale utilisées pour les transports est présenté ici. Ce tableau n'est pas exhaustif mais espère délivrer une vision relativement complète des types de méthodes existantes. L'analyse fournit cinq types d'information :

- Une description succincte de la méthode ;
- Le périmètre d'étude retenu ;
- Les enjeux environnementaux traités ;
- Les objets d'étude possibles ;
- La zone géographique d'application.

Tableau annexe 3 : Descriptif des méthodes d'évaluation environnementale des transports						
Méthode/logiciel	Description	Périmètre	Enjeux traités	Domaine d'application	Zone géographique d'application	Source
<u>COPERT IV</u>	Logiciel permettant de calculer les émissions polluantes du secteur du transport routier	- émissions du pot d'échappement - émissions de démarrage à froid - hors pot : évaporation de carburant, usure des pneus et freins	- Global : GES - Local : pollutions locales (air)	Tous les véhicules routiers	Europe	(Leonidas Ntziachristos et al. 2009)
<u>MEET</u>	Méthodologie (EEA ⁴⁴) permettant d'évaluer les émissions de polluants et consommations d'énergie du secteur des transports (prolongement et élargissement de COPERT)	- émissions du pot d'échappement - émissions de démarrage à froid - évaporation de carburant, gradient des routes, taux de chargement des véhicules - émissions liées à la production d'énergie	- Global : GES, consommation d'énergie - Local : pollutions locales (air)	Tous les véhicules routiers, ferroviaires, maritimes et aériens	Europe	(A. Hickman J. 1999; J. Hickman et al. 1999)
<u>HBEFA</u>	Modèle permettant de calculer les émissions polluantes du secteur du transport routier	- émissions du pot d'échappement - émissions de démarrage à froid - hors pot : évaporation de carburant, usure des pneus et freins	- Global : GES - Local : pollutions locales (air)	Tous les véhicules routiers	Allemagne/Suisse	HBEFA
<u>IMPACT-ADEME</u>	Logiciel (ADEME) permettant d'évaluer les émissions de polluants et consommations d'énergie du secteur des transports (ce logiciel n'est plus vraiment utilisé car pas de mise à jour régulière)	- émissions du pot d'échappement - cold start émissions - hors pot : fuel evaporation, tyre and brake wear emissions	- Global : GES - Local : pollutions locales (air)	Tous les véhicules routiers	France	(ADEME 2003)
<u>Partie fin de vie du projet TERM</u>	Comptabilise le nombre de véhicules en fin de vie et la quantité de pneumatiques utilisés chaque année	Fin de vie	Déchets	Tous les véhicules routiers	Europe	TERM ⁴⁵

⁴⁴ European Enviraonmental Agency

⁴⁵ Transport Environment Reporting Mechanism

Méthode/logiciel	Description	Périmètre	Enjeux traités	Domaine d'application	Zone géographique d'application	Source
<u>ACV</u>	Méthode de caractérisation des impacts environnementaux potentiels tout au long du cycle de vie	- phase d'usage (Ecoinvent utilise COPERT IV) - émissions et consommations liées à la fabrication et maintenance des véhicules - émissions et consommations liées à la construction et maintenance des infrastructures	- Global : GES, consommation d'énergie, consommation de ressources, production de déchets - local : pollutions atmosphériques (air)	Tous les véhicules routiers, ferroviaires, maritimes et aériens	Monde	(ISO 14040 2006; ISO 14044 2006, p.14044)
<u>Well to Wheel (ACV à périmètre réduit)</u>	Caractérisation des impacts environnementaux "du puits à la roue"	- du puits au réservoir (well to tank) - du réservoir à la roue (tank to wheel)	- Global : GES et Energie	Tous les véhicules routiers	Monde	Ex : (Schäfer et al. 2006)
<u>Etudes d'impact sur l'environnement (EIE)</u>	Evaluation technique réglementaire des impacts potentiels avant projet de construction	Construction	Impacts locaux : présence d'une espèce protégée, captage d'eau potable, etc.	Toutes les infrastructures de transport	France	(Code de l'environnement 1976)
<u>ECORCE</u>	Logiciel permettant d'estimer les impacts environnementaux de la mise en place d'infrastructures routières	Cycle de vie (opérations de construction et d'entretien, recyclage)	- Global : GES, Energie - Local : pollutions de l'air et de l'eau, bruit, odeurs, etc.	Toutes les structures routières	France	(Capony et al. 2013)
<u>ACV</u>	Méthode de caractérisation des impacts environnementaux tout au long du cycle de vie	Cycle de vie (opérations de construction et d'entretien, recyclage)	- Global : GES, consommation d'énergie, consommation de ressources, production de déchets - local : pollutions atmosphériques (air)	Toutes les infrastructures de transport	Monde	(ISO 14040 2006; ISO 14044 2006)
<u>Evaluation environnementale des PDU</u>	Evaluation a posteriori des impacts environnementaux d'un Plan de Déplacement Urbain	En général, uniquement les effets directs (construction). Pas de regard sur les reports de trafic par exemple	En général, uniquement qualitatif (pas de justification par calcul d'émissions ou de concentrations)	Infrastructures mise en place dans le cadre d'un PDU	France	(Certu 2011)

Méthode/logiciel	Description	Périmètre	Enjeux traités	Domaine d'application	Zone géographique d'application	Source
<u>Joumard et Nicolas 2010</u>	Indicateurs de développement durable	Effets directs (constructions) et indirects (par exemple les reports de trafic)	11 Indicateurs pour l'environnement (global et local)	Infrastructure	France	(Robert Joumard & Jean-Pierre Nicolas 2010)
<u>OEET</u>	Evaluation Energie-Environnement sur le cycle de vie (mis en place dans le cadre du Grenelle de l'Environnement) (complément de l'EIE)	Cycle de vie	Essentiellement globaux : GES, Energie, épuisement de ressources	Toutes les infrastructures de transport	France	(OEET 2011)
<u>Budget Energie Transport (BET)</u>	Méthode croisant des données d'EMD et de consommations énergétiques des modes de transport	Phase d'usage	Uniquement Energie	Agglomérations (ex : Lyon)	France	(Orfeuill 1984)
<u>Budget Energie Environnement des Déplacements (BEED)</u>	Elargissement du BET aux problématiques environnementales (mis à jour avec COPERT IV)	Phase d'usage	GES et Energie	Agglomérations (ex : Lyon)	France	(Gallez 1995)
<u>BETEL (Budget Energie Transport Environnement Logement)</u>	Application de MEET à une enquête déplacements à l'échelle nationale (ENT 94)	Périmètre MEET pour les véhicules	Global : GES et Energie	Déplacements des individus à l'échelle nationale	France	(Raux et al. 2005)
<u>Nicolas et al. 2002</u>	Etude visant à établir des indicateurs de développement durable pour la mobilité - croisement de données d'EMD + MEET	Périmètre MEET pour les véhicules	- Global : GES, consommation d'énergie - Local : pollutions locales (air)	Agglomérations (ex : Lyon)	France	(J. Nicolas et al. 2002)

Méthode/logiciel	Description	Périmètre	Enjeux traités	Domaine d'application	Zone géographique d'application	Source
<u>Cadastres d'émissions</u>	Estimation territoriale multisectorielle des émissions de polluants dans l'air - croise des données primaires (enquêtes, comptages routiers, statistiques) et des facteurs d'émissions (mesure ou modélisation) - par exemple, Atmo Rhône Alpes utilise COPERT IV	Périmètre COPERT IV	- Global : GES, consommation d'énergie - Local : pollutions locales (air)	Agglomération, région	France	(Ampasel 2009)
<u>Indice Atmo</u>	Mesure directe sur station des polluants atmosphériques (obligatoire dans les agglomérations de plus de 100 000 habitants) en France	Emissions directes (mais pas uniquement transport)	- Local : Particules, SO ₂ , NO ₂ , O ₃	Agglomérations de plus de 100 000 habitants	France	AASQA ⁴⁶
<u>Empreinte écologique</u>	Estimation de la surface de terres productives et d'écosystèmes aquatiques nécessaire à produire les ressources utilisées et à assimiler les déchets produits (Rees et Wackernagel 1999) ⁴⁷	- émissions de dioxyde de carbone dues à la combustion de carburant, à la construction et à l'entretien des véhicules - espace utilisé pour les infrastructures	- Global : GES, consommation d'espace	A l'échelle d'un territoire	Monde	(Louafi Bouzouina & Jean-Pierre Nicolas 2007; Gondran & Boutaud 2009)
<u>Empreinte Carbone</u>	Mesure du volume de CO ₂ émis par combustion d'énergie fossile, par les entreprises ou les êtres vivants	Cycle de vie	- Global : GES	A l'échelle d'un territoire	Monde	Ex : (DREAL Pays de la Loire 2012)
<u>Bilan Carbone</u>	Méthode de l'ADEME visant à quantifier les émissions de GES	3 périmètres possibles (explicités dans le texte)	- Global : GES	A l'échelle des organisations	France	(ADEME 2005)

⁴⁶ Association Agréée de Surveillance de la Qualité de l’Air

⁴⁷ Les émissions de CO2 sont mesurées à l'aide des méthodes citées précédemment - par exemple MEET dans le cas de l'EE du Grand Lyon

Méthode/logiciel	Description	Périmètre	Enjeux traités	Domaine d'application	Zone géographique d'application	Source
<u>EFFECT - Evaluation Framework of Environmental impacts and Costs of Transport initiatives</u>	Couplage d'analyses multicritère et coûts-bénéfice	Effets directs (constructions) et parfois indirects (par exemple les reports de trafic)	Multicritère, mais résultats qualitatifs (échelles de notation pour différents critères)	Couvre toutes les projets liés aux transports (décisions politiques, planifications urbaines, projets d'infrastructure), localement, régionalement et nationalement	Grèce	(Tsamboulas & Mikroudis 2000)
<u>MNP (Netherlands Environmental Assessment Bureau) and CPB (Netherlands Bureau for Economic Policy Analysis) methodology</u>	Evaluation environnementale de la partie transports des programmes des candidats aux élections nationales aux Pays-Bas	Effets directs (constructions) et parfois indirects (par exemple les reports de trafic)	CO ₂ , NO _x , coût supporté par les citoyens	Projets politiques (planification, infrastructure, etc.)	Pays -Bas	(Annema & Van Wee 2008)
<u>COMMUTE</u>	Evaluation des impacts environnementaux d'options politiques	Cycle de vie	Global et local	Options politiques en matière de transports	Europe	EEA
<u>Environment Energy Assessment of Trips (EEAT)</u>	Evaluation des impacts environnementaux de la mobilité des habitants d'une agglomération	Périmètre MEET pour les véhicules	Global : GES et Energie	Agglomération (ex : Lille)	France	(Dupont-Kieffer et al. 2010)
<u>ACV</u>	Méthode de caractérisation des impacts environnementaux tout au long du cycle de vie	- phase d'usage (Ecoinvent utilise COPERT IV) - émissions et consommations liées à la fabrication et maintenance des véhicules - émissions et consommations liées à la construction et maintenance des infrastructures	- Global : GES, consommation d'énergie, consommation de ressources, production de déchets - local : pollutions atmosphériques (air)	Peu utilisé (Peuportier et al. ; Heinonen)	Monde	(ISO 14040 2006; ISO 14044 2006)

Annexe 3 : Liste des aires urbaines de plus de 250 000 habitants au découpage de 2002

Tableau 43 : Liste des aires urbaines de plus de 250 000 habitants au découpage de 2002

Marseille - Aix	Rennes
Lyon	Avignon
Lille	Orléans
Nice	Clermont-Ferrand
Toulouse	Béthune
Bordeaux	Mulhouse
Nantes	Dijon
Toulon	Le Havre
Douai - Lens	Angers
Strasbourg	Reims
Grenoble	Brest
Rouen	Pau
Valenciennes	Caen
Nancy	Bayonne
Metz	Le Mans
Montpellier	Limoges
Tours	Perpignan
Saint-Etienne	Dunkerque

