HAL
open science

Évaluation environnementale stratégique de la mobilité quotidienne des personnes d'une aire urbaine : couplage entre Modèle Transport-Urbanisme et Analyse de Cycle de Vie

Cyrille Francois

To cite this version:

Cyrille Francois. Évaluation environnementale stratégique de la mobilité quotidienne des personnes d'une aire urbaine : couplage entre Modèle Transport-Urbanisme et Analyse de Cycle de Vie. Géographie. Université de Lyon, 2019. Français. NNT : 2019LYSET002 . tel-02141258

HAL Id: tel-02141258

https://theses.hal.science/tel-02141258v1

Submitted on 27 May 2019

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

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

N°d'ordre NNT : 2019LYSET002

THESE de DOCTORAT DE L'UNIVERSITE DE LYON
opérée au sein de
L'École Nationale de Travaux Publics de l'État

Ecole Doctorale Sciences Sociales 483

Géographie, Aménagement, Urbanisme

Soutenue publiquement le 02/04/2019, par :
Cyrille FRANÇOIS

Évaluation Environnementale Stratégique de la mobilité quotidienne des personnes d'une aire urbaine :
Couplage entre modèle Transport-Urbanisme et Analyse de Cycle de Vie

Devant le jury composé de :

Mme PAULHIAC Florence, professeure, Université du Québec à Montréal, Présidente
M. ANTONI Jean-Philippe, professeur, Université de Bourgogne Franche-Comté, Rapporteur
Mme FERAILLE-FRESNET Adélaïde, chercheure, ENPC, Rapporteure
M. ANDRE Michel, directeur de recherche, IFSTTAR, Examinateur
M. BOUTAUD Aurélien, chercheur associé à l'UMR 5600 EVS, Membre invité

Mme GONDRAN Natacha, maître assistante, ENMSE, Co-Directrice de thèse
M. NICOLAS Jean-Pierre, chargé de recherche, CNRS, Université de Lyon, Co-Directeur de thèse

« Tu connaîtras la vérité, et la vérité t'accordera la liberté. » Je me souviens du frisson glacé que cette simple phrase suffisait autrefois à me faire éprouver. J'ai ensuite dû déchanter et apprendre que la vérité n'était pas une donnée simple et évidente qu'on pouvait « connaître », mais un ensemble complexe et toujours provisoire de faits, de probabilités, d'équilibres, qu'elle était forcément hypothétique même quand elle semblait tomber sous le sens – comme la science, je suppose. Nous nous en approchons au fil des ans, mais sans jamais vraiment l'atteindre. (Doit-on en conclure que notre liberté aussi est soumise à condition ?)

ERNEST CALLENBACH, (1975), *Écotopia*, (traduit de l'anglais par Brice Matthieussent), p221

Remerciements :

Merci à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin au bon déroulement de cette aventure doctorale jonchée de moments de joies et de doutes. Grâce à vos soutiens et aux moments partagés, ces années de thèse, souvent décrites comme difficiles, se sont révélées belles et épanouissantes.

Un grand merci à Jean-Pierre et Natacha qui ont formé un duo d'encadrants stimulant, réconfortant et exigeant. Votre divergence disciplinaire a permis d'enrichir grandement ce travail de thèse et votre concordance scientifique et éthique d'en faire un ensemble cohérent. Vous avez été d'une grande disponibilité, vos relectures et vos conseils m'ont été précieux. Et merci de m'avoir soutenu et écouté dans mes différentes propositions de travail.

Merci à Adélaïde Feraille-Fresnet et Jean-Philippe Antoni d'avoir accepté de lire et de rapporter mon travail de thèse ainsi que Florence Paulhiac et Michel André pour leur présence dans mon jury.

Merci à la Région Auvergne Rhône-Alpes d'avoir financé cette thèse. Merci également l'ENTPE de m'avoir accueilli dans son établissement. Merci également au LAET et l'ensemble de ces membres avec qui j'ai pu échanger tout au long de cette thèse. Merci aux Mines de Saint-Étienne et plus particulièrement l'équipe EVS avec qui j'ai continué d'échanger après mon travail de master qui fut le point de départ de cette thèse.

Merci aux chercheurs du LAET qui prennent soin de leurs apprentis chercheurs et qui m'ont encouragé tout au long du doctorat. Merci Nathalie qui partageait mon bureau pour toutes les discussions personnelles et scientifiques que nous avons eu. Un immense merci à l'ensemble des doctorants et post-doctorants du laboratoire qui a été (et restera) un groupe soudé avec qui j'ai partagé de bons moments au sein et en dehors de l'ENTPE.

Un infini merci à Nicolas, qui fut mon compère à la fois comique et scientifique dans cette thèse. Merci pour tes encouragements et ton soutien pour la thèse, mais aussi pour ce qui ne relève pas de la thèse. Finalement, entre deux mauvaises blagues nous avons réussi à faire nos thèses.

Un grand merci à mes amis Salomé, Justin, Vava, Nini, Ambroise, Adrien, Kévin, Antoine, Ben, Dounia, Simon, Laurianne, Marion, Candice, Adrien qui m'ont soutenu tout au long de mon cursus scolaire, de la maternelle à la thèse, et qui ont su rester présents. Un très grand merci à tous mes colocs passés et présents et surtout à Candice et Mélody avec qui je partage plus qu'un appartement et des tâches ménagères.

Des énormes bisous de remerciement à mes parents qui m'ont inculqué la majorité des valeurs qui me caractérisent et qui m'ont toujours soutenu dans mes choix. Merci aussi à mes frères, ma sœur et mes belles-sœurs qui m'encouragent même de l'autre bout du monde. Et enfin, merci à ma petite nièce qui vient de montrer son petit bout du nez et qui me remplit déjà de bonheur.

Résumé :

Cette thèse a pour objectif de développer une méthodologie d'évaluation environnementale de la mobilité quotidienne des personnes en prenant en compte ses dimensions sociales et spatiales mais également technologiques. La circulation des personnes, comme celle des marchandises, s'est énormément développée ces dernières décennies. L'automobile s'est imposée comme le mode de transport dominant, alimentant de nombreuses controverses du fait de son impact sur l'environnement ainsi que sur l'aménagement du territoire, les modes de vie, l'économie … L'évaluation environnementale de la mobilité quotidienne de personnes nécessite donc une approche intégrée représentant le système de transport, mais aussi le système urbain dans lequel elle s'insère.

Pour ce faire, cette thèse propose une méthodologie reposant sur deux outils développés dans deux champs disciplinaires distincts, l'aménagement du territoire et les sciences de l'environnement, avec la modélisation des interactions transport-urbanisme et l'Analyse du Cycle de Vie. Couplés, ces outils permettent de représenter l'ensemble des processus technologiques impliqués pour la mobilité quotidienne ainsi que les différentes interactions entre les acteurs et les territoires.

Tout au long de cette thèse, le cadre d'évaluation adopté est stratégique, s'intéressant aux mobilités réalisées au sein d'un territoire étendu à travers des indicateurs environnementaux globaux et locaux ainsi qu'aux différentes alternatives envisageables à moyen et long termes. La deuxième partie de la thèse met en œuvre la méthode SIMBAD-ACV, reposant sur le couplage entre un modèle LUTI existant, SIMBAD, et une ACV pour évaluer les impacts environnementaux de la mobilité quotidienne des habitants de l'aire urbaine de Lyon. Cette application a pour but d'illustrer la capacité d'analyse de la méthodologie à travers, d'une part, une approche multicritère et désagrégée au niveau des ménages et des territoires et, d'autre part, en estimant les impacts de scénarios contrastés représentant des alternatives variées. Finalement, grâce à la méthode SIMBAD-ACV, les effets sur les impacts environnementaux associés à la mobilité des paramètres technologiques, de la forme urbaine et des caractéristiques socio-économiques ont pu être comparés et discutés.

Abstract :

By considering social, spatial and technological dimensions of people's daily mobility, this thesis aims to develop an original environmental assessment method. In the recent years, passenger travel, as well as freight transportation, have grown significantly. Car is now the predominant mode of passenger transport and its impacts on environment, land-use planning, lifestyle and economy are well documented and at the centre of heated academic and political debates. The environmental assessment of peoples' daily mobility requires an integrated approach to account for the transport system, but also the urban system in which it operates.

In order to achieve this, this thesis introduces a method coupling two tools developed in two distinct scientific fields - land-use planning and environmental sciences: on the one hand, Land-Use and Transport Interaction models (LUTI) and, on the other hand, Life Cycle Assessment (LCA) methods. Together, these tools can account for both technological processes involved in daily mobility, as well as interactions among stakeholders and territories.

Throughout this thesis, the chosen evaluation framework is a strategic one, meaning that mobility is assessed through global and local environmental indicators on a large territory for medium and long-term alternatives. We describe the global context and the general approach in the first section of the thesis. The second part describes the SIMBAD-LCA method, which involves the integration of the LUTI model SIMBAD with a LCA method, in order to assess environmental impacts of the daily mobility of inhabitants in the Lyon urban area. The third part aims to illustrate the evaluation capability of the method in two steps. First, through a multicriteria assessment executed on disaggregated objects such as households and territories. Then, contrasted scenarios are built to assess broad and diversified alternatives. Finally, using the SIMBAD-LCA method, effects of technological, urban form and socio-economic parameters on environmental impacts associated with daily mobility are compared and discussed.