Annexe 4 : Cartographie des EMD avant 2007

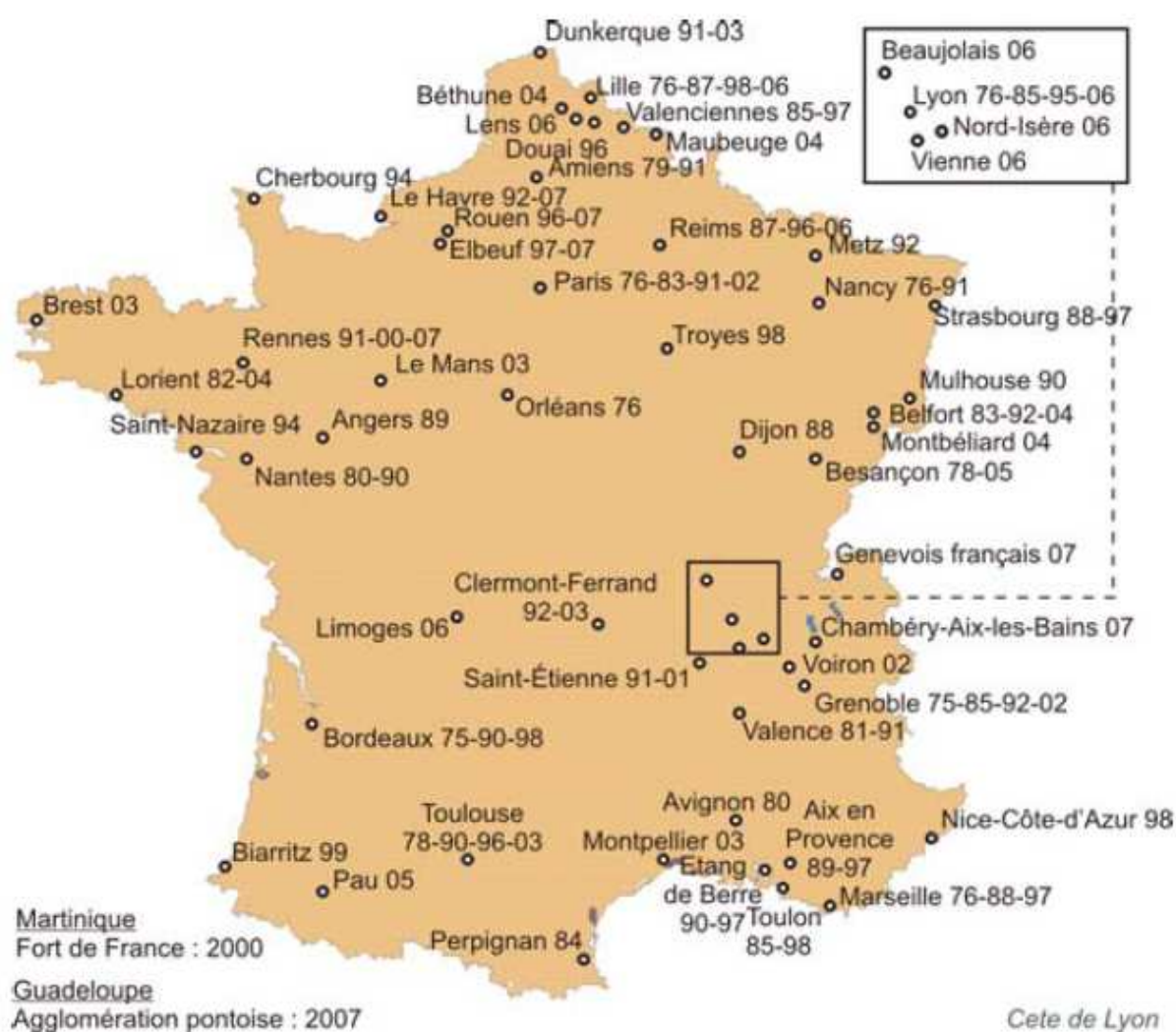


Figure 54 : Cartographie des EMD avant 2007 (Certu, 2008)

Annexe 5 : Matrice des distances par mode et par besoin pour l'agglomération de Saint-Etienne

Les données présentées dans le tableau ci-dessous sont les données utilisées comme données d'entrée (données d'inventaire) pour l'analyse de cycle de vie, réalisée avec le logiciel SimaPro, pour l'étude de cas de Saint-Etienne.

nombre de pkms, par an, par mode et par motif simplifié	Base	Passager tramway	Passager bus urbain	Passager SNCF	Transport employeur	Transport scolaire	Passager car interurbain	Taxi	Camionnette, camion	Autre mode	Voiture particulière	Deux0roues à moteur (>50 cm3)	Deux0roues à moteur (<50cm3)	Bicyclette	Fauteuil roulant	Marche à pied
base	1 433 739 286	47 581 207	47 744 868	15 559 255	3 083 824	38 282 540	13 204 535	1 546 827	16 614 760	3 898 181	1 170 527 380	4 120 838	5 849 779	4 492 732	61 251	61 171 310
domicile	552 627 013	18 260 571	20 381 021	6 893 589	1 133 416	14 779 140	5 859 316	865 991	2 677 841	1 351 224	450 298 080	1 640 786	2 510 294	2 135 216	30 755	23 809 774
travail sur le lieu d'emploi declare	244 170 125	10 536 364	6 712 301	9 477 640	3 100 422	0	1 073 246	0	10 467 307	733 136	194 136 870	1 627 473	2 095 024	871 931	0	3 338 412
tournee professionnelle	7 103 295	0	12 197	0	0	0	0	0	1 037 442	0	6 023 450	0	0	0	0	30 206
travail sur un autre lieu	98 298 389	1 302 512	1 720 196	953 186	571 910	0	60 680	0	11 978 258	2 802 756	77 300 387	96 851	268 541	109 764	0	1 133 348
nourrice, creche, garde d'enfants	1 098 012	0	0	0	0	119 720	0	0	0	0	862 673	0	0	6 864	0	108 755
etudes sur le lieu d'etudes declare (ecole maternelle ou primaire)	13 675 146	93 911	134 051	0	0	2 717 691	278 850	22 584	0	0	9 100 600	0	0	20 629	0	1 306 830
etudes sur le lieu d'etudes declare (college)	18 894 386	1 013 699	3 699 252	195 773	0	6 478 031	1 429 144	0	0	0	5 023 759	39 133	76 310	15 360	0	923 923
etudes sur le lieu d'etudes declare (lycee)	28 083 023	4 010 565	7 542 963	543 455	0	6 773 629	2 573 805	67 155	0	0	5 258 533	96 596	415 279	0	0	801 042
etudes sur le lieu d'etudes declare (universite ou grande ecole)	24 452 297	7 135 615	3 411 065	1 584 420	0	0	122 467	0	0	0	11 310 886	0	0	27 144	0	860 700

nombre de pkms par mode et par motif simplifié motifs	Base	Passager tramway	Passager bus urbain	Passager SNCF	Transport employeur	Transport scolaire	Passager car interurbain	Taxi	Camionnette, camion	Autre mode	Voiture particulière	Deux0roues à moteur (>50 cm3)	Deux roues à moteur (<50cm3)	Bicyclette	Fauteuil roulant	Marche à pied
multimotifs en centre commercial	4 202 121	214 057	0	184 643	0	0	0	0	0	0	3 660 505	0	54 252	0	0	88 663
achats en grand magasin, supermarché et hypermarché	84 360 960	2 395 275	350 827	647 493	0	0	1 133 112	0	95 378	0	78 386 653	231 217	65 917	10 852	0	1 044 234
achats en petit et moyen commerce	49 410 251	1 218 843	882 661	355 645	14 121	0	73 731	0	120 471	3 585	42 910 057	105 133	96 486	60 108	2 793	3 566 616
achats en marche couvert ou de plein vent	3 011 882	79 823	202 626	0	0	0	0	0	0	0	2 377 437	0	0	0	0	351 995
santé	20 683 049	1 372 859	501 049	145 038	0	0	103 598	433 930	0	242 563	17 080 573	0	56 692	0	0	746 746
démarches	25 110 893	1 511 167	1 318 754	0	0	88 169	0	0	105 790	0	20 739 983	96 660	40 614	49 957	0	1 159 799
recherche d'un emploi	2 877 940	385 697	163 764	0	0	0	0	0	0	0	2 147 558	118 516	0	0	0	62 406
loisirs, activité sportive, culturelle ou associative	50 006 813	1 316 162	1 270 451	218 994	0	817 965	642 479	0	118 764	358 917	42 708 361	126 261	216 328	470 585	0	1 741 545
promenade, leçon de conduite	8 532 953	481 378	401 297	0	0	0	44 209	0	0	0	5 001 198	30 411	89 331	251 430	0	2 233 698
restauration hors du domicile	12 865 350	519 388	72 407	17 836	93 725	208 780	115 406	0	352 670	50 598	10 313 492	12 787	144 923	0	0	963 337
visite à des parents ou amis	89 242 560	2 600 249	3 063 511	398 702	61 617	73 180	74 441	0	175 723	304 860	79 347 484	271 136	223 593	175 198	12 812	2 460 052
accompagner quelqu'un (personne présente)	57 286 837	95 754	154 989	0	24 879	102 519	0	0	56 179	19 815	56 012 630	0	0	0	0	820 072
aller chercher quelqu'un (personne absente)	54 887 441	453 145	496 936	40 876	0	98 103	0	0	102 326	25 175	51 890 874	52 871	65 072	0	1 417	1 660 644
dépose d'une personne à un mode de transport (personne présente)	6 398 064	0	54 307	0	0	0	0	0	18 016	0	6 207 997	0	68 743	0	0	49 000

reprise d'une personne a un mode de transport (personne absente)	4 728 445	0	0	116 351	0	0	33 848	0	56 938	0	4 445 367	0	0	0	0	75 941
autres motifs	9 286 982	174 269	119 406	129 392	0	0	0	46 216	0	81 549	8 180 616	0	0	0	11 594	543 940

Annexe 6 : Exemples de Fiches descriptives pour les modes de transport

I. Fiche descriptive pour la modélisation des bus

1. Besoins identifiés pour la modélisation de la mobilité urbaine au travers du cas de l'agglomération stéphanoise

Quatre types d'autobus ont été recensés pour le cas de l'agglomération stéphanoise :

- l'autobus standard ;
- l'autobus articulé ;
- le minibus ;
- l'autobus à moyenne capacité.

A minima, ces quatre types de véhicules seront donc modélisés. Une flotte sera également constituée, permettant de faire appel à une pkm de bus générique appelant elle-même une part de chaque type de véhicule (en fonction du scénario souhaité). Cette flotte est donc paramétrable et les proportions de chaque type de bus sont dynamiques. Une flotte générique française est également proposée, pour le cas où l'utilisateur manque d'informations précises.

2. Disponibilités dans Ecoinvent (Spielmann et al. 2007)

Un inventaire « autobus » est disponible dans Ecoinvent : « Transport, regular bus/CH U ». Il se décompose en 7 étapes de cycle de vie :

- 4 d'entre elles concernent directement le bus (fabrication, utilisation, maintenance et fin de vie) ;
- 3 se rapportent à la route (fabrication, utilisation, fin de vie).

Différents paramètres ont été identifiés comme potentiellement influents pour les résultats (par revue de littérature et analyses de sensibilité sur le module Ecoinvent – disponibles en annexe). Ces paramètres sont, par défaut dans Ecoinvent :

- le taux de remplissage : 14 personnes
- la durée de vie kilométrique : 1 000 000 km
- la consommation de carburant : 0,35 kg soient 0,41 L de diesel pour 1 km.

- les émissions de CO₂ au pot d'échappement : 1,1045 kg pour 1 km

L'utilisation de la méthode de caractérisation IPCC 2007, à 100 ans permet d'obtenir une première approche des émissions de GES. Pour une pkm parcourue, 104 g CO₂ eq sont émis qui se concentrent sur la phase d'usage (91%). Le reste des émissions se répartit sur les autres phases du cycle de vie (Figure 55).

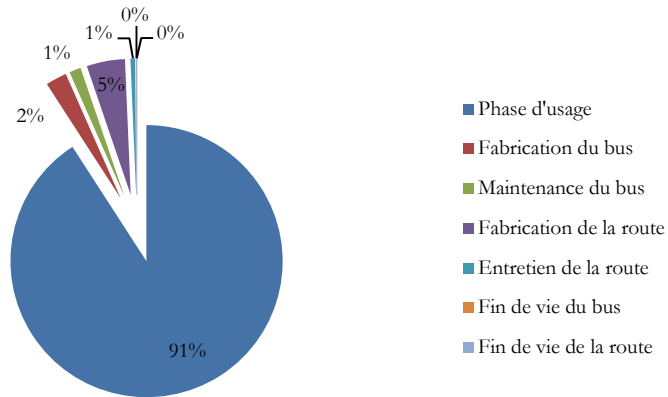


Figure 55 : répartition des émissions de GES sur le cycle de vie d'un autobus dans Ecoinvent

C'est ce module qui servira de base pour la mise en place des différents inventaires « bus ».

3. Paramètres retenus pour la modélisation

Tableau 44 : Paramètres retenus pour la modélisation des bus

	Bus standard	Bus articulé	Bus à moyenne capacité	Minibus
Taux d'occupation (en personnes)* (Quin et al. 2011)	11 (13)	22 (26)	5,5 (6,5)	5,5 (6,5)
Durée de vie kilométrique (ADEME 2010)	1 000 000	1 000 000	300 000	300 000
Consommation (en L/100 km) (STAS**)	49	66,5	19	19

*Les valeurs entre parenthèses sont les valeurs retenues pour les déplacements périurbains

**La STAS est la Société de Transports de l'Agglomération stéphanoise

1/(taux d'occupation)

Known outputs to technosphere. Products and co-products					
Name	Amount	Unit	Quantity	Allocation %	Cat
Autobus standard urbain	1	personkm	Person.Distance	100 %	mol
(Insert line here)					

Known outputs to technosphere. Avoided products					
Name	Amount	Unit	Distribution	SD ^2 or 2*SD	Mir
(Insert line here)					

Inputs

Known inputs from nature (resources)					
Name	Sub-compartment	Amount	Unit	Distribution	SD ^2 or 2*SD
(Insert line here)					

Known inputs from technosphere (materials/fuels)					
Name	Amount	Unit	Distribution	SD ^2 or 2*SD	Mir
Phase d'usage bus standard diesel	0,090909	km	Lognormal	2,0131	
Bus/RIER/I U	9,0909090909		Lognormal	3,0125	
Maintenance, bus/CH/I U	9,0909090909		Lognormal	3,0125	
Road/CH/I U	0,00045728	my	Lognormal	3,0124	
Operation, maintenance, road/CH/I U	0,000081496	my	Lognormal	3,0124	
(Insert line here)					

1/[(taux d'occupation)*(durée de vie kilométrique)]

Figure 56 : Renseignement des paramètres dans Ecoinvent

4. Flotte française

Comme cela a été introduit, pour les cas où l'utilisateur manque d'informations précises sur la flotte de bus pour le scénario qu'il souhaite étudier, il peut faire appel à une flotte générique, représentative de la situation en France en 2000 (Lacour & Joumard 2002). Elle a été considérée entièrement Diesel, du fait de la place marginale occupée par les autres types d'énergie (Figure 57).

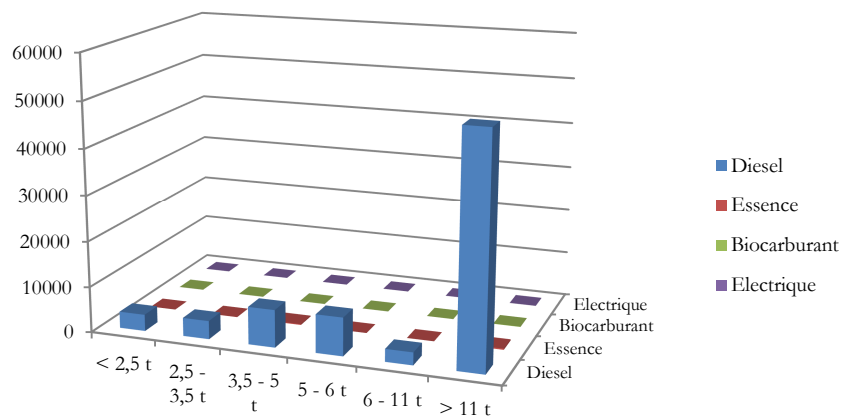


Figure 57 : répartition des types d'énergie selon les catégories d'autobus en France en 2000, d'après (Lacour & Joumard 2002)

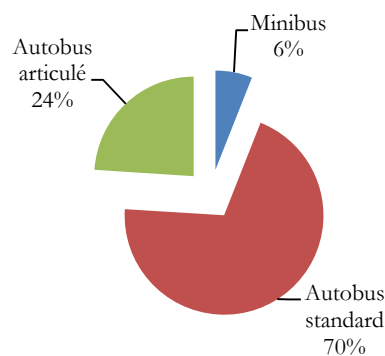


Figure 58 : part de chaque type de bus dans la flotte générique, d'après (Lacour & Joumard 2002)

5. Bibliographie

- ADEME, 2010. Chapitre 4 - Prise en compte des transports. In *Bilan Carbone - Entreprises et Collectivités - Guide des facteurs d'émissions - Version 6.1*. ADEME, p. 97.
- Lacour, S. & Joumard, R., 2002. *Parc, usage et émissions des véhicules routiers en France de 1970 à 2020*, INRETS.
- Quin, C., Duprez, F. & Bourgis, N., 2011. Exemples de coûts unitaires de déplacements. In *Compte National du Transport de Voyageurs*. Ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement, p. 46.
- Spielmann, M. et al., 2007. Transport Services. In *Ecoinvent reports*.

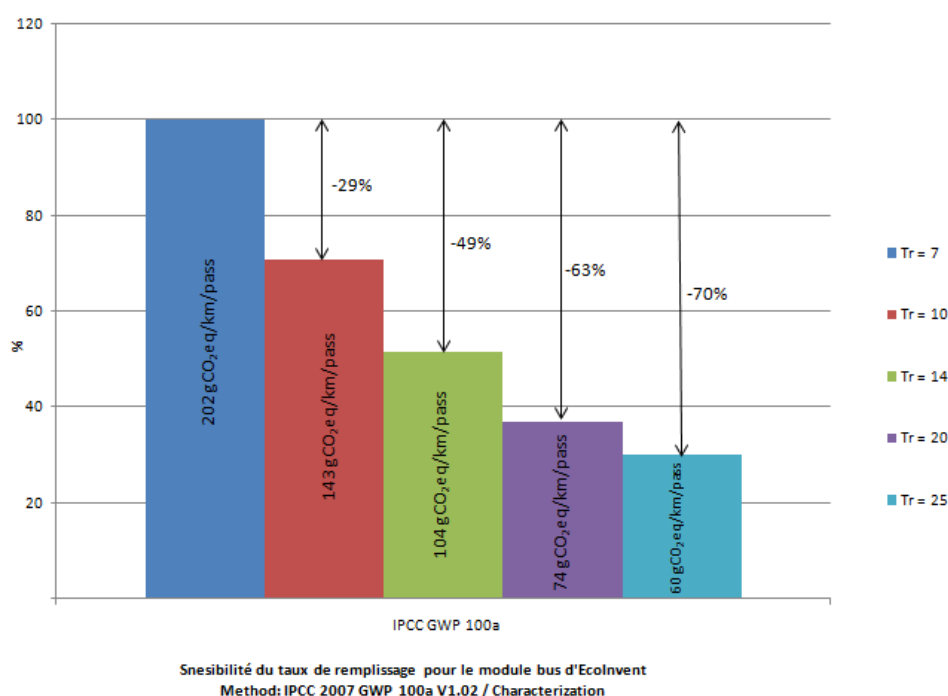
6. Annexes

Paramètres influents sur les émissions de GES à la pkm

Les paramètres variables dans la réalité et pouvant avoir une influence forte sur les résultats devront être paramétrables dans l'ACV.

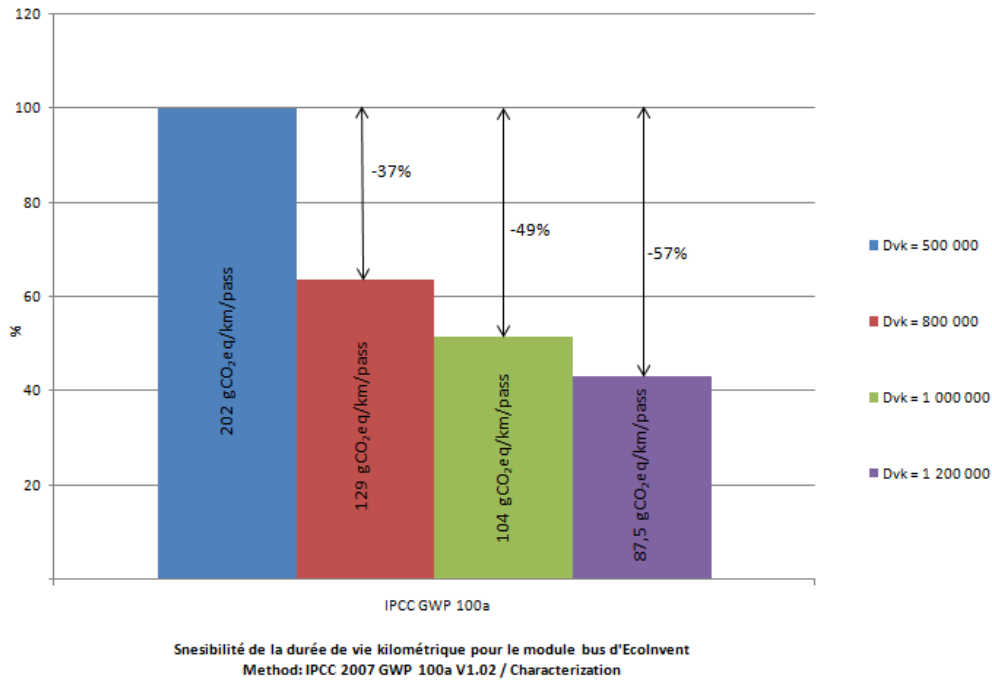
Le taux de remplissage

Le taux de remplissage d'un bus est variable selon l'horaire (heure de pointe ou non), le lieu (disponibilité de modes), etc. Comme le montre la figure suivante, les résultats sont très dépendants du taux de remplissage (qui est directement proportionnel à la phase d'utilisation, représentant elle-même 91% des émissions de CO₂ eq).