Table des Matières :

Remerciements : iii

Résumé : vi

Abstract : vii

Table des Matières : viii

Liste des Figures : xiii

Liste des Tableaux : xx

Liste des Abréviations : xxiii

Introduction générale : 1

Chapitre I : La mobilité quotidienne dans son environnement naturel et urbain 7

Partie 1 : Les impacts environnementaux du système de transport 9

1.1. Les enjeux environnementaux du secteur des transports 10

1.2. Élargissement du périmètre d'analyse environnementale 28

1.3. Mesures et modélisation des mécanismes d'impacts des transports 37

Conclusion de la partie 1 48

Partie 2 : La mobilité quotidienne au cœur de l'aménagement du territoire 49

2.1. Une notion polysémique pour une approche systémique 50

2.2. Les mécanismes de la mobilité quotidienne de personnes 55

Conclusion de la partie 2 72

Synthèse et question de recherche 74

Question et hypothèses de recherche 75

Chapitre II : Démarche d'une Évaluation Environnementale Stratégique de la mobilité 77

Partie 1 : Évaluation Environnementale Stratégique de la mobilité d'une Aire Urbaine 79

1.1. Différentes démarches d'évaluation environnementale de politique publique 79

1.2. L'Évaluation Environnementale Stratégique (ÉES) 85

1.3. L'aire urbaine comme échelle territoriale d'évaluation 92

1.4. Retour sur la problématique : intégrer la dimension stratégique 96

Partie 2 : Modèle d'interactions transport-urbanisme 98

2.1. Principes des modèles transport-urbanisme 98

2.2. Différenciation des modèles LUTI 100

2.3. Exemples de modèles LUTI 103

2.4. Limites des modèles LUTI 105

Conclusion de la partie 2 : 108

Partie 3 : L'Analyse de Cycle de Vie (ACV) 109

3.1. Principes généraux de l'ACV : 109

3.2. ACV-Prospective : 119

3.3. ACV spatialisée et territorialisée : 126

Conclusion de la partie 3 : 131

Synthèse du chapitre II : 132

Chapitre III : La méthode SIMBAD-ACV 133

Partie 1 : Description générale de la méthode SIMBAD-ACV 135

1.1. Couplage entre modèle transport-urbanisme et ACV 135

1.2. Un cas d'étude lyonnais 140

Partie 2 : Le modèle LUTI – SIMBAD 150

2.1. Fonctionnement général de SIMBAD 150

2.2. Un modèle désagrégé 164

Conclusion de la partie 2 : 172

Partie 3 : Le cadre d'ACV 174

3.1. Définition des objectifs et du champ d'études 174

3.2. Inventaire du cycle de vie 181

3.3. Hypothèses utilisées pour la prospective 194

3.4. Méthode d'évaluation des impacts environnementaux 201

Conclusion de la partie 3 : 211

Synthèse du chapitre III : 212

Chapitre IV : Enjeux multiples – lectures multiples 215

Partie 1 : Analyse du système de transport et de ses processus technologiques 217

1.1. Analyse du sous-système de transport en commun et de ses usages 218

1.2. Analyse du sous-système de transport individuel motorisé et des déplacements afférents 227

1.3. Analyse du système de transport Lyonnais 237

Conclusion de la partie 1 : 245

Partie 2 : Les déterminants socio-économiques des impacts environnementaux des ménages 247

2.1. Analyse par variables socio-économiques des ménages 248

2.2. Analyse par types de ménages 255

2.3. Analyse par motifs de déplacements 262

Conclusion de la partie 2 : 266

Partie 3 : Analyse spatiale des impacts environnementaux 267

3.1. Localisation des émetteurs, deux approches possibles 267

3.2. Spatialisation et évaluation des pratiques de mobilité quotidienne 275

3.3. Évaluation environnementale au regard des formes urbaines 280

3.4. Exposition de la population aux émissions de NOx 292

Conclusion de la partie 3 : 301

Synthèse du chapitre IV : 303

Intérêts méthodologiques et complémentarité des outils utilisés : 303

Analyse environnementale de la mobilité quotidienne et validation des résultats obtenus : 305

Chapitre V : Analyse exploratoire et prospective de la mobilité quotidienne des personnes 307

Partie 1 : Présentation et construction des scénarios 310

1.1. Méthode des scénarios par une vision stratégique et prospective 310

1.2. Localisation et évolution des acteurs 312

1.3. Comportements de mobilité 321

1.4. Caractéristiques des réseaux et de l'offre de transport 324

1.5. Amélioration du système technologique 328

Conclusion de la partie 1 : 339

Partie 2 : Analyse des résultats des scénarios 341

2.1. Analyse globale des impacts environnementaux 341

2.2. Analyses des mécanismes d'impacts environnementaux de la mobilité quotidienne 346

2.3. Exposition de la population au NOx 358

Conclusion de la partie 2 : 364

Partie 3 : Enseignements et proposition du scénario « mobilité verte » 366

3.1. Hypothèses de construction du scénario « mobilité verte » 366

3.2. Analyse du scénario « mobilité verte » 376

Conclusion de la partie 3 : 390

Synthèse du chapitre V : 391

Intérêts méthodologiques 391

Enseignements sur les impacts environnementaux de la mobilité 393

Chapitre VI : Discussion, apports, limites et perspectives **395**

Partie 1 : Apports du travail de thèse 397

1.1. Développements méthodologiques 398

1.2. Discussion générale sur les enjeux environnementaux de la mobilité 405

Partie 2 : Limites du travail de thèse 408

Partie 3 : Perspectives 412

Conclusion générale : 416

Bibliographie : **421**

Annexes : **453**

Liste des Figures :

Figure I-1 : Émissions atmosphériques de gaz à effet de serre par secteurs en France métropolitaine (en Mt CO2eq) 13

Figure I-2 : Schéma de la chaine d'impact du système des transports sur la santé humain 18

Figure I-3 : Évolution des émissions européennes (EU28) de SO2 et NOx (base 100 en 1990) 23

Figure I-4 : Schéma des différents périmètres d'étude environnementaux pour la mobilité 29

Figure I-5 : Évolution des caractéristiques techniques du parc automobile neuf en Europe 35

Figure I-6 : Schéma des mécanismes d'impacts des polluants atmosphériques des transports sous la forme du modèle FPEIR 38

Figure I-7 : Classification des modèles d'émissions en fonction de l'échelle d'étude et de la façon de prendre en compte l'état de trafic 44

Figure I-8 : Concentration moyenne annuelle de NO2 pour la région Auvergne Rhône-Alpes en 2017 47

Figure I-9 : Représentation du système urbain 58

Figure I-10 : Boucle de rétroaction usage du sol - système de transport 59

Figure I-11 : Densité et consommation individuelle d'énergie pour 46 villes (données 1990) 61

Figure II-1 : Schéma d'articulation entre l'élaboration du plan/schéma/programme et l'évaluation environnementale stratégique 86

Figure II-2 : Structure générale d'un modèle transport-urbanisme opérationnel 99

Figure II-3 : Processus de communication pour une meilleure intégration des modèles d'aides à la décision 106

Figure II-4 : Phases d'une ACV 111

Figure II-5 : Structure générale du cadre d'analyse d'impact du cycle de vie 115

Figure III-1 : Schéma du couplage entre le modèle LUTI et l'ACV 138

Figure III-2 : Découpages de l'aire urbaine de Lyon (2010 et 1999) 141

Figure III-3 : Espaces d'action de documents de planification 143

Figure III-4 : Concentration de la population dans l'aire urbaine de Lyon en 2009 145

Figure III-5 : Concentration de l'emploi total dans l'aire urbaine de Lyon en 2009 146

Figure III-6 : Découpage de l'aire urbaine en quatre types 147

Figure III-7 : Réseau de transport en commun de l'aire urbaine de Lyon, hors cars interurbains 149

Figure III-8 : Schéma de fonctionnement du modèle SIMBAD 152

Figure III-9 : Répartition des déplacements au cours de la journée dans les enquêtes ménages lyonnaises 161

Figure III-10 : Courbes débit-vitesse appliquées dans SIMBAD en fonction du type de tronçons 162

Figure III-11 : Articulation des modules et logiciels de la plateforme SIMBAD 164

Figure III-12 : Vitesses maximales du réseau de voirie lyonnais 170

Figure III-13 : Schéma des éléments inclus dans le système technologique de l'ACV 176

Figure III-14 : Répartition du parc automobile roulant de 2015 de l'aire urbaine de Lyon en fonction de la motorisation 179

Figure III-15 : Composition du parc roulant de bus du réseau TCL 2016, répartition par norme Euro et par motorisation et taille 181

Figure III-16 : Schéma des processus liés au cycle de vie des infrastructures 182

Figure III-17 : Schéma des processus liés au cycle de vie des véhicules 184

Figure III-18 : Émission unitaire de CO2 d'un véhicule moyen du parc de Lyon 2015 en fonction de va vitesse 187

Figure III-19 : Profil d'émission de particules inférieures à 10 µm du parc automobile moyen de Lyon 188

Figure III-20 : Profils d'émissions de NOx des 9 parcs automobiles (localisation/revenu) en fonction de la vitesse de circulation 189

Figure III-21 : Schéma des processus et flux liés à la mise en mouvement des véhicules 191

Figure III-22 : Schéma global du système technologique utilisé pour l'Analyse de Cycle de Vie 193

Figure III-23 : Schéma du système d'ACV dans le cas d'une électrification du parc automobile 197

Figure III-24 : Schéma du système d'ACV de las cas d'une introduction de véhicules à gaz naturel 199

Figure III-25 Schéma global du système d'ACV et du système transport-urbanisme 200

Figure III-26 : Représentation des trois principaux chemins entre le quartier de la Part-Dieu de Lyon et la commune de Crémieu 209

Figure IV-1 : Répartition du système de transport en commun de 2015 entre les différents modes 219

Figure IV-2 : Distribution du système de transport en commun de 2015 entre le centre et le reste de l'aire urbaine de Lyon 220

Figure IV-3 : Indicateur PTAL pour l'accessibilité aux transports en commun de l'aire urbaine de Lyon en 2015 221

Figure IV-4 : Émissions de GES par véhicule.kilomètre du système de transport en commun et de chacun de ses modes 222

Figure IV-5 : Contribution de chaque mode et chaque phase du cycle de vie à la performance environnementale des transports en commun 224

Figure IV-6 : Poids des neuf parcs automobiles de l'aire urbaine de Lyon (localisation et niveau de revenu) 228

Figure IV-7 : Variations des impacts environnementaux par vkm en fonction de la zone de circulation (Centre, Grand Lyon, périphérie) 230

Figure IV-8 : Écarts-types relatifs des impacts de réchauffement climatique et de consommation d'énergie primaire en fonction de l'unité fonctionnelle 236

Figure IV-9 : Parts de marché des modes de transports principaux de l'aire urbaine de Lyon en 2009 238

Figure IV-10 : Choix modaux et distance parcourue des neuf catégories de ménages de l'aire urbaine de Lyon en 2009 239

Figure IV-11 : Impacts environnementaux de la mobilité quotidienne des personnes de l'aire urbaine de Lyon en 2009 240

Figure IV-12 : Diagramme des flux d'énergie de la mobilité quotidienne des personnes 243

Figure IV-13 : Matrice de corrélation des variables socio-économiques des ménages en 2009 252

Figure IV-14 : Poids démographique et contribution aux émissions de GES des différentes catégories de ménages 261

Figure IV-15 : Répartition par motifs des sorties de ménages, de la distance parcourue et des émissions de GES 262

Figure IV-16 : Profils d'activités en nombre de sorties et en distance par habitant des différentes catégories de ménages en 2009 263

Figure IV-17 : Niveaux d'émissions de GES à l'IRIS associés à la mobilité quotidienne des habitants de l'aire urbaine de Lyon en 2009 268

Figure IV-18 : Niveaux d'émissions de GES par habitant suivant le découpage en 20 zones de l'aire urbaine de Lyon 270

Figure IV-19 : Émissions de GES quotidiennes à l'IRIS liées aux lieux d'activités de l'aire urbaine de Lyon en 2009 273

Figure IV-20 : Contribution aux émissions totales de GES liées à chacune des 20 zones administratives, en fonction de l'origine et de la destination des sorties de résidence 274

Figure IV-21 : Parts modales moyennes des résidents des IRIS de l'aire urbaine de Lyon en 2009 276

Figure IV-22 : Comportements modaux au sein de l'aire urbaine de Lyon en 2009 277

Figure IV-23 : Répartition de la population et des émissions de GES par comportements modaux au sein des IRIS 279

Figure IV-24 : Émissions de GES en fonction de la densité de population des IRIS 281

Figure IV-25 : Émissions de GES en fonction de l'accessibilité isochrone à l'emploi des IRIS (15 minutes) 281

Figure IV-26 : Émissions de GES en fonction du temps d'accès au centre en voiture des IRIS 282

Figure IV-27 : Émissions moyenne de GES et comportement modal en fonction de l'accessibilité en transport en commun (PTAL) des IRIS 282

Figure IV-28 : Matrice de corrélation des variables socio-économiques et de forme urbaine en 2009 284

Figure IV-29 : Contribution de chaque décile de densité aux émissions totales de GES (5 640 tonnes de CO2-eq par jour) 289

Figure IV-30 : Quintiles de densité de population de l'aire urbaine de Lyon en 2009 (résolution 250m x 250m) 293

Figure IV-31 : Quintiles d'émissions directes de NOx de l'aire urbaine de Lyon en 2009 (résolution 250m x 250m) 294

Figure IV-32 : Score d'exposition de la population aux NOx liées à la mobilité quotidienne des personnes 296

Figure IV-33 : Score d'exposition de la population aux émissions NOx des transports quotidiens de personnes suivant le découpage en 20 zones de l'aire urbaine de Lyon 299

Figure V-1 : Relocalisation des logements par IRIS pour le scénario de forme urbaine étalée par rapport au scénario de référence 315

Figure V-2 : Relocalisation des logements par IRIS pour le scénario de forme urbaine compacte par rapport au scénario de référence 316

Figure V-3 : Relocalisation des logements par IRIS pour le scénario de forme urbaine polycentrique par rapport au scénario de référence 317

Figure V-4 : Distributions cumulées des logements de l'aire urbaine de Lyon en fonction de la distance au centre des scénarios réalisés 318

Figure V-5 : Taille et composition des populations de l'aire urbaine de Lyon en 1999, 2009 et pour les deux scénarios réalisés 320

Figure V-6 : Distribution des déplacements du scénario de référence en fonction des trois modes principaux et de la distance 322

Figure V-7 : Temps de déplacement en voiture et en transports en commun en fonction de la distance 325

Figure V-8 : Flux de déplacements de l'aire urbaine de Lyon dans le scénario de référence 326

Figure V-9 : Modifications apportées au réseau de voirie pour le scénario « Zone 30 km/h » 327

Figure V-10 : Hypothèse d'évolutions du parc et des ventes de véhicules à motorisation alternative en fonction du revenu des ménages 331

Figure V-11 : Constitution par énergies du parc automobile roulant de référence et des parcs de motorisation alternative à l'horizon 2030 _____ 332

Figure V-12 : Parcs automobiles par classes de ménages pour les scénarios de motorisations alternatives à l'horizon 2030 _____ 333

Figure V-13 : Mix énergétiques utilisés pour la production électrique de référence et du scénario « 2030 » _____ 335

Figure V-14 : Mix énergétique pour la production d'électricité renouvelable _____ 336

Figure V-15 : Bilan carbone de la production de gaz naturel et de biométhane _____ 338

Figure V-16 : Impacts environnementaux par habitant des scénarios par rapport à la situation de référence _____ 342

Figure V-17 : Impacts environnementaux par pkm par rapport à la situation de référence _____ 348

Figure V-18 : Émissions de GES par habitant par jour en fonction du niveau de revenu des différents scénarios et _____ 351

Figure V-19 : Répartition démographique par pratiques modales des IRIS des différents scénarios _____ 352

Figure V-20 : Répartition des émissions totales de GES de l'aire urbaine de Lyon par pratiques modales des IRIS des différents scénarios _____ 353

Figure V-21 : Émissions de GES par habitant pour les scénarios de formes urbaines étalée et compacte et de « potentiel vélo » par rapport à la situation de référence _____ 355

Figure V-22 : Scores d'exposition de la population aux émissions directes de NOx associées à la mobilité quotidienne par rapport à la situation de référence _____ 358

Figure V-23 : Scores d'exposition du scénario de forme urbaine compacte par rapport à la situation de référence _____ 361

Figure V-24 : Scores d'exposition du scénario de « potentiel vélo » par rapport à la situation de référence _____ 361

Figure V-25 : Scores d'exposition du scénario d'électrification du parc automobile par rapport à la situation de référence _____ 362

Figure V-26 : Création et relocalisation des logements par IRIS du scénario « mobilité verte » par rapport à la situation de référence _____ 369

Figure V-27 : Création et relocalisation des emplois par IRIS du scénario « mobilité verte » par rapport à la situation de référence 370

Figure V-28 : Part modale des modes doux en fonction de la distance d'un déplacement domicile-travail d'une zone urbaine dans SIMBAD 371

Figure V-29 : Répartition par carburation du parc automobile simulé 373

Figure V-30 : Impacts environnementaux par habitant pour le scénario « mobilité verte » 377

Figure V-31 : Diagramme des flux d'énergie de la mobilité quotidienne des personnes dans le scénario « mobilité verte » 379

Figure V-32 : Comportement modal des IRIS de l'aire urbaine de Lyon pour le scénario « mobilité verte » 383

Figure V-33 : Répartition démographique et des émissions de GES par comportement modal pour l'ensemble de l'aire urbaine de Lyon 384

Figure V-34 : Niveaux d'émissions de GES par habitant associés aux IRIS pour le scénario « mobilité verte » 385

Figure V-35 : Score d'exposition de la population aux NOx liées à la mobilité quotidienne des personnes du scénario « mobilité verte » 388

Figure VI-1 : Étapes de la désagrégation des impacts environnementaux 399

Liste des Tableaux :

Tableau I-1 : Potentiel de Réchauffement Global (PRG) du CO_2, CH_4 et N_2O _____ 11

Tableau I-2 : Valeurs cibles et seuils d'information et d'alerte de concentration de polluants _____ 15

Tableau I-3 : Synthèse des cibles, des échelles spatiales et temporelles des enjeux environnementaux des transports _____ 25

Tableau II-1 : Récapitulatif des principaux types d'évaluation _____ 81

Tableau II-2 : Caractéristiques principales des modèles MEPLAN, TRANUS, DELTA et URBANSIM _____ 104

Tableau III-1 : Répartition de la population de l'aire urbaine de Lyon _____ 141

Tableau III-2 : Principaux attributs des ménages dans SIMBAD _____ 165

Tableau III-3 : Principaux attributs des établissements dans SIMBAD _____ 166

Tableau III-4 : Principaux attributs des IRIS dans SIMBAD _____ 167

Tableau III-5 : Principaux attributs des sorties dans SIMBAD _____ 168

Tableau III-6 : Principaux attributs des tronçons dans SIMBAD _____ 169

Tableau III-7 : Répartition des tronçons du réseau de transport par type principal ___ 171

Tableau III-8 : Répartition des tronçons de voirie par vitesse à vide _____ 171

Tableau III-9 : Conversion de la puissance fiscale en taille de véhicule _____ 179

Tableau III-10 : Catégories d'impacts environnementaux considérées et méthodes d'évaluation appliquées _____ 205

Tableau III-11 : Matrice des scores d'exposition en fonction des niveaux de densités de population et d'émissions de NOx _____ 208

Tableau IV-1 : Impacts environnementaux du système de transport en commun par habitant par jour _____ 223

Tableau IV-2 : Émissions de GES de chaque mode de transport en commun par vkm, pko et pkm _____ 225

Tableau IV-3 : Impacts environnementaux du système de transport en commun pour différentes unités fonctionnelles _____ 226

Tableau IV-4 : Impacts environnementaux du système de transport individuel par vkm 229

Tableau IV-5 : Impacts environnementaux d'un vkm en heures pleines et creuses 231

Tableau IV-6 : Impacts environnementaux des différents parcs automobiles 235

Tableau IV-7 : Variables de mobilité en fonction des différents paramètres socio-économiques des ménages en 2009 249

Tableau IV-8 : Impacts environnementaux en fonction des différents paramètres socio-économiques des ménages en 2009 254

Tableau IV-9 : Variables socio-économiques et de mobilité des différentes catégories de ménages en 2009 257

Tableau IV-10 : Impacts environnementaux des différentes catégories de ménages en 2009 259

Tableau IV-11 : Variables de mobilité liées aux motifs de sorties en 2009 dans l'aire urbaine de Lyon 264

Tableau IV-12 : Impacts environnementaux de la mobilité quotidienne par habitant répartie par motifs 265

Tableau IV-13 : Impacts environnementaux des habitants suivant le découpage en 20 zones 271

Tableau IV-14 : Impacts environnementaux des différents comportements de mobilité de l'aire urbaine de Lyon 278

Tableau IV-15 : Variables socio-économiques et de mobilité de 10 niveaux de densité en 2009 286

Tableau IV-16 : Impacts environnementaux des déciles de densité des IRIS de l'Aire Urbaine de Lyon 288