La durée de vie kilométrique

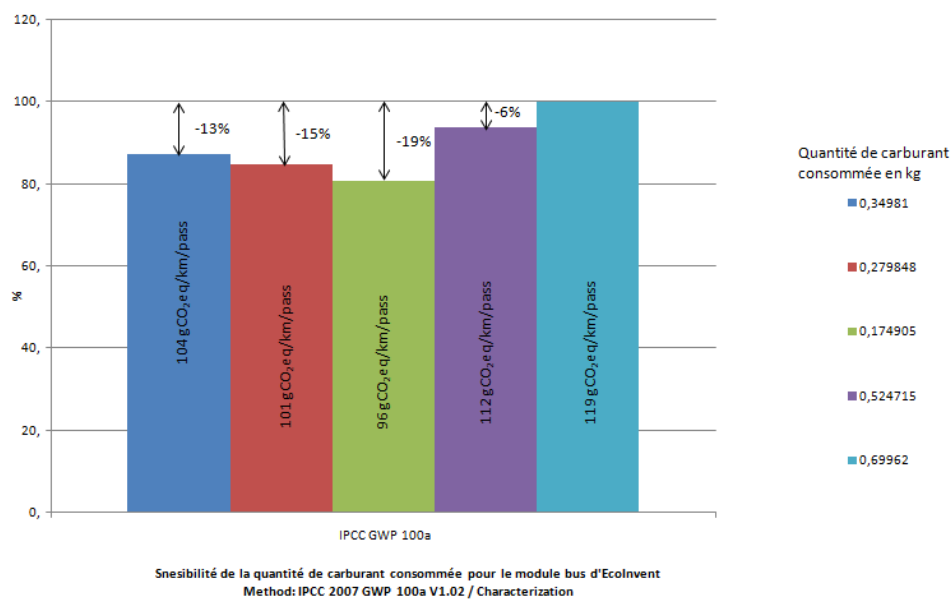
La durée de vie kilométrique dépend notamment de la politique de la ville étudiée. Certaines villes choisissent de renouveler régulièrement leur parc de véhicules, revendant les anciens à d'autres villes. Mais d'autres, par intérêt économique, tendent systématiquement à garder ses véhicules jusqu'à leur fin de vie. Cela implique également une durée de vie kilométrique différente. A l'instar du taux de remplissage, la durée de vie est directement proportionnelle à la phase d'utilisation et influe donc fortement sur les résultats.



La quantité de carburant consommée

Le carburant utilisé dans EcoInvent correspond bien au carburant utilisé majoritairement en France pour les bus, le diesel. Une consommation de 0,41 L pour 1 km est retenue, ce qui correspond à 41 L pour 100 kilomètres (légèrement en-dessous des chiffres moyens données par la STAS⁴⁸ (52,1 L/100km, mais qui sont une moyenne incluant notamment les autobus articulés). Comme le montrent les résultats suivants, les résultats sont sensibles à cette valeur.

⁴⁸ La STAS est la Société de Transports de l'Agglomération Stéphanoise, en charge de 2/3 de la gestion des déplacements en transports en commun.



Les émissions directes de CO₂

Une quantité d'émissions de CO₂ au pot d'échappement de 1,1 kg pour 1 km est retenue. Cette seule quantité représente, ramenée au passager, 78g, soient 75% du total. On peut donc affirmer que ce paramètre sera sensible pour les résultats, ce qui est confirmé par la figure suivante.

II. Fiche descriptive pour la modélisation des tramways

1. Besoins identifiés pour la modélisation de la mobilité urbaine au travers du cas de l'agglomération stéphanoise

Un type de tramway a été modélisé pour le cas stéphanois.

2. Disponibilités dans Ecoinvent (Spielmann et al. 2007)

Un inventaire « autobus » est disponible dans Ecoinvent : « Transport, tram/CH U ». Il se décompose en 7 étapes de cycle de vie :

- 4 d'entre elles concernent directement le bus (fabrication, utilisation, maintenance et fin de vie) ;
- 3 se rapportent à la route (fabrication, utilisation, fin de vie).

Différents paramètres ont été identifiés comme potentiellement influents pour les résultats (par revue de littérature et analyses de sensibilité sur le module Ecoinvent – disponibles en annexe). Ces paramètres sont, par défaut dans Ecoinvent :

- le taux de remplissage : 52,8 personnes
- la durée de vie kilométrique : 1 120 000 km
- la consommation de carburant : 4,75 kWh pour 1 km.
- mix électrique : Suisse (Electricity, medium voltage, at grid/CH U)

L'utilisation de la méthode de caractérisation IPCC 2007, à 100 ans permet d'obtenir une première approche des émissions de GES. Pour une pkm parcourue, 26,4 g CO₂ eq sont émis qui se concentrent sur la phase d'usage (44,6%) et la mise en place de l'infrastructure (42%). Le reste des émissions se répartit sur les autres phases du cycle de vie (Figure 55).

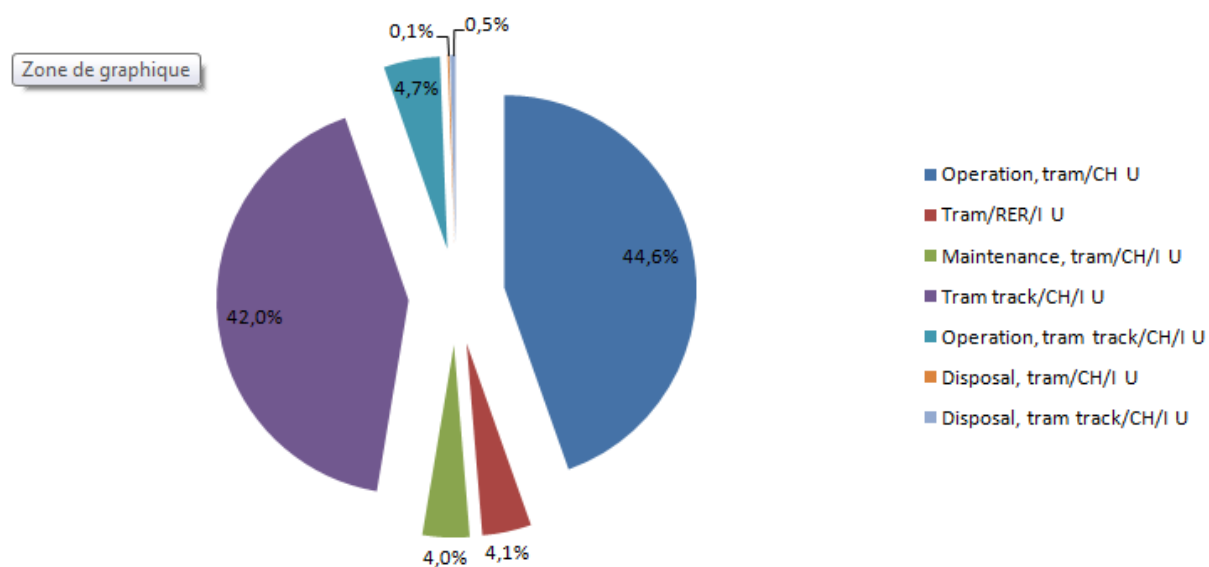


Figure 59 : répartition des émissions de GES sur le cycle de vie d'un autobus dans Ecoinvent

C'est ce module qui servira de base pour la mise en place des différents inventaires « bus ».

2. Paramètres retenus pour la modélisation

Tableau 45 : Paramètres retenus pour la modélisation des tramways

Bus standard	
Taux d'occupation (en personnes)* (Quin et al. 2011)	20 (31)
Durée de vie kilométrique (ADEME 2010)	1 450 000
Consommation (en kWh par km) (STAS**)	2,58
Mix électrique	France (Ecoinvent)

*Les valeurs entre parenthèses sont les valeurs retenues en heure de pointe

**La STAS est la Société de Transports de l'Agglomération stéphanoise

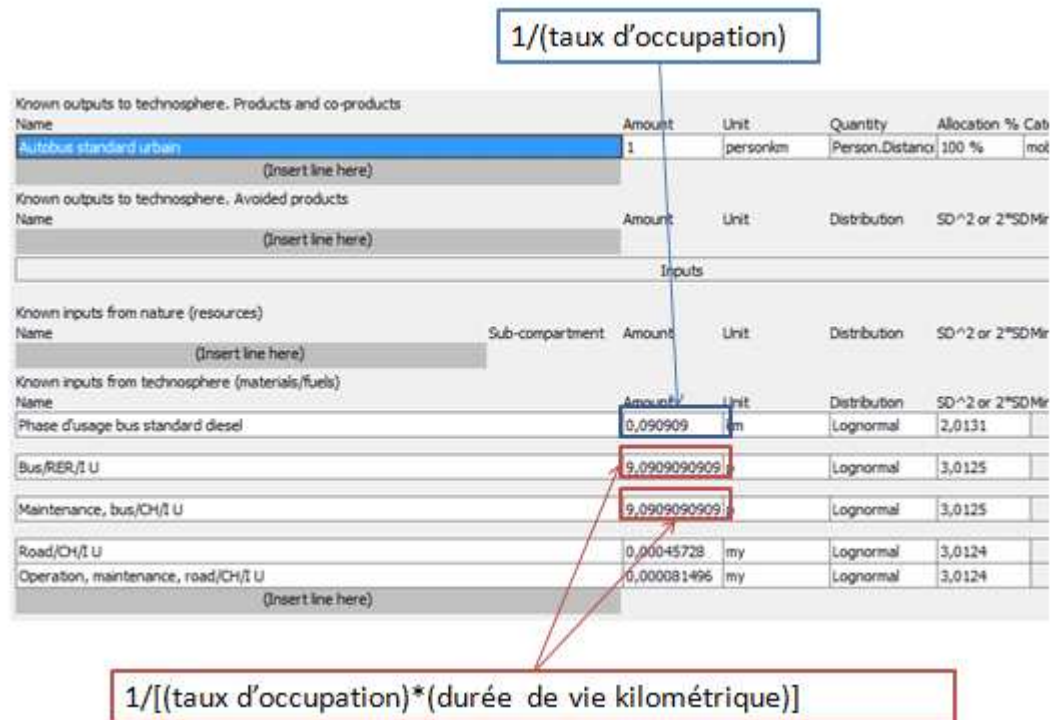


Figure 60 : Renseignement des paramètres dans Ecoinvent (Analogue au bus)

Les consommations ainsi que le mix électrique utilisé sont renseignés dans l'inventaire « Operation, tram/CH U ».

3. Biblio

- ADEME, 2010. Chapitre 4 - Prise en compte des transports. In *Bilan Carbone - Entreprises et Collectivités - Guide des facteurs d'émissions - Version 6.1*. ADEME, p. 97.
- Lacour, S. & Joumard, R., 2002. *Parc, usage et émissions des véhicules routiers en France de 1970 à 2020*, INRETS.
- Quin, C., Duprez, F. & Bourgis, N., 2011. Exemples de coûts unitaires de déplacements. In *Compte National du Transport de Voyageurs*. Ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement, p. 46.
- Spielmann, M. et al., 2007. Transport Services. In Ecoinvent reports.

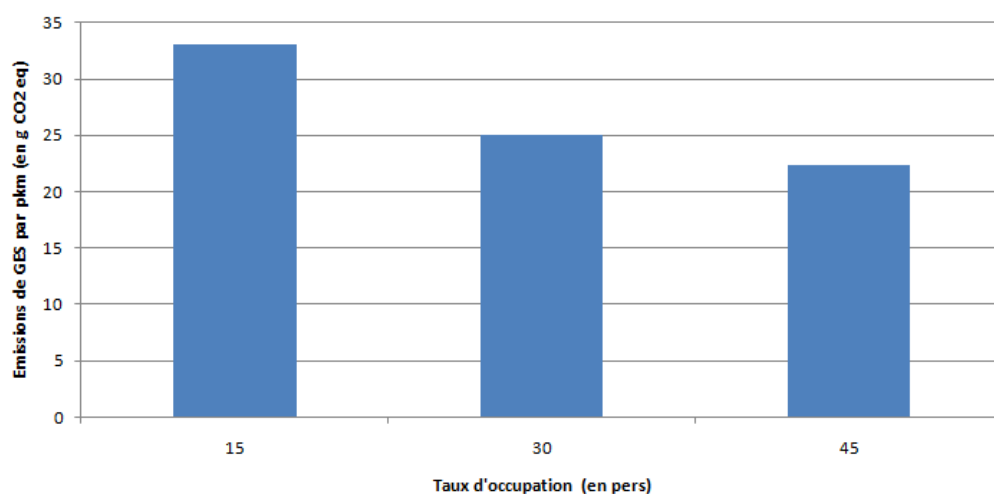
4. Annexes

1. Paramètres influents sur les émissions de GES à la pkm

Les paramètres variables dans la réalité et pouvant avoir une influence forte sur les résultats devront être paramétrables dans l'ACV.