Tableau IV-17 : Répartitions démographiques de chaque catégorie de ménages entre les différents déciles de densité 290

Tableau IV-18 : Émissions de GES par habitant en fonction des catégories de ménages et du décile de densité 291

Tableau IV-19 : Quintiles de densités de population et d'émissions de NOx utilisées pour le calcul d'exposition 295

Tableau IV-20 : Répartition démographique en fonction du score d'exposition de la population aux NOx 297

Tableau V-1 : Seuils de distance et potentiel de la pratique du vélo par motifs de l'aire urbaine de Lyon 323

Tableau V-2 : Synthèse des scénarios de mobilité quotidienne de personnes 340

Tableau V-3 : Émissions de GES par habitant par jour, par sortie et par pkm en fonction des scénarios 347

Tableau V-4 : Émissions de GES pour la mobilité quotidienne d'un habitant en fonction des scénarios et des types de ménages 349

Tableau V-5 : Répartition de la population des différents scénarios par décile de densité 356

Tableau V-6 : Émissions de GES par habitant par décile de densité et par scénario par rapport à la situation de référence 356

Tableau V-7 : Scores d'exposition de la population de l'aire urbaine de Lyon par revenu et par zones de résidence 360

Tableau V-8 : Distances des logements du scénario « mobilité verte » par rapport au centre et distance moyenne entre deux logements 369

Tableau V-9 : Hypothèses retenues pour le scénario « mobilité verte » 375

Tableau V-10 : Émissions de GES et consommation d'énergie primaire des véhicules personnels en fonction de différentes unités fonctionnelles 381

Tableau V-11 : Émissions de GES par habitant en fonction des catégories de ménages et du décile de densité des IRIS de résidence pour le scénario « mobilité verte » 386

Tableau V-12 : Comparaison des scores d'exposition aux NOx en fonction du revenu et de la localisation de la population 389

Liste des Abréviations :

AASQA	Association Agrée de Surveillance de la Qualité de l'Air
ACV	Analyse de Cycle de Vie
ACV-A/C/P	Analyse de Cycle de Vie Attributionnelle/Conséquentielle/Prospective
ACCV	Analyse des Coûts du Cycle de Vie
ADCV	Analyse de la Durabilité du Cycle de Vie
ASCV	Analyse Sociale du Cycle de Vie
CAS	Changement d'Affectation du Sol
COV	Composés Organiques Volatiles
DEEM	Diagnostic Énergie Émissions des Mobilités
ÉES	Évaluation Environnementale Stratégique
ÉIE	Évaluation des Impacts sur l'Environnement
EMD	Enquête Ménages Déplacements
ENTD	Enquête Nationale Transports et Déplacements
EPCI	Établissement Public de Coopération Intercommunale
FPEIR	Forces motrices – Pressions – État – Impact - Réponse
GES	Gaz à Effet de Serre
IRIS	Îlot Regroupés pour l'Information Statistique
LUTI	Land-Use and Transport Interaction / modèle d'interaction transport-urbanisme
MFA (AFM)	Analyse des Flux de Matières
OMS	Organisation Mondiale de la Santé
OPECST	Office Parlementaire d'Évaluation des Choix Scientifiques et Technologiques
PCAET	Plan Climat Air Energie Territorial
PDU	Plan de Déplacements Urbains
PKM	passenger-kilomètres
PKO	places-kilomètres offertes
PLU	Plan Local d'Urbanisme
POS	Plans d'Occupations des Sols
PPA	Plan de Protection de l'Atmosphère
PPP	Politiques, Plans et Programmes
PRG	Potentiel de Réchauffement Global
PRQA	Plan Régional pour la Qualité de l'Air
PTAL	Public Transport Access Level (Transport for London, 2015)
SCOT	Schéma de Cohérence Territoriale
SRADDET	Schéma Régional d'Aménagement, de Développement Durable et d'Égalité des Territoires
SRADDT	Schéma Régional d'Aménagement et de Développement Durable du Territoire
SRDEII	Schéma régional de développement économique d'innovation et d'internationalisation
TC	Transport en Commun
TOD	Transit-Oriented Development
VKM	véhicule-kilomètres
VP	Véhicule Personnel

Introduction générale :

Le système de transport constitue un moteur central du développement des villes et des sociétés en permettant les interactions sociales et économiques qui leur sont nécessaires. Avec l'importante croissance démographique urbaine et la transformation profonde des modes de transports de ces dernières années, la circulation urbaine des personnes et des marchandises a explosé. Un des enjeux actuels de la recherche en aménagement et urbanisme est donc de mieux comprendre et représenter la mobilité urbaine afin de mieux l'intégrer dans la planification et les projets urbains. Si l'ensemble des modifications de la société et de la ville contribuent à la transformation de la mobilité, le développement et la diffusion de la voiture constituent surement une des plus importantes ruptures sociétales, économiques, environnementales et sociales en allongeant les distances parcourues, favorisant l'étalement urbain, exploitant les énergies fossiles et impactant l'ensemble des éléments de l'environnement (Dupuy, 1999a; Orfeuil, 2000).

Ainsi, le secteur des transports, dominé par le transport routier, est aujourd'hui au cœur des débats environnementaux aux échelles globale et locale. Premier secteur émetteur de gaz à effet de serre (GES) en France avec 33% de contribution en 2015[1], les transports peinent à réduire leurs impacts sur le climat contrairement à la majorité des autres secteurs économiques, et ceci malgré une baisse des émissions unitaires pour le transport de marchandises et de personnes, avec respectivement -22% et -18% entre 1990 et 2013 (SOeS - MEEM, 2016). Les transports sont aussi source d'autres émissions de polluants atmosphériques dont les conséquences sur la santé humaine et l'environnement sont aujourd'hui de plus en plus suivies notamment grâce aux différents organismes de surveillance de la qualité de l'air (AASQA). Les inventaires d'émissions de polluants révèlent qu'au niveau français 56% des oxydes d'azotes (NOx) émis en 2015 proviennent des véhicules routiers[2], mais aussi qu'au niveau local d'une agglomération urbaine, une partie importante des émissions de particules fines résultent de la circulation des véhicules. Sur l'agglomération de Lyon de 2007, 39% des particules fines ($PM_{2,5}$) proviennent des transports (DREAL Rhône-Alpes, 2014).

[1] https://www.citepa.org/fr/air-et-climat/polluants/effet-de-serre/potentiel-rechauffement-global-a-100-ans
[2] https://www.citepa.org/fr/air-et-climat/polluants/aep-item/oxydes-d-azote

Afin de comprendre les phénomènes de pollutions atmosphériques, de l'émission des polluants aux dommages causés sur l'environnement et sur l'Homme, de nombreuses méthodes et études ont été développées. Les systèmes de mesures des polluants au niveau des pots d'échappement des véhicules ou dans des stations de mesures atmosphériques se sont généralisés suite aux différentes règlementations européennes. Les progrès informatiques permettent la modélisation de plus en plus fine des phénomènes de dispersion des polluants et dans le même temps, les recherches cliniques alertent sur la nocivité des différents polluants pour la santé humaine. Les particules fines ($PM_{2,5}$) seraient ainsi à l'origine de la mort prématurée de 48 000 personnes par an en France sur la période 2007-2008, dont plus de la moitié dans les principales zones urbaines métropolitaines (Pascal *et al.*, 2016).

Cependant, les gaz d'échappement ne sont pas les seules sources d'externalités environnementales imputables aux transports. La production de carburants associés aux transports a aussi son lot d'impacts environnementaux avec de nombreuses émissions de polluants atmosphériques au niveau des exploitations pétrolières (puits d'extraction, raffineries), mais aussi des problèmes d'atteintes aux milieux naturels notamment avec les marées noires. La fabrication des véhicules est aussi source de pollution, en raison des activités industrielles qu'un véhicule nécessite, mais aussi des matériaux nocifs pour l'environnement ou rares qui le composent. Enfin, les routes contribuent à la détérioration de l'environnement du fait de leur construction, mais aussi en constituant une barrière physique au sein de certains espaces naturels. La détérioration de l'environnement ne se limite donc pas qu'aux conséquences des moteurs thermiques en fonctionnement, mais inclut l'ensemble des processus technologiques associés aux transports (Chester & Horvath, 2009; Le Féon, 2014).

Une partie de ces externalités environnementales qui peuvent être envisagées comme étant d'origine technologique découlent de la mobilité quotidienne des personnes, qui est est elle-même l'expression d'un système social plus vaste, avec des espaces variés remplissant des fonctions diverses (industrielle, commerciale, résidentielle, éducation, loisirs …) où interagissent l'ensemble des acteurs. Le suivi et l'étude de cette mobilité reposent aujourd'hui sur trois outils principaux, les comptages, les enquêtes de déplacements et la modélisation urbaine, qui fournissent soit une image de la mobilité à un temps précis, soit la considèrent dans son système urbain (Commenges, 2013). La mobilité quotidienne des personnes apparait alors comme un objet d'étude mouvant, dépendant d'aspects temporels, spatiaux, sociaux, économiques et fonctionnels (Stead & Marshall, 2001).

La problématique de l'évaluation environnementale de la mobilité quotidienne et urbaine des personnes apparait ainsi comme un problème complexe à l'interface d'évolutions technologiques, de phénomènes naturels, mais aussi de transformations sociales et économiques du système urbain. La recherche de solutions doit considérer le problème dans sa globalité en considérant les différents éléments constituant les systèmes technologiques, naturels et urbains dans une approche commune et intégrée.

L'objectif de cette thèse est de proposer une méthodologie d'évaluation environnementale de la mobilité quotidienne et urbaine des personnes permettant de prendre en compte simultanément la dynamique du système urbain et le cadre technologique des transports.

Pour rendre compte du travail réalisé, ce rapport de thèse s'articule autour de six chapitres :

I. La présentation des contextes environnementaux et urbains dans lesquels s'insère l'approche intégrée et interdisciplinaire mise en œuvre dans cette thèse ;

II. Une description de différents cadres d'évaluation environnementale de la mobilité quotidienne qui permettra de formuler la problématique d'évaluation environnementale de ce travail. La méthode centrale d'évaluation environnementale utilisée, l'Analyse du Cycle de Vie (ACV), sera présentée, au même titre que la modélisation d'interaction transport-urbanisme (modèle LUTI) qui permet de représenter la mobilité quotidienne.

III. Le développement de la méthodologie proposée, avec son terrain d'application, l'aire urbaine de Lyon. La méthode repose sur le couplage d'un modèle LUTI et d'une ACV dont les fonctionnements et les spécificités respectifs seront détaillés ;

IV. La mise en œuvre de la méthode à partir d'une situation réaliste de l'aire urbaine de Lyon pour laquelle différentes analyses seront réalisées afin de valider et d'illustrer la capacité d'évaluation de la méthode ;

V. La construction et l'évaluation de différents scénarios mettant en valeur l'aspect prospectif de la méthode proposée, tout en éclairant certains débats sur la mobilité de demain ;

VI. Une synthèse du travail réalisé, en présentant certaines de ses limites et ses perspectives.

Dans le premier chapitre, le contexte dans lequel évolue cette thèse sera présenté en s'intéressant à la fois aux enjeux environnementaux de la mobilité et des transports ainsi qu'aux enjeux urbains. Après avoir détaillé les principaux impacts environnementaux auxquels contribuent significativement les transports, l'intérêt de l'élargissement du périmètre d'étude environnemental sera exposé par le biais de la pensée en cycle de vie. Les méthodes de caractérisation des impacts liés aux polluants atmosphériques feront l'objet d'un éclairage particulier. Ensuite, une définition de la mobilité quotidienne sera formulée en tenant compte des différentes visions portées sur cet objet. La relation étroite entre la mobilité quotidienne et le système urbain éclairera enfin les principaux mécanismes à l'œuvre.

Le deuxième chapitre exposera différents types d'évaluation environnementale existant pour la mobilité quotidienne, et plus particulièrement l'Évaluation Environnementale Stratégique qui servira de cadre pour le travail de thèse. Après avoir présenté la problématique générale, le type de modélisation retenu pour représenter la mobilité quotidienne ainsi que la méthode d'évaluation environnementale utilisée seront détaillés séparément. Forte de plusieurs années de mise en application, la modélisation LUTI a été choisie pour représenter la mobilité et le système urbain associé. L'ACV, qui permet d'évaluer les impacts environnementaux d'un produit tout au long de son cycle de vie, permettra à l'évaluation d'inclure les phases d'émissions autres que les gaz d'échappement.

Lors du troisième chapitre, le couplage entre le modèle LUTI et l'ACV sera réalisé. Dans un premier temps, les interactions qui s'opèrent entre les deux outils seront exposées de façon théorique. Ensuite, ce cadre théorique sera mis en œuvre dans le cas de l'aire urbaine de Lyon dont les principales spécificités seront présentées. Pour cela, un modèle LUTI déjà existant, SIMBAD, a été utilisé répondant à une majorité des exigences d'une ÉES de la mobilité quotidienne des personnes. Le cadre d'ACV choisi permettra aussi de représenter et d'évaluer les principaux processus technologiques du système de transport de Lyon. Des développements complémentaires à l'ACV ont été réalisés pour affiner l'étude environnementale notamment avec l'utilisation du modèle d'émissions Copert, pour caractériser plus finement les émissions directes associées à la phase d'utilisation, et le développement d'une analyse d'exposition aux polluants. L'outil ainsi construit sera dénommé SIMBAD-ACV.

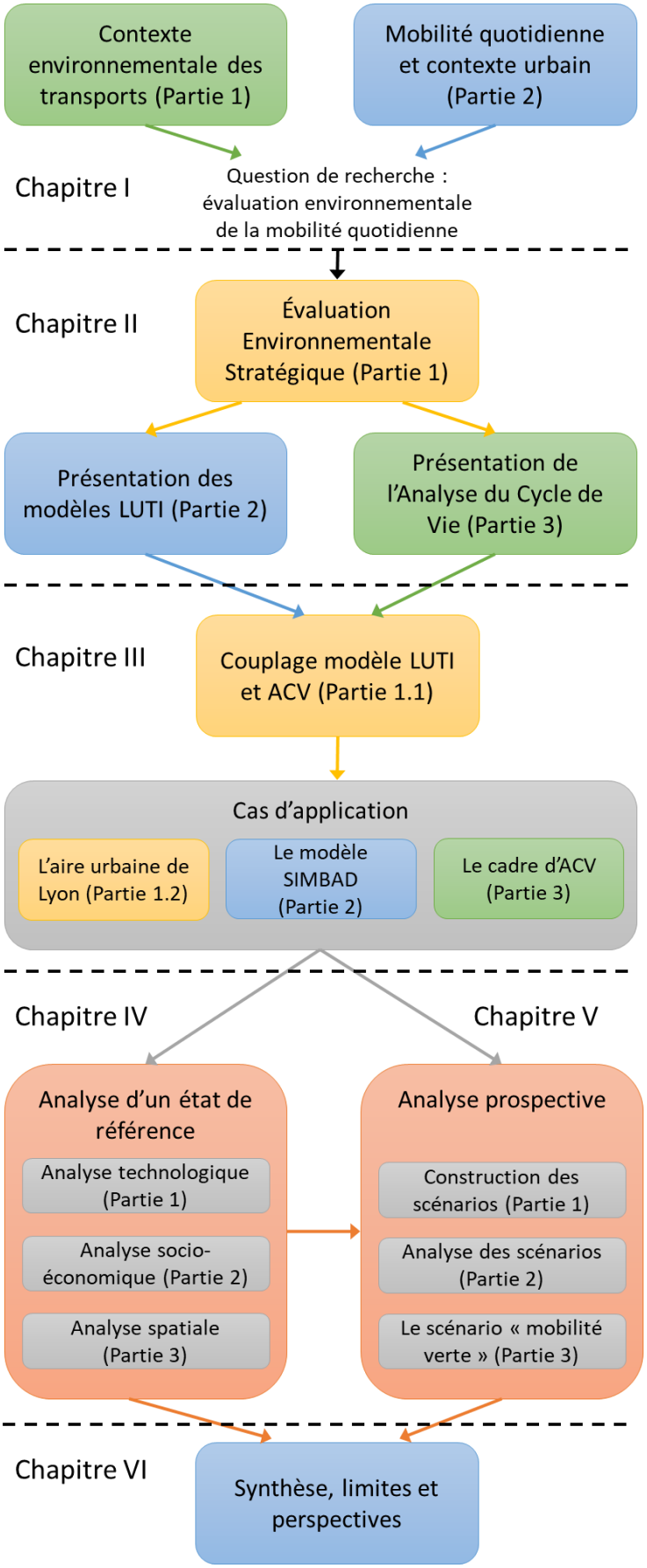
Le quatrième chapitre correspondra à la première partie de l'évaluation environnementale de la mobilité des habitants de l'aire urbaine de Lyon. Celle-ci testera les résultats fournis par SIMBAD-ACV afin de vérifier leur cohérence avec ceux de la littérature sur le sujet. Elle permettra dans le même temps de montrer le panel d'analyses disponibles dans l'outil pour une

situation définie, qui servira de référence. Dans un premier temps, les impacts environnementaux seront associés aux différents processus technologiques impliqués pour la mobilité quotidienne, en différenciant notamment les véhicules personnels et les transports en commun ainsi que les différentes phases d'impacts sur l'environnement. Ensuite, la désagrégation des impacts environnementaux à l'échelle des ménages ouvrira l'analyse sur les caractéristiques socio-économiques de ces derniers. Ce chapitre se terminera par l'analyse environnementale associée à la mobilité des différents territoires de l'aire urbaine, caractérisés par leurs comportements de la mobilité ainsi que par leur forme urbaine.

Le cinquième chapitre constituera la deuxième partie de l'évaluation environnementale de la mobilité quotidienne des habitants de l'aire urbaine de Lyon. Cette partie aura pour objectif de mettre en lumière l'aspect prospectif de l'outil SIMBAD-ACV par le biais de plusieurs scénarios. Ces derniers auront un but exploratoire, et non prédictif, puisqu'ils simuleront, dans un premier temps, la variation d'un seul des paramètres du système global, soit sur la forme urbaine, soit sur les comportements de mobilité, soit sur les réseaux de transports, soit sur les technologies de transport. Après avoir évalué les effets globaux et locaux de chacun de ces scénarios, un scénario de « mobilité verte » sera construit et évalué dans le but d'afficher un seuil minimum d'impacts environnementaux associé à la mobilité quotidienne des habitants de l'aire urbaine de Lyon à moyen terme.

Enfin, le sixième chapitre synthétisera le travail de thèse en reprenant ses apports méthodologiques et didactiques et en les remettant dans leur contexte global. Les différentes limites et perspectives rencontrées au cours de cet exercice de recherche seront également présentées.

Structure générale de la thèse :



Chapitre I : La mobilité quotidienne dans son environnement naturel et urbain

Contexte :

La problématique des impacts environnementaux des transports a pris de l'ampleur ces dernières années et sa dimension systémique nécessite d'élargir la représentation des chaines d'impacts associées. La description des processus technologiques et naturels éclaire qu'une partie des mécanismes contribuant aux impacts environnementaux amenant à s'interroger sur les mobilités afférentes et leur inscription spatiale, qui résultent d'interactions sociales. C'est dans ce cadre que ce chapitre pose les deux contextes scientifiques dans lesquels évolue cette thèse sur la mobilité quotidienne. La présentation des enjeux environnementaux et d'aménagement permet de situer le travail de thèse et de montrer les enjeux de l'évaluation environnementale de la mobilité quotidienne et urbaine de personnes.

Objectifs du chapitre :

- Présenter les différents regards qui sont portés sur la mobilité quotidienne de personnes.
- Exposer les enjeux environnementaux majeurs auxquels contribuent les transports de personnes et les principaux outils de mesures.
- Identifier les principales relations qu'entretient la mobilité quotidienne avec l'environnement urbain dans lequel il évolue.
- Formuler une question de recherche conjuguant les deux contextes scientifiques sur les enjeux environnementaux de la mobilité quotidienne de personnes.

Plan du chapitre :

La première partie de la revue de littérature placera la mobilité quotidienne des personnes et plus spécifiquement les systèmes transports dans leur cadre environnemental en présentant les enjeux environnementaux auxquels ils contribuent. Même si les enjeux de réchauffement climatique et de santé humaine sont centraux dans les débats scientifiques et politiques, la revue de littérature présentera d'autres enjeux non négligeables (usage des ressources, usage du sol, écotoxicité).