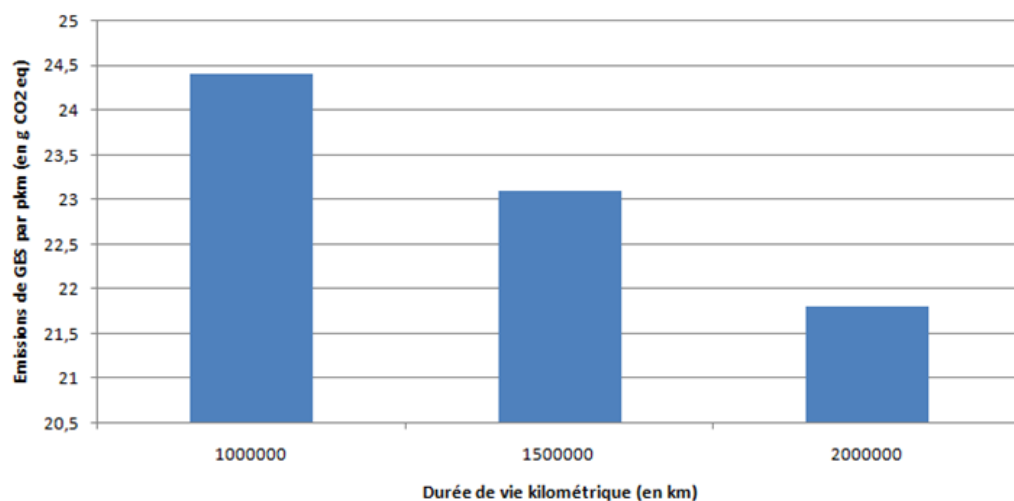
Le taux de remplissage

Le taux d'occupation du tramway influence les résultats à la pkm (-25% entre 15 et 30 personnes) mais cette influence a tendance à s'atténuer lorsque le taux de remplissage est très élevé.



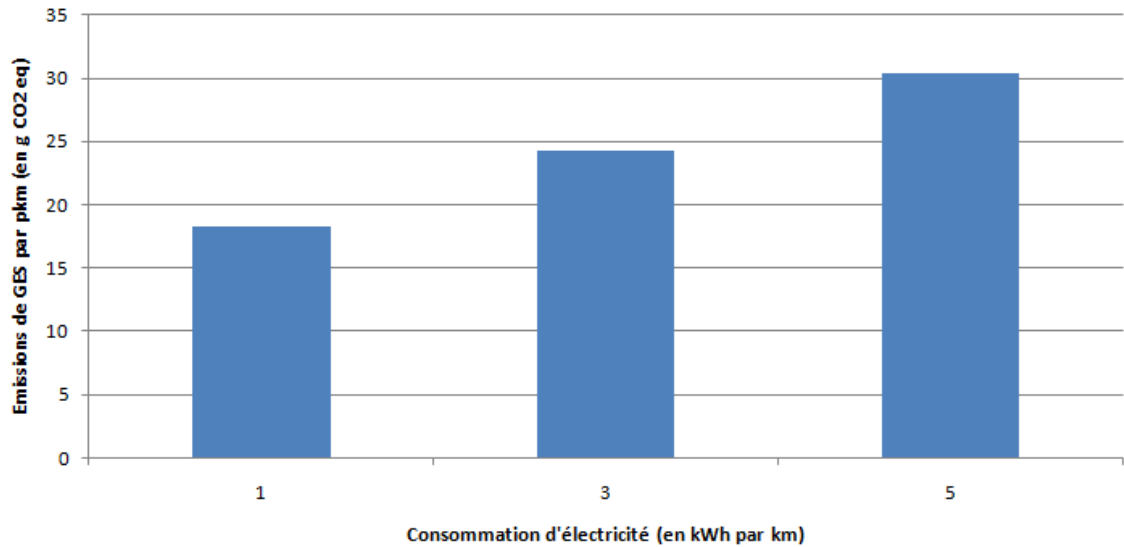
La durée de vie kilométrique

La durée de vie kilométrique n'a que peu d'influence sur le bilan GES à la pkm pour le tramway.



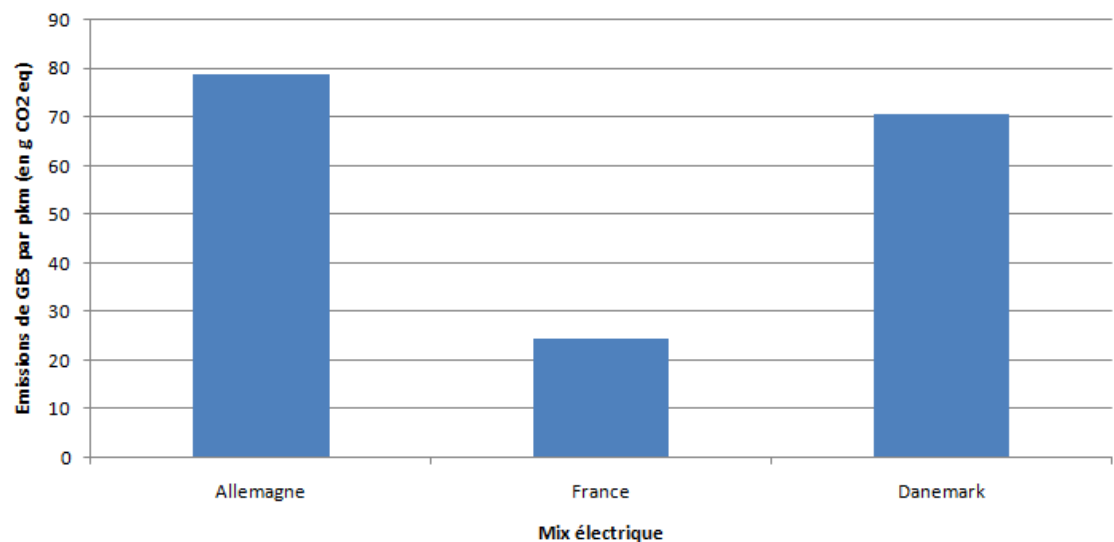
La quantité d'électricité consommée

La quantité d'électricité consommée pour effectuer un km en tramway influence assez fortement les émissions de GES.



Le mix électrique utilisé

Le bouquet électrique utilisé influence fortement le bilan GES par pkm du tramway. Les émissions triplent entre les bouquets de la France et de l'Allemagne par exemple.



Annexe 7 : Données pour la modélisation des modes de transports

Dans cette annexe sont présentées les données utilisées pour la modélisation des différents véhicules. Sont renseignés les paramètres définis comme déterminants dans les fiches transports (Annexe 6) : les taux d'occupation, les consommations (carburant et électricité), les durées de vie par mode et par motif. Pour la phase d'usage des modes électriques, le mix électrique français a été utilisé par défaut. La manière de modifier les différents paramètres dans la base de données est décrite en annexe 6. Les différents inventaires utilisés, de base sont décrits dans le Tableau 46.

Tableau 46 : Inventaires de base utilisés pour les modes de transport

Mode de transport à modéliser	Procédé(s) Ecoinvent utilisé(s)
Automobile	- Transport, passenger car, petrol, EURO3/CH U - Transport, passenger car, petrol, EURO4/CH U - Transport, passenger car, petrol, EURO5/CH U - Transport, passenger car, diesel, EURO3/CH U - Transport, passenger car, diesel, EURO4/CH U - Transport, passenger car, diesel, EURO5/CH U
Autobus	Transport, regular bus/CH U
Autocar	Transport, coach/CH U
Trolleybus	Transport, trolleybus/CH U
Tramway	Transport, tram/CH U
Véhicule utilitaire léger	Transport, van <3,5t/CH U
Deux-roues motorisés	Transport, scooter/CH U
Vélo	Transport, bicycle/CH U
Marche à pied	Pas de procédé Ecoinvent
Train	Transport, regional train, SBB mix, CH U

Informations véhicules particuliers	Taux d'occupation des véhicules particuliers p	Durée de vie voiture diesel (km)	Durée de vie voiture essence (km)
Base	1,45	250190	157070
DOMICILE	1,45	250190	157070
TRAVAIL SUR LE LIEU D'EMPLOI DECLARE	1,03	250190	157070
TOURNEE PROFESSIONNELLE	1,03	250190	157070
TRAVAIL SUR UN AUTRE LIEU	1,03	250190	157070
NOURRICE, CRECHE, GARDE D'ENFANTS	1,07	250190	157070
ETUDES SUR LE LIEU D'ETUDES DECLARE (ECOLE MATERNELLE OU PRIMAIRE)	1,07	250190	157070
ETUDES SUR LE LIEU D'ETUDES DECLARE (COLLEGE)	1,07	250190	157070
ETUDES SUR LE LIEU D'ETUDES DECLARE (LYCEE)	1,07	250190	157070
ETUDES SUR LE LIEU D'ETUDES DECLARE (UNIVERSITE OU GRANDE ECOLE)	1,07	250190	157070
MULTI0MOTIFS EN CENTRE COMMERCIAL	1,45	250190	157070
ACHATS EN GRAND MAGASIN, SUPERMARCHE ET HYPERMARCHE	1,45	250190	157070
ACHATS EN PETIT ET MOYEN COMMERCE	1,45	250190	157070
ACHATS EN MARCHÉ COUVERT OU DE PLEIN VENT	1,45	250190	157070
SANTÉ	1,45	250190	157070
DEMARCHES	1,45	250190	157070
RECHERCHE D'UN EMPLOI	1,45	250190	157070
LOISIRS, ACTIVITE SPORTIVE, CULTURELLE OU ASSOCIATIVE	1,45	250190	157070
PROMENADE, LECHE VITRINE, LECONS CONDUITE	1,45	250190	157070
RESTAURATION HORS DU DOMICILE	1,45	250190	157070

VISITE A DES PARENTS OU AMIS	1,45	250190	157070
ACCOMPAGNER QUELQU'UN (PERSONNE PRESENTE)	1,96	250190	157070
ALLER CHERCHER QUELQU'UN (PERSONNE ABSENTE)	1,96	250190	157070
DEPOSE D'UNE PERSONNE A UN MODE DE TRANSPORT (PERSONNE PRESENTE)	1,96	250190	157070
REPRISE D'UNE PERSONNE A UN MODE DE TRANSPORT (PERSONNE ABSENTE)	1,96	250190	157070
AUTRES MOTIFS	1,39	250190	157070

Informations véhicules particuliers	Emissions directes de CO2 grand essence (en kg/km)	Emissions directes de CO2 moyen essence (en kg/km)	Emissions directes de CO2 petite essence (en kg/km)	Emissions directes de CO2 grand diesel (en kg/km)	Emissions directes de CO2 moyen diesel (en kg/km)	Emissions directes de CO2 petit diesel (en kg/km)
Base	0,232	0,179	0,145	0,21	0,165	0,131
DOMICILE	0,232	0,179	0,145	0,21	0,165	0,131
TRAVAIL SUR LE LIEU D'EMPLOI DECLARE	0,232	0,179	0,145	0,21	0,165	0,131
TOURNEE PROFESSIONNELLE	0,232	0,179	0,145	0,21	0,165	0,131
TRAVAIL SUR UN AUTRE LIEU	0,232	0,179	0,145	0,21	0,165	0,131
NOURRICE, CRECHE, GARDE D'ENFANTS	0,232	0,179	0,145	0,21	0,165	0,131
ETUDES SUR LE LIEU D'ETUDES DECLARE (ECOLE MATERNELLE OU PRIMAIRE)	0,232	0,179	0,145	0,21	0,165	0,131
ETUDES SUR LE LIEU D'ETUDES DECLARE (COLLEGE)	0,232	0,179	0,145	0,21	0,165	0,131
ETUDES SUR LE LIEU D'ETUDES DECLARE (LYCEE)	0,232	0,179	0,145	0,21	0,165	0,131
ETUDES SUR LE LIEU D'ETUDES DECLARE (UNIVERSITE OU GRANDE ECOLE)	0,232	0,179	0,145	0,21	0,165	0,131
MULTI0MOTIFS EN CENTRE COMMERCIAL	0,232	0,179	0,145	0,21	0,165	0,131
ACHATS EN GRAND MAGASIN, SUPERMARCHE ET HYPERMARCHE	0,232	0,179	0,145	0,21	0,165	0,131
ACHATS EN PETIT ET MOYEN COMMERCE	0,232	0,179	0,145	0,21	0,165	0,131
ACHATS EN MARCHÉ COUVERT OU DE PLEIN VENT	0,232	0,179	0,145	0,21	0,165	0,131