L'intérêt d'élargir les périmètres d'analyses environnementales aux carburants, aux véhicules et aux infrastructures sera ensuite illustré notamment avec les exemples de la mobilité électrique et des agrocarburants. Cette première partie conclura sur les principaux dispositifs de mesures et de modélisations existants pour représenter les mécanismes d'impacts liés aux polluants environnementaux des transports.

La seconde partie présentera le cadre urbain et social de la mobilité quotidienne ainsi que les différents regards portés sur la notion polysémique de mobilité afin d'appréhender l'objet « mobilité quotidienne et urbaine des personnes » et les multiples dimensions qu'il mobilise. Ceci nous mènera ensuite aux dispositifs de mesure utilisés pour observer et quantifier la mobilité quotidienne des personnes.

Une fois la notion de mobilité quotidienne des personnes définie, la sous-partie suivante présentera le contexte urbain et les systèmes qui sont connectés avec la mobilité. Le cadre urbain de la mobilité sera d'abord introduit avant de détailler le fonctionnement du système urbain dans lequel évolue la mobilité quotidienne. La forte relation qu'elle entretient avec la forme urbaine globale et locale fera l'objet dans cette partie d'une réflexion plus fine.

Partie 1 : Les impacts environnementaux du système de transport

« Nous voyons ainsi se substituer à la notion de "soumission à la nature" comme obéissance à une autorité puissante et sage, la notion toute moderne de "protection de la nature". Tels des enfants appliqués à défendre leur mère affaiblie, nous prenons conscience de notre devoir de protéger la nature contre les accidents qui la menacent et d'abord contre nos propres interventions, maladroites ou coupables. » (Berger, 1957, p. 420)

Avec les nombreux développements technologiques, qui s'enchainent depuis l'ère industrielle, et la croissance démographique de ces derniers siècles, l'impact de l'Homme sur l'environnement est devenu sérieux. Les besoins de l'Homme ont évolué et augmenté avec de plus en plus de besoins artificiels, devenus quotidiens (Dobré, 2002). La mobilité fait partie de ces besoins croissants qui font aujourd'hui des transports un secteur majeur en matière d'impacts environnementaux.

Le premier objectif de cette partie est de présenter les principaux impacts environnementaux des transports et de montrer que, contrairement à d'autres secteurs économiques, les transports peinent à réduire certains de leurs impacts. Afin de contrôler les différents enjeux environnementaux des transports, un certain nombre de mesures règlementaires ont été adoptées et de nombreux outils de suivi ont vu le jour.

Plusieurs solutions technologiques sont aujourd'hui proposées, ou en développement, afin de réduire l'impact des transports. Certaines de ces solutions sont cependant à l'origine de transfert d'impacts et amènent les évaluations à élargir leur champ d'études sur d'autres phases que l'utilisation des véhicules (François et al. 2017). Cette partie vise donc à éclairer la réflexion sur les outils et les méthodes nécessaires afin de « *chercher à maitriser notre maitrise* » (Serres, 1992, p. 61) et éviter des effets détournés notamment avec les exemples des agrocarburants et de l'électro-mobilité.

1.1. Les enjeux environnementaux du secteur des transports

Cette sous-partie présente de façon détaillée les principaux impacts des transports sur l'environnement et apporte des éléments quantitatifs et qualitatifs sur la contribution des transports de personnes dans la performance environnementale totale des activités humaines. En dépit de l'existence de plusieurs technologies de transports, les véhicules thermiques routiers sont les principales sources d'externalités environnementales pour les transports. Leurs effets se font ressentir sur les différentes échelles spatiales et temporelles possibles et touchent les différentes cibles de l'écosystème (homme, faune, flore, climat, ressources, milieux naturels).

1.1.1. Réchauffement climatique

Un des enjeux majeurs aujourd'hui, qui couvre l'ensemble des secteurs d'activités et qui est au cœur des négociations internationales, est le réchauffement climatique. Cet enjeu d'échelle mondiale résulte principalement des activités anthropiques et des émissions de gaz à effet de serre (GES) associées qui s'accumulent dans l'atmosphère augmentant la capacité d'absorption de rayonnement solaire à l'origine de la hausse de la température globale. Au cours du XXe siècle, la température moyenne du globe a augmenté de 0,78 °C et un certain nombre de phénomènes météorologiques et climatiques sont imputables à cette hausse : augmentation du niveau de la mer, fontes des glaces, pluviométrie en hausse, perturbation des courants marins et atmosphériques, phénomènes extrêmes (tempêtes, cyclones, canicules…). Malgré les différentes mises en garde et les décisions politiques prises pour enrayer ce dérèglement, les experts prévoient entre le début et la fin du XXIe siècle une augmentation de la température de 1,1 °C à 4,8 °C, mettant ainsi en lumière l'échelle temporelle très longue et la très grande inertie de ce phénomène (GIEC, 2013). Cet enjeu environnemental pousse aujourd'hui les politiques à adopter de plus en plus des mesures d'adaptation afin de réduire la vulnérabilité de la population et de l'ensemble de la biosphère aux différents phénomènes climatiques (digues, enfouissement de réseaux, modification des cultures…).

La mesure directe des conséquences de cet enjeu passe par les relevés de température à la surface de la planète (variable d'état) révélant des disparités géographiques de cet impact. Cependant, la mesure des pressions anthropiques exercées sur le réchauffement climatique s'effectue par le biais des émissions de GES exprimées par convention en masse de CO_2 (dioxyde de carbone) (variable de contrôle). Le potentiel de réchauffement climatique est différent suivant les GES émis et l'horizon temporel choisi. Chaque gaz possède un potentiel de réchauffement global (PRG) et une durée de vie spécifique qui est mise en regard avec ceux du CO_2 qui est la référence (Tableau I-1). L'horizon temporel le plus fréquemment utilisé est un horizon de 100 ans.

Tableau I-1 : Potentiel de Réchauffement Global (PRG) du CO_2, CH_4 et N_2O

Gaz à effet de serre	**PRG à 100 ans**	**Durée de vie du gaz**	**Contribution au réchauffement climatique en France en 2015**
Dioxyde de carbone CO_2	1	100 – 300 ans	70 %
Méthane CH_4	30	12,4 ans	14 %
Protoxyde d'azote N_2O	265	121 ans	11 %

Source : GIEC (2013), CITEPA[3]

En 2015, les trois GES du Tableau I-1 représentaient 95 % des émissions de GES de la France[4], les autres gaz sont principalement des gaz fluorés : les Perfluorocarbures (PFC), les Hydrofluorocarbures (HFC), l'hexafluorure de soufre (SF6) et le trifluorure d'azote (NF6). En France, le premier secteur émetteur de GES est le secteur des transports avec 33 % de contribution, principalement le transport routier (95 %) du fait de la combustion de carburants fossiles. Malgré une baisse de 21 % des émissions de GES en France entre 1990 et 2015, le secteur de transports a lui connu une hausse de 11 % sur la même période. On observe

[3] https://www.citepa.org/fr/air-et-climat/phenomenes/changement-climatique-effet-de-serre (consulté le 09/07/2018)

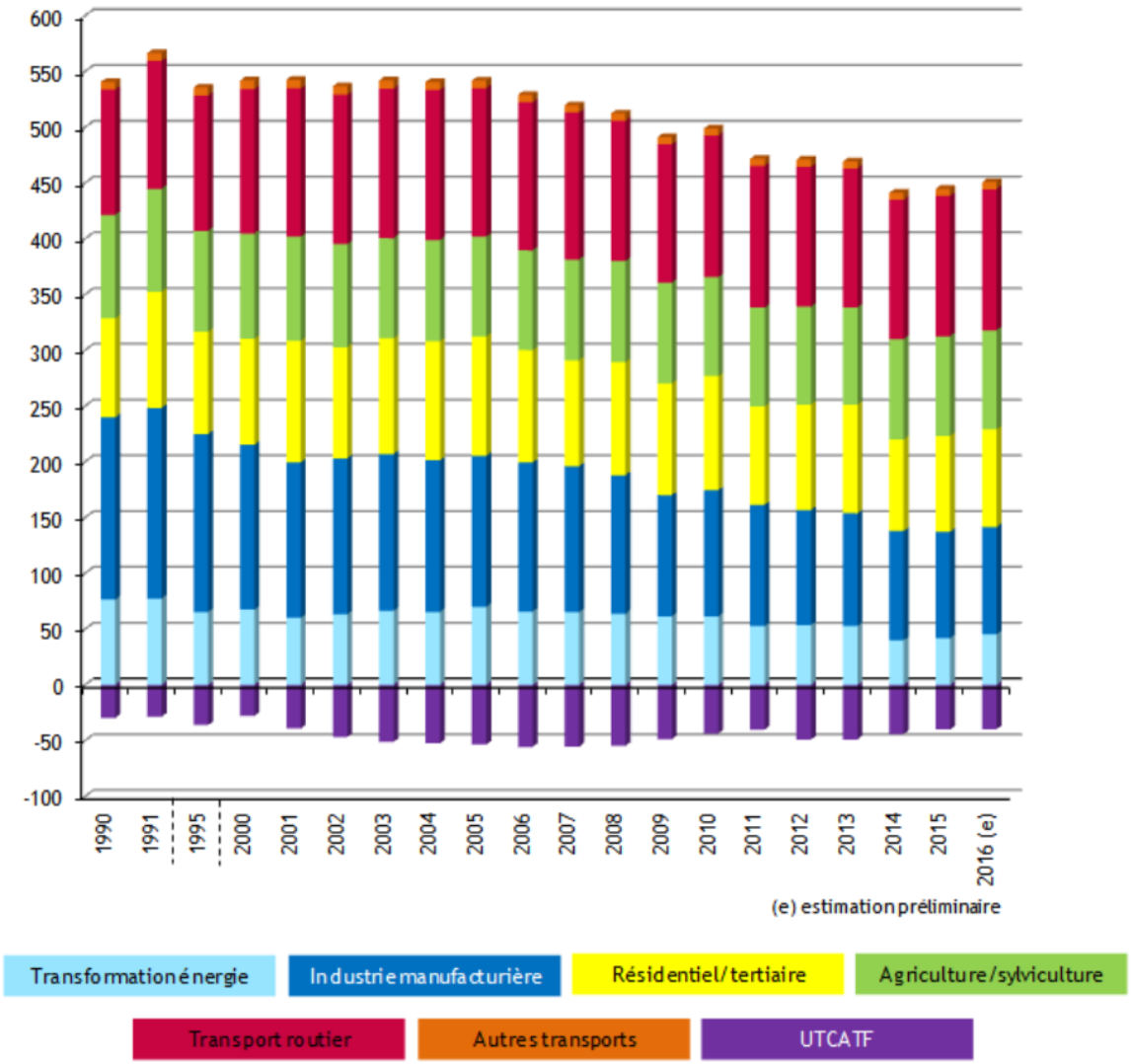
[4] https://www.citepa.org/fr/air-et-climat/polluants/effet-de-serre/potentiel-rechauffement-global-a-100-ans (consulté le 09/07/2018)