SANTE	0,232	0,179	0,145	0,21	0,165	0,131
DEMARCHES	0,232	0,179	0,145	0,21	0,165	0,131
RECHERCHE D'UN EMPLOI	0,232	0,179	0,145	0,21	0,165	0,131
LOISIRS, ACTIVITE SPORTIVE, CULTURELLE OU ASSOCIATIVE	0,232	0,179	0,145	0,21	0,165	0,131
PROMENADE, LECHE VITRINE, LECONS CONDUITE	0,232	0,179	0,145	0,21	0,165	0,131
RESTAURATION HORS DU DOMICILE	0,232	0,179	0,145	0,21	0,165	0,131
VISITE A DES PARENTS OU AMIS	0,232	0,179	0,145	0,21	0,165	0,131
ACCOMPAGNER QUELQU'UN (PERSONNE PRESENTE)	0,232	0,179	0,145	0,21	0,165	0,131
ALLER CHERCHER QUELQU'UN (PERSONNE ABSENTE)	0,232	0,179	0,145	0,21	0,165	0,131
DEPOSE D'UNE PERSONNE A UN MODE DE TRANSPORT (PERSONNE PRESENTE)	0,232	0,179	0,145	0,21	0,165	0,131
REPRISE D'UNE PERSONNE A UN MODE DE TRANSPORT (PERSONNE ABSENTE)	0,232	0,179	0,145	0,21	0,165	0,131
AUTRES MOTIFS	0,232	0,179	0,145	0,21	0,165	0,131

Informations véhicules particuliers	Consommation grand essence (en kg/km)	Consommation moyen essence (en kg/km)	Consommation petite essence (en kg/km)	Consommation grand diesel (en kg/km)	Consommation moyen diesel (en kg/km)	Consommation petit diesel (en kg/km)
Base	0,109	0,0845	0,0743	0,0801	0,0629	0,04988
DOMICILE	0,109	0,0845	0,0743	0,0801	0,0629	0,04988
TRAVAIL SUR LE LIEU D'EMPLOI DECLARE	0,109	0,0845	0,0743	0,0801	0,0629	0,04988
TOURNEE PROFESSIONNELLE	0,109	0,0845	0,0743	0,0801	0,0629	0,04988
TRAVAIL SUR UN AUTRE LIEU	0,109	0,0845	0,0743	0,0801	0,0629	0,04988
NOURRICE, CRECHE, GARDE D'ENFANTS	0,109	0,0845	0,0743	0,0801	0,0629	0,04988
ETUDES SUR LE LIEU D'ETUDES DECLARE (ECOLE MATERNELLE OU PRIMAIRE)	0,109	0,0845	0,0743	0,0801	0,0629	0,04988
ETUDES SUR LE LIEU D'ETUDES DECLARE (COLLEGE)	0,109	0,0845	0,0743	0,0801	0,0629	0,04988
ETUDES SUR LE LIEU D'ETUDES DECLARE (LYCEE)	0,109	0,0845	0,0743	0,0801	0,0629	0,04988
ETUDES SUR LE LIEU D'ETUDES DECLARE (UNIVERSITE OU GRANDE ECOLE)	0,109	0,0845	0,0743	0,0801	0,0629	0,04988

MULTI-MOTIFS EN CENTRE COMMERCIAL	0,109	0,0845	0,0743	0,0801	0,0629	0,04988
ACHATS EN GRAND MAGASIN, SUPERMARCHE ET HYPERMARCHE	0,109	0,0845	0,0743	0,0801	0,0629	0,04988
ACHATS EN PETIT ET MOYEN COMMERCE	0,109	0,0845	0,0743	0,0801	0,0629	0,04988
ACHATS EN MARCHE COUVERT OU DE PLEIN VENT	0,109	0,0845	0,0743	0,0801	0,0629	0,04988
SANTE	0,109	0,0845	0,0743	0,0801	0,0629	0,04988
DEMARCHES	0,109	0,0845	0,0743	0,0801	0,0629	0,04988
RECHERCHE D'UN EMPLOI	0,109	0,0845	0,0743	0,0801	0,0629	0,04988
LOISIRS, ACTIVITE SPORTIVE, CULTURELLE OU ASSOCIATIVE	0,109	0,0845	0,0743	0,0801	0,0629	0,04988
PROMENADE, LECHE VITRINE, LECONS CONDUITE	0,109	0,0845	0,0743	0,0801	0,0629	0,04988
RESTAURATION HORS DU DOMICILE	0,109	0,0845	0,0743	0,0801	0,0629	0,04988
VISITE A DES PARENTS OU AMIS	0,109	0,0845	0,0743	0,0801	0,0629	0,04988
ACCOMPAGNER QUELQU'UN (PERSONNE PRESENTE)	0,109	0,0845	0,0743	0,0801	0,0629	0,04988
ALLER CHERCHER QUELQU'UN (PERSONNE ABSENTE)	0,109	0,0845	0,0743	0,0801	0,0629	0,04988
DEPOSE D'UNE PERSONNE A UN MODE DE TRANSPORT (PERSONNE PRESENTE)	0,109	0,0845	0,0743	0,0801	0,0629	0,04988
REPRISE D'UNE PERSONNE A UN MODE DE TRANSPORT (PERSONNE ABSENTE)	0,109	0,0845	0,0743	0,0801	0,0629	0,04988
AUTRES MOTIFS	0,109	0,0845	0,0743	0,0801	0,0629	0,04988

Energie Automobile	SANS PLOMB	SUPER	DIESEL	GAZ	ELECTRIQUE	AUTRE
516565	213419	21868	277083	2835	346	1014
100%	41%	4%	54%	1%	0%	0%

Véhicule	Taux d'occupation des véhicules p	1/p	Durée de vie (km)	1/pkm diesel	Consommation carburant (L/100km)	Consommation carburant (L/km)	Consommation carburant (kg/km)	Consommationélec (kWh/1km)	Em d cat
Bus standard en pointe	15	0,06666667	1 000 000	6,66667E-08	49	0,49	0,4165	0	
Bus articulé en pointe	30	0,03333333	1 000 000	3,33333E-08	66,5	0,665	0,56525	0	
Bus moyenne capacité en pointe	7	0,14285714	850 000	1,68067E-07	19	0,19	0,1615	0	
Minibus en pointe	7	0,14285714	850 000	1,68067E-07	19	0,19	0,1615	0	
Bus standard en heures creuses	11	0,09090909	1 000 000	9,09091E-08	49	0,49	0,4165	0	
Bus articulé en heures creuses	22	0,04545455	1 000 000	4,54545E-08	66,5	0,665	0,56525	0	
Bus moyenne capacité en heures creuses	7	0,14285714	850 000	1,68067E-07	19	0,19	0,1615	0	
Minibus en heures creuses	7	0,14285714	850 000	1,68067E-07	19	0,19	0,1615	0	
Tramway en pointe	31	0,03257329	1 450 000	2,24643E-08	0	0	0	2,58	
Tramway en heures creuses	20	0,05	1 450 000	3,44828E-08	0	0	0	2,58	
Autocar	20	0,05	1 500 000	3,33333E-08	25	0,25	0,2125	0	
Autocar scolaire	30	0,03333333	1 500 000	2,22222E-08					
Trolleybus en pointe	15	0,06666667	1 000 000	6,66667E-08	10	0,1	0,085	2,35	
Trolleybus en heures creuses	11	0,09090909	1 000 000	9,09091E-08	10	0,1	0,085	2,35	

Exemple : Flotte automobile

Pour chacun des six procédés Ecoinvent retenus pour l'automobile, trois tailles de véhicules ont été déclinées : petit, moyen et grand. Pour cela, un paramètre principal a été modifié : les émissions directes de CO₂ par pkm. Les valeurs retenues vont de 0,131 g CO₂ eq pour le petit diesel à 232 g CO₂ eq pour le grand essence. Cette modification s'est faite dans le procédé phase d'usage appelé par chaque procédé automobile. Ainsi, 18 procédés « phase d'usage » ont été créés correspondant aux 18 procédés « automobile » présentés (2 types de carburant * 3 catégories EURO * 3 tailles). Les émissions des autres polluants ont été laissées telles que représentées dans Ecoinvent (respectant les normes EURO correspondantes).

Tableau 47 : valeurs retenues pour les émissions directes de CO₂ pour les différentes automobiles (d'après outil de modélisation interne EDF (VICTOR))

Modèle	Emissions directes de CO ₂ en kg
Petit essence	0,145
Moyen essence	0,179
Grand essence	0,232
Petit Diesel	0,131
Moyen Diesel	0,165
Grand Diesel	0,210

18 types d'automobile différents sont donc disponibles, permettant de construire des flottes. Des flottes différentes ont été construites en fonction de l'aire urbaine concernée (les résultats d'EMD permettant d'obtenir une répartition des carburants et des tailles dans l'aire urbaine et les normes EURO l'ayant été à partir des rapports du CCFA sur l'industrie automobile et de l'Union Routière de France – faits et chiffres – statistiques des transports).

A Saint-Etienne, par exemple, une part de 60% de diesel est retenue (40% d'essence), déclinée en 18,7% de petits modèles, 50,5 de moyens et 30,8 de grands et selon les normes EURO (3 : 30%, 4 : 60% et 5 : 10%). Ce qui donne, par exemple, $0,6 \times 0,187 \times 0,3 = 3,37\%$ de petits véhicules diesel EURO3.

Ensuite, les flottes ont été déclinées selon le motif du déplacement. Les résultats d'EMD donnent pour quelques grandes catégories de motif, des taux d'occupation spécifiques des véhicules. Les données utilisées pour Saint-Etienne sont consignées page 128 du manuscrit (tableau 12). La manière de prendre en compte ce taux d'occupation est décrite en annexe 6 (elle est décrite pour le bus, mais cela se fait de manière similaire pour l'automobile).

Annexe 8 : Figures complémentaires pour l'Analyse en Composantes Principales

Cette annexe propose des graphes supplémentaires pour les résultats de l'ACP.