cependant une baisse de 7 % entre 2004 et 2015 (Figure I-1). Ce bilan pour le secteur des transports en fait le mauvais élève, empêchant la France d'atteindre les différents objectifs de diminution d'émissions de GES qu'elle s'est fixés. En effet sur la scène internationale, la France s'est engagée, dans le cadre de l'accord de Paris de 2017 avec l'ensemble des États, à maintenir la hausse de la température moyenne en dessous de 2 °C en 2050 par rapport à 1990 (CCNUCC, 2015). Engagée aussi avec l'Union Européenne, différents objectifs de réduction des émissions de GES ont été décidés pour la France : pour 2020 atteindre -20 % par rapport au niveau 1990 (paquet Climat – Energie 2020, objectif des 3x20[5]). La loi de 2015 sur la transition énergétique fixe aussi deux objectifs, le premier de -40 % en 2030 et l'autre de -75 % en 2050 par rapport à 1990, correspondant au facteur 4 (*LOI n° 2015-992 du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte*, 2015). Pour l'horizon 2050, le secteur des transports a encore beaucoup de chemin à parcourir avant d'atteindre le facteur 4, et les différents scénarii permettant d'y arriver croisent améliorations technologiques et changements de comportements (Lopez-Ruiz, 2009).

L'analyse des émissions de GES à partir des *Enquêtes Nationales Transports et Déplacements* montre aussi une hausse des émissions (+14 %) sur la période 1994 et 2008 pour la mobilité des Français. En distinguant mobilité locale et longue distance (inférieure et supérieure à 80 km), cette étude présente les mécanismes impliqués dans cette dégradation (Nicolas *et al.*, 2012). L'évolution démographique joue un rôle structurant sur cette hausse (+5,9 %), mais l'étalement urbain et la baisse de l'occupation des véhicules sont deux phénomènes contribuant à la hausse importante pour la mobilité locale (+17 %). La mobilité longue distance émet aussi plus de GES (+8 %) principalement, car la fréquence de ce type de déplacements a augmenté (+12 %). Malgré les importants progrès technologiques de ces dernières années, le bilan carbone des transports s'est accru du fait d'importants changements de pratiques et de comportements de mobilité.

[5] https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2020_fr, consulté le 13 août 2018

Figure I-1 : Émissions atmosphériques de gaz à effet de serre par secteurs en France métropolitaine (en Mt CO2eq)



Source : CITEPA[2]/Format SECTEN — avril 2017

1.1.2. Atteintes à la santé humaine

Le secteur des transports est très souvent pointé du doigt pour les impacts qu'il a sur la santé humaine. On mesure cet impact en comptabilisant le nombre de morts ou de malades imputables à ce secteur ou en nombre de mois de vie perdus en moyenne sur l'ensemble d'une vie. Les impacts des transports sur l'homme sont de différentes natures, la plus connue, qui fut pendant longtemps au cœur des débats pour une réglementation des transports, est

l'accidentologie corporelle. Après un pic à plus de 18 000 morts sur la route en 1972, le nombre d'accidents a maintenant fortement diminué avec environ 3 500 morts en 2016 alors que le trafic a été multiplié par 2,5 entre ces deux dates (ONISR - Soes, Mémento des transports[6]). La problématique de la pollution atmosphérique est devenue depuis quelques années un enjeu de santé publique majeur avec environ 48 000 morts en France imputables aux émissions de particules (Pascal *et al.*, 2016), dont le secteur des transports joue un rôle important. La contribution des transports à la pollution atmosphérique est importante, mais fortement variable en fonction de la zone observée, de la période, de la météo, ainsi que du polluant mis en cause, car la pollution atmosphérique est le résultat d'un mélange de polluants qui ont des effets différents sur la santé humaine (système cardiaque, pulmonaire, neural…).

Oxydes d'azote (NO_x) :

Le principal polluant incriminé pour le secteur des transports, et principalement le transport routier, est le dioxyde d'azote (NO_2) que l'on exprime souvent en oxydes d'azote (NO_x) incluant le monoxyde d'azote (NO), lui aussi toxique. Les NO_x sont à la fois des polluants primaires et secondaires, c'est-à-dire qu'ils ont un effet direct sur la santé humaine (maladies respiratoires et cardiovasculaires), mais ils peuvent aussi réagir et se transformer en d'autres polluants avec des effets différents. Ils participent à la formation de particules et d'ozone troposphérique qui agissent sur la santé humaine. Ils sont aussi à l'origine de phénomènes d'acidification et d'eutrophisation qui détériorent les milieux naturels. En France, en 2015, 56 % des émissions de NO_x proviennent des gaz d'échappement des véhicules routiers, principalement les véhicules thermiques au diesel[7]. Les émissions de NO_x s'effectuent majoritairement le long des axes routiers principaux, faisant des grandes aires urbaines et des vallées alpines des zones de fortes concentrations de NO_x (Atmo Auvergne–Rhône-Alpes, 2017a). Malgré les différents progrès technologiques en matière de dépollution des NO_x (pots catalytiques, pièges à NO_x ou réduction catalytique sélective), ces zones polluées sont aujourd'hui menacées de sanction de la part de la Commission Européenne pour dépassement de seuils d'exposition à ce polluant. Dans un premier temps des valeurs recommandées ont été

[6] http://www.securite-routiere.gouv.fr/la-securite-routiere/l-observatoire-national-interministeriel-de-la-securite-routiere/series-statistiques (consulté le 09/07/2018)

[7] https://www.citepa.org/fr/air-et-climat/polluants/aep-item/oxydes-d-azote (consulté le 09/07/2018)

fixées par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) en croisant diverses études scientifiques et sanitaires sur les effets de niveaux de concentration de polluants sur la santé humaine. Ces valeurs cibles font références aujourd'hui. Ils ont été repris par la Commission Européenne qui les fait appliquer dans ces différents pays membres, dont la France, à travers des seuils. Ces seuils règlementent différents polluants, le Tableau I-2 présente les valeurs cibles de l'OMS ainsi que les seuils d'information et d'alerte des NO_x, des particules (PM_{10} et $PM_{2,5}$) et de l'ozone (*Directive 2008/50/CE du Parlement européen et du Conseil*; OMS, 2006). Le dépassement du premier seuil déclenche un processus de diffusion d'information auprès du public sur les risques encourus. Le dépassement du seuil d'alerte entraine la mise en place, par le préfet, de mesures à court terme de réduction des niveaux de pollution.

Tableau I-2 : Valeurs cibles et seuils d'information et d'alerte de concentration de polluants

Polluants	**Valeurs directrices de l'OMS**	**Seuils d'information européens**	**Seuils d'alerte européens**
NO_x	40 µg/m³ moy. annuelle 200 µg/m³ moy. horaire	200 µg/m³ moy. horaire	400 µg/m³ moy. horaire
Particules PM_{10}	20 µg/m³ moy. annuelle 50 µg/m³ moy. journalière	50 µg/m³ moy. journalière	80 µg/m³ moy. journalière
Particules $PM_{2,5}$	10 µg/m³ moy. annuelle 25 µg/m³ moy. journalière (max 3 jours)		
Ozone (O_3)	100 µg/m³ moy. sur 8 heures	180 µg/m³ moy. horaire	240 µg/m³ moy. horaire

Source : Directive 2008/50/CE du Parlement européen et du Conseil et OMS (2006)

Particules :

Les effets sur la santé humaine des poussières et des particules en suspension dépendent principalement de la taille et de la composition des particules. Différentes catégories existent pour exprimer les différentes tailles de particules : les particules TSP (Total Suspended Particulates) représentent l'ensemble des particules dans l'air, elles incluent les pollens et les grains de sable, dont les plus grosses particules ne pénètrent pas dans le système respiratoire. Les particules PM_{10} (diamètre inférieur à 10 µm) vont plus profondément dans le système respiratoire, mais la majeure partie d'entre elles restent encore peu nocives, car elles sont arrêtées dans les voies respiratoires supérieures (nez, pharynx et larynx). Les particules $PM_{2,5}$ (diamètre inférieur à 2,5 µm) peuvent quant à elles atteindre les parties inférieures des poumons et s'infiltrer dans le système sanguin causant des dommages multiples augmentant les chances de maladies cardiovasculaires ou de cancers du poumon. Les particules PM_1 et $PM_{0,1}$ (respectivement de diamètres inférieurs à 1 µm et 0,1 µm) qualifiées d'ultrafines sont les plus nocives, car elles pénètrent dans les alvéoles pulmonaires et leur capacité de transfert dans l'organisme est importante. Ces différentes particules sont de compositions très diverses, organiques, métalliques, biologiques, et sont de potentiels vecteurs de métaux lourds, d'allergènes, de perturbateurs endocriniens ou de virus[8].

Le secteur des transports est émetteur de différents types de particules suite à la combustion de carburants, mais aussi par l'abrasion des freins, des pneus et de la route. La remise en suspension de particules par la circulation des véhicules est aussi une source importante de pollution aux particules. En France, le secteur des transports ne représente que 6 % des particules TSP et 14 % des particules PM_{10} et les principaux secteurs d'émissions sont l'agriculture, la construction et le secteur résidentiel[8]. Cependant, dans les zones urbaines à forte concentration de population et avec beaucoup de circulation, le secteur des transports contribue plus largement avec par exemple 31 % des émissions de particules PM_{10} en 2007 sur l'agglomération de Lyon, il était même le secteur principal pour les particules $PM_{2,5}$ avec 39 % des émissions. La répartition entre transports de marchandise et de personnes est à peu près équilibrée soulignant le poids important de poids lourds et des utilitaires. L'analyse sectorielle de l'exposition aux particules est par contre complexe avec une forte sensibilité aux conditions météorologiques et à la présence de pollutions de fond (DREAL Rhône-Alpes, 2014).