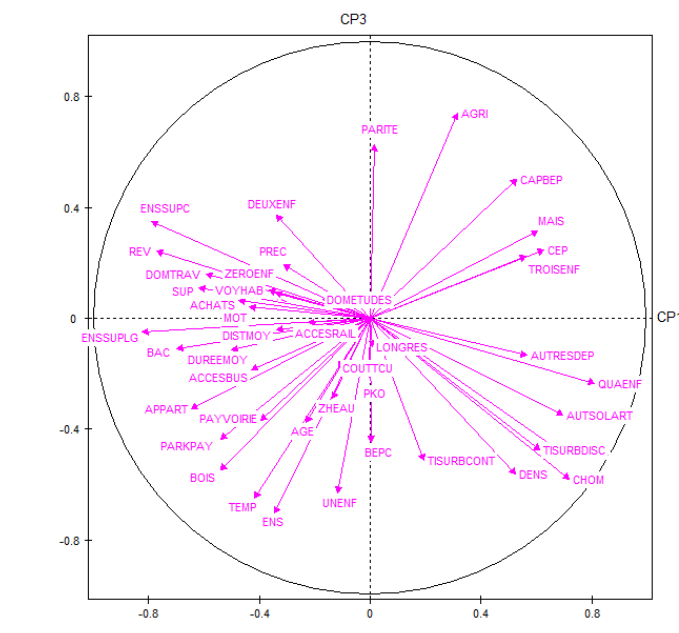


Figure 61 : représentation des variables dans le plan factoriel (CP1 ; CP3)

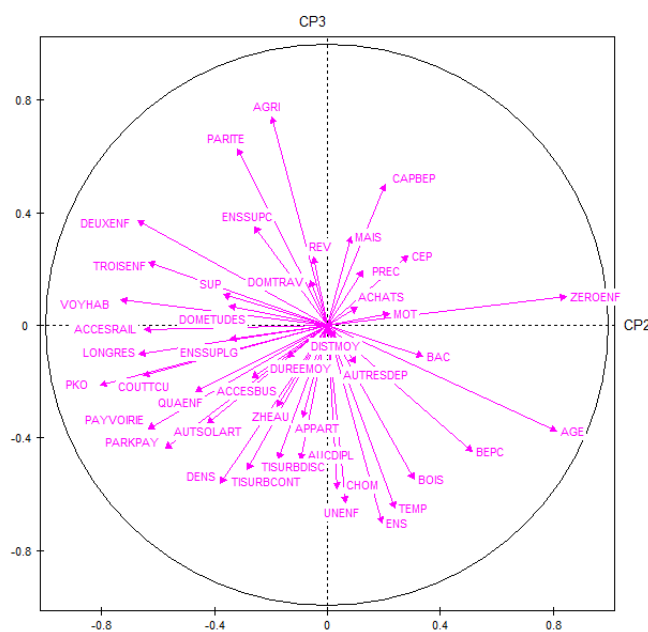


Figure 62 : représentation des variables dans le plan factoriel (CP2 ; CP3)

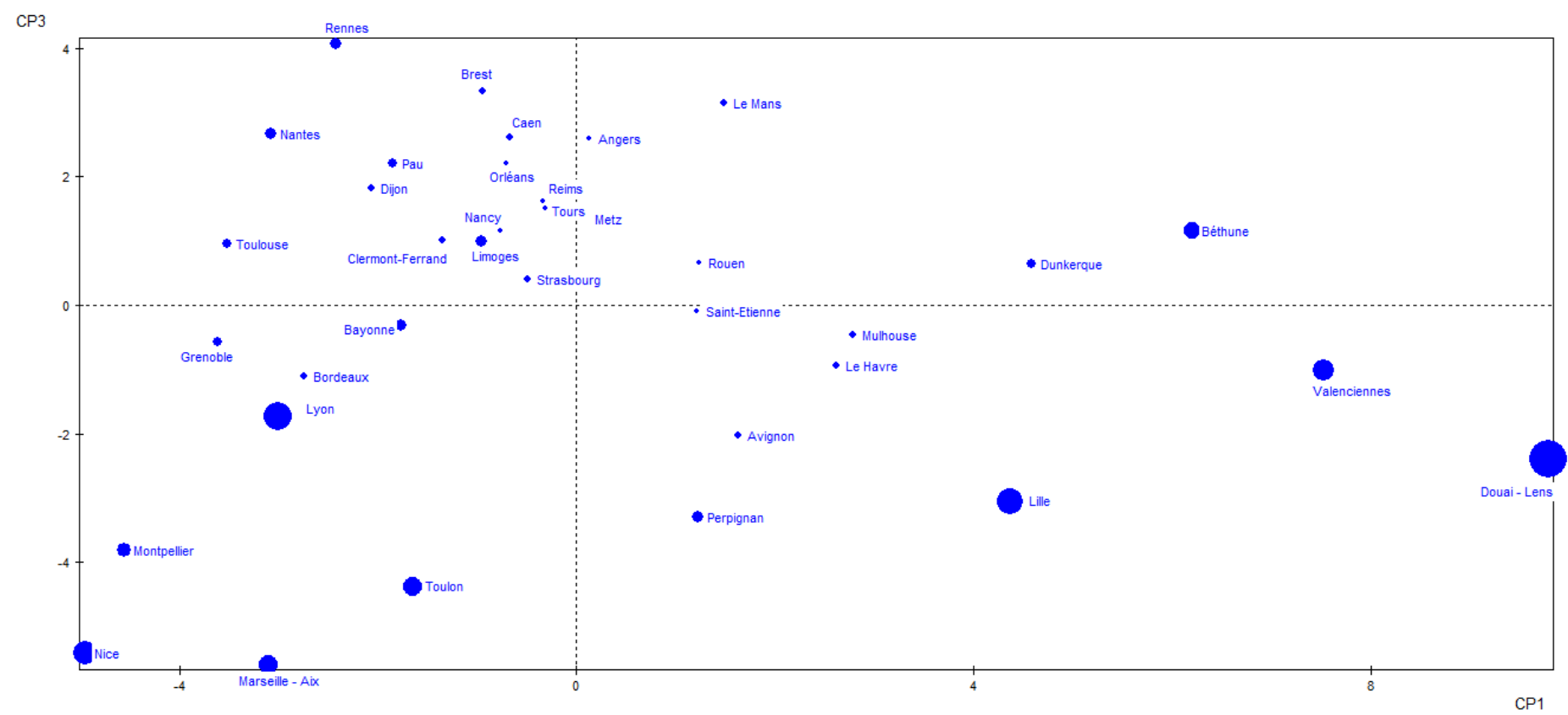


Figure 63 : représentation des individus dans le plan factoriel (CP1 ; CP3)

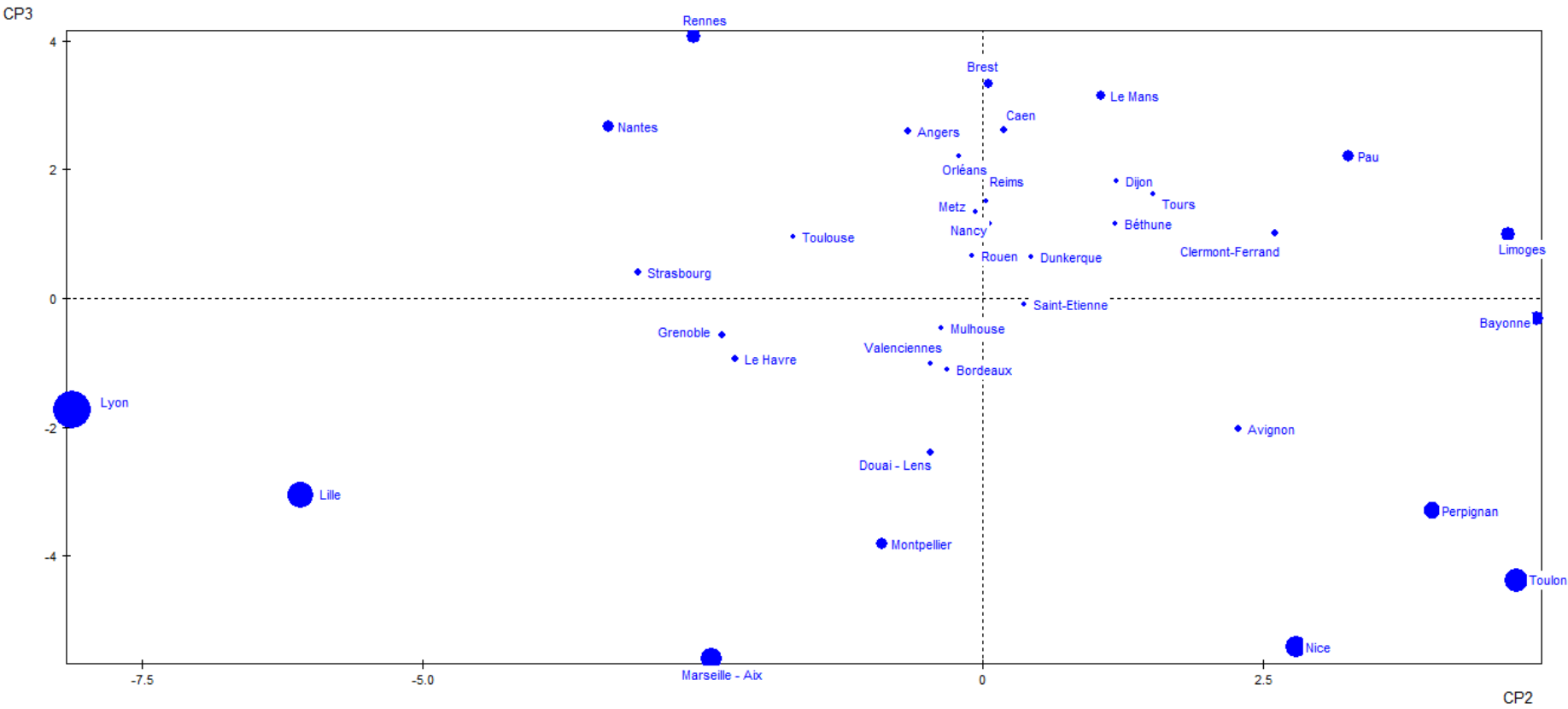


Figure 64 : représentation des individus dans le plan factoriel (CP2 ; CP3)

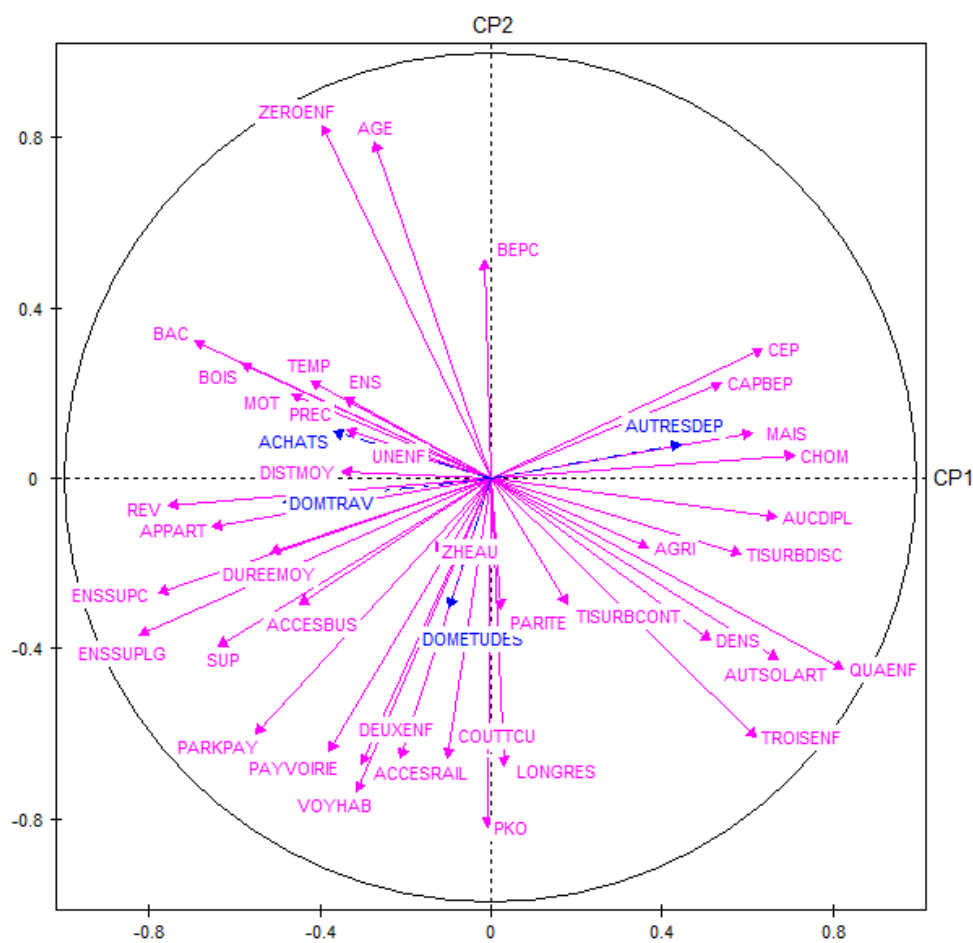


Figure 65 : représentation des variables dans le plan (CP1 ; CP2) en considérant les motifs de déplacement comme variables illustratives

Annexe 9 : Compléments sur les aires urbaines

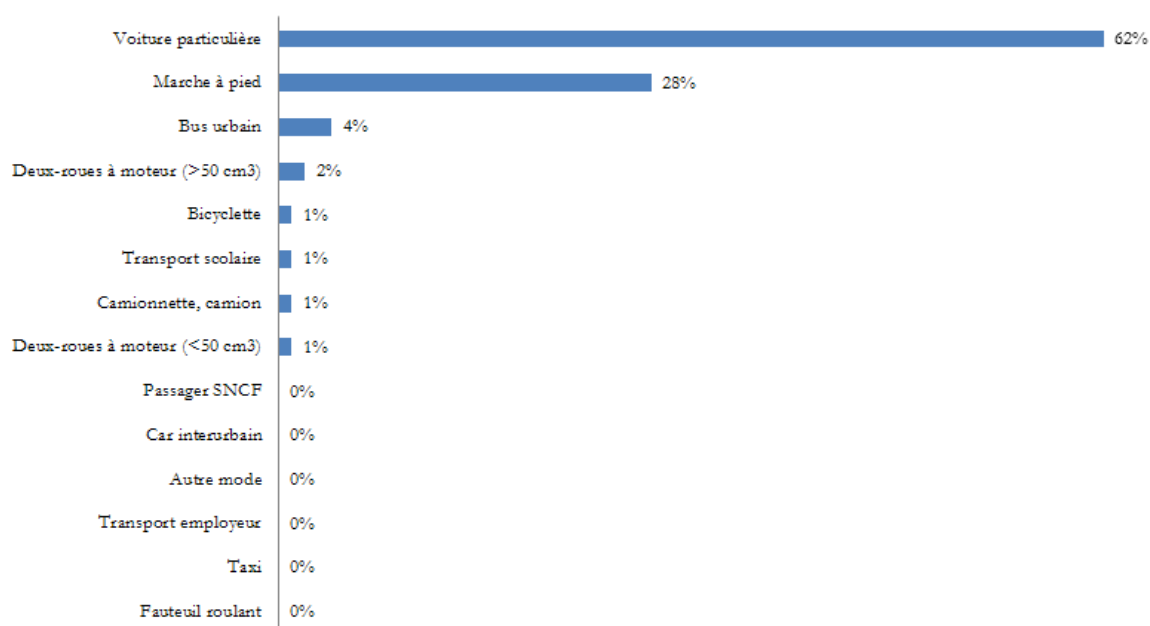


Figure 66 : répartition modale à Toulon (en part de déplacements)

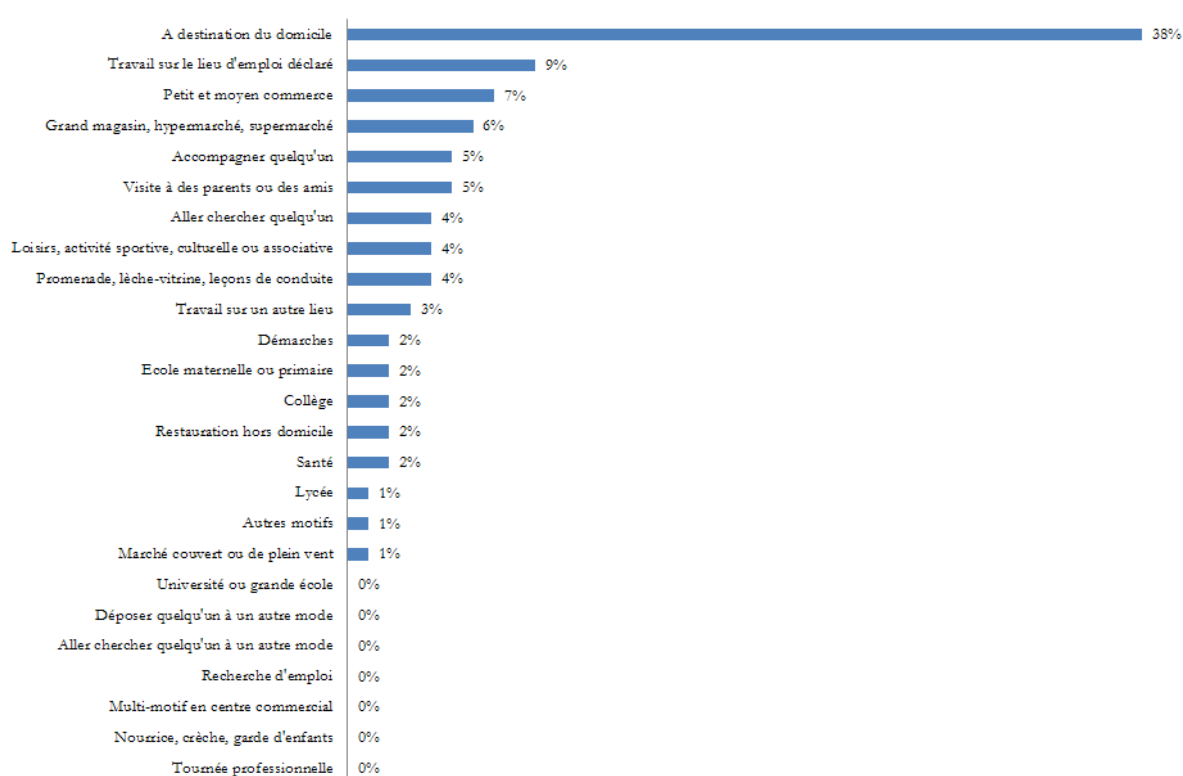


Figure 67 : répartition des déplacements selon le motif à Toulon

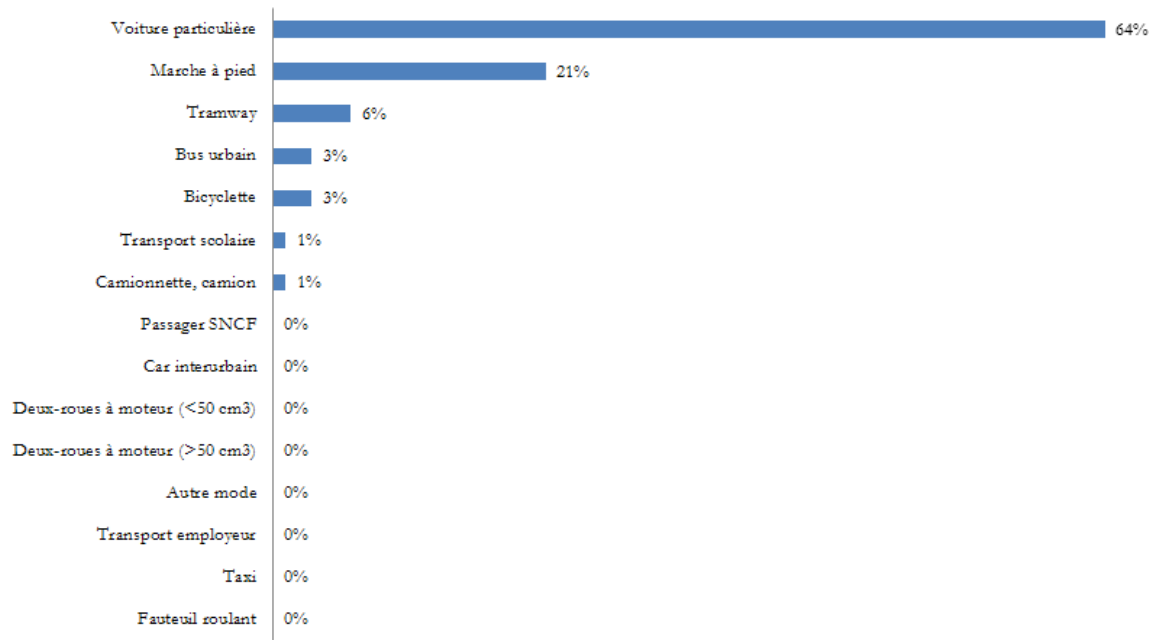


Figure 68 : répartition modale à Bordeaux (en part de déplacements)

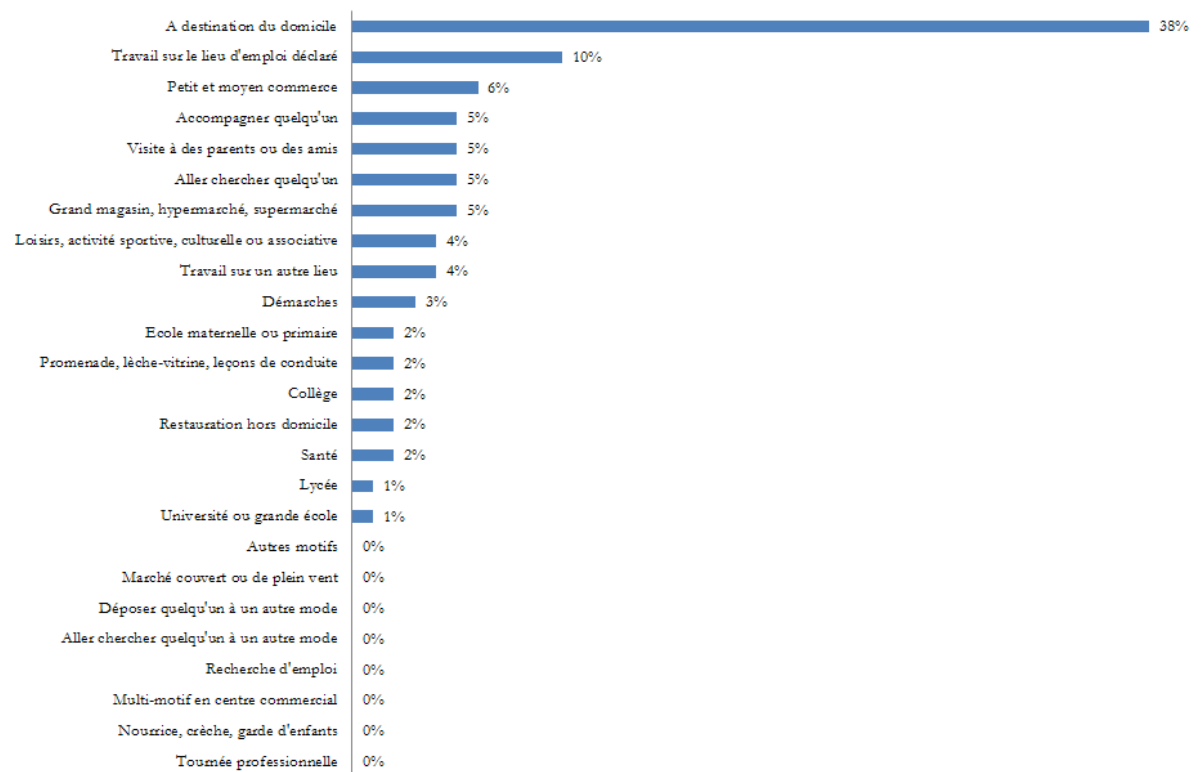


Figure 69 : répartition des déplacements selon le motif à Bordeaux

Annexe 10 : Valorisation des travaux

Publications

- S. Le Féon*, N. Gondran, V. Laforest, D. Le Boulch. Global warming impact assessment of urban mobility using motivation trip perspective – a case study of Saint-Etienne, France. *International Journal of Environmental Sciences and Engineering Research*, IJESER Vol 3(3):86-101, 2012. ISSN: 0976-3708 (print)

Communications

- S. Le Féon*, N. Gondran, V. Laforest, D. Le Boulch. Methodology for multi-criteria analysis of urban mobility focused on trip motivations. *TAP2012 – 19th International Transport and Air Pollution Conference 2012*, November 2012, Thessaloniki, Greece
- S. Le Féon*, D. Le Boulch, V. Laforest, N. Gondran. Adapting life cycle assessment for multi-criteria analysis of complex systems: case study of urban mobility. *SETAC2012 – 6th World Congress/SETAC Europe – 22nd annual meeting*, May 2012, Berlin, Germany
- S. Le Féon. Evaluation environnementale de la mobilité des grandes aires urbaines en France – analyse de cycle de vie et besoins de mobilité. *18ème séminaire du réseau de chercheurs EcoSD*, Juin 2013, Paris, France