[8] https://www.citepa.org/fr/air-et-climat/polluants/poussieres-en-suspension (consulté le 09/07/2018)

Ozone troposphérique :

Les conditions météorologiques sont des facteurs très importants pour la formation de l'ozone troposphérique. Il s'agit d'un polluant secondaire qui se forme principalement suite à la réaction photochimique des NO_x, des composés organiques volatils (COV), du méthane (CH_4) et du monoxyde de carbone (CO) qui vont synthétiser de l'ozone (O_3) dans la couche basse de l'atmosphère, la troposphère. L'ozone est un gaz à effet de serre, mais sa faible durée de vie à cette altitude n'impacte pas le climat. En revanche, fortement oxydant, il est nocif pour les êtres humains. À forte concentration, il entraine des problèmes respiratoires et oculaires et il perturbe aussi la photosynthèse des végétaux. Les épisodes de pollution à l'ozone ont lieu principalement en été en périodes anticycloniques, avec un fort ensoleillement, une faible humidité et un faible vent. La pollution à l'ozone se situe en périphérie des zones d'émissions des réactifs, car le monoxyde d'azote (NO) réagit fortement avec l'ozone et le réduit dans les zones urbaines. La mesure de la contribution des transports dans la formation d'ozone troposphérique est complexe du fait de l'ensemble des conditions nécessaires à la réaction. On observe d'ailleurs ces dernières années une baisse globale des émissions de NO_x et de COV, respectivement -45 % et -61 % entre 2000 et 2014, alors que la concentration moyenne d'ozone a augmenté de 8 % entre 2000 et 2011 soulignant la complexité de cet enjeu environnemental[9] (Atmo Auvergne–Rhône-Alpes, 2017a).

Pollution sensible :

Les différents modes de transports (routier, ferroviaire, aérien) sont des sources de nuisances et de dégradation de l'environnement sensible par la population. Le bruit est la première de ces nuisances, elle se traduit, en fonction de son intensité et des personnes cibles, par une simple gêne, des pertes d'audition ou encore des problèmes psychologiques liés à du stress ou du manque de sommeil. Les problèmes olfactifs, visuels et de vibrations liés aux transports sont aussi à mentionner comme pollutions sensibles (Hellmuth *et al.*, 2012). Cependant, la mesure de ces pollutions est difficile. Il est possible de réaliser des cartes de bruits, présentant l'intensité du bruit d'une ville, mais la perception d'un son est subjective et

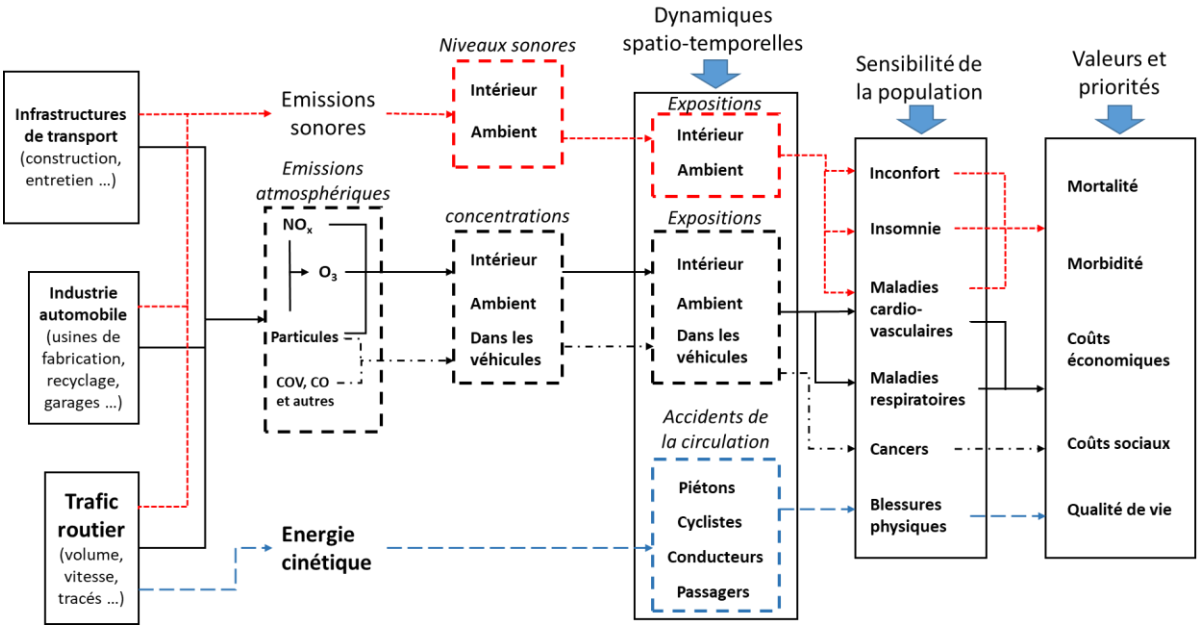
[9] https://www.citepa.org/fr/air-et-climat/phenomenes/pollution-photochimique (consulté le 09/07/2018)

dépend de sa nature, de sa qualité et de son horaire. La mesure de cette nuisance peut passer aussi par des enquêtes comme celle TNS Sofres en 2010 en France qui montre que deux tiers des enquêtés sont gênés par le bruit, parmi lesquels 54 % seraient gênés par les bruits des transports (Certu, 2011; TNS Sofres, 2010).

Les atteintes par les transports à la santé humaine sont multiples, elles proviennent pour une partie du trafic de véhicules et des émissions induites. Cependant, les sources de polluants et de nuisances fixes sont aussi à intégrer. Les activités nécessaires à la mise à disposition des véhicules, des carburants et des infrastructures sont aussi émettrices de polluants, mais les statistiques sectorielles ne permettent que rarement de les regrouper ensemble.

La Figure I-2 présente les principaux vecteurs d'impacts sur la santé humaine, les accidents corporels, le bruit et les polluants atmosphériques. Pour chacun de ces vecteurs, l'impact final dépend des facteurs d'exposition, qui résultent des dynamiques spatio-temporelles de la société, de la sensibilité de la population et du système de valeurs attribué aux différents attributs de la santé humaine.

Figure I-2 : Schéma de la chaine d'impact du système des transports sur la santé humain



Source : traitement auteur, inspirée du projet INTARESE (Briggs, 2008)

1.1.3. Usage des ressources naturelles

Ressources énergétiques :

Liée aux émissions de gaz à effet de serre et à la dépendance économique des territoires, la consommation de ressources énergétiques, et principalement des énergies fossiles, est un indicateur phare de suivi environnemental et économique. La disponibilité de la ressource soulève des questions environnementales et économiques sur sa rareté et sa durabilité. Pour le pétrole, l'existence et le dépassement du pic pétrolier restent encore débattus, du fait de l'exploitation de nouveaux gisements, plus difficiles à exploiter et générant de nouveaux types d'impacts environnementaux, mais devenus économiquement intéressants avec l'augmentation du prix du pétrole. Aujourd'hui, l'organisation de la société pour la période post pic pétrolier est encore à déterminer, surtout pour le secteur des transports fortement dépendant du pétrole (Aftabuzzaman & Mazloumi, 2011).

En France métropolitaine, la consommation d'énergie primaire est basée majoritairement sur de l'énergie non renouvelable (89 % de la consommation totale d'énergie primaire en 2017 soit 2 692 TWh). Le pétrole représente 31 % de la consommation d'énergie primaire totale en 2017, en baisse depuis le début du XXIe siècle (CGDD, 2018). Le pétrole était en 1990 la première source énergétique de la France avec 38,9 % de la consommation d'énergie primaire et il est toujours la principale source énergétique du secteur des transports (58 % de la consommation de pétrole de 2013). Les systèmes de transport tendent cependant à diversifier leurs mix énergétiques avec les biocarburants, l'électricité et le gaz naturel qui sont passés en France de 2,6 % à 8,2 % de contribution énergétique du secteur entre 2002 et 2013 (CGDD, 2018). Malgré cette hausse, le taux d'énergie renouvelable du secteur reste largement sous la barre des 20 % correspondant à l'objectif français et européen du paquet Climat-Energie pour 2020.

Ressources métalliques :

Tout comme la ressource pétrolière, les ressources métalliques sont non-renouvelables et sont extraites de gisements souterrains inégalement répartis sur le globe. Longtemps considérées par le secteur des transports uniquement comme un enjeu économique, la disponibilité et l'extraction des métaux sont devenues des enjeux environnementaux et sociaux du fait des conditions de travail de certains gisements ainsi que des pollutions et pertes naturelles qui y sont liées. Malgré l'existence de filières de recyclage pour les principaux métaux (acier, aluminium), la demande en métaux plus rares augmente dans les transports. En effet, la recherche de légèreté pour les véhicules, afin de réduire leurs consommations, amène les constructeurs à utiliser de nouveaux alliages métalliques ou des matériaux composites pour remplacer des métaux plus lourds. Ces nouveaux matériaux vont considérablement complexifier le recyclage des véhicules (Duflou *et al.*, 2009; Pillain, 2017; Witik *et al.*, 2011).

Due en partie au développement de la voiture électrique à batteries, la demande mondiale en lithium a fortement augmenté ces dernières années, entrainant une hausse de la production de lithium. Entre 1975 et 2005, la production de lithium a été multipliée par 5 et continue de croitre, toutefois les gisements de lithium sont concentrés dans peu de zones géographiques (deux tiers des gisements sont situés dans seulement trois pays dans les Andes et au Tibet) (Bradley *et al.*, 2017). Cette situation géographique combinée à une poursuite du développement de véhicules à batterie pour les prochaines années met en évidence l'importance économique, sociale et environnementale de cette ressource métallique (Kushnir & Sandén, 2012). La ressource en cobalt, utilisé dans les électrodes de la batterie Lithium-ion et dans des alliages métalliques, est aussi une ressource métallique à surveiller. Le cobalt fait partie de la liste des matières premières critiques pour l'Union Européenne dont les gisements se situent principalement en Afrique (Slack *et al.*, 2017).

L'émergence de cet enjeu de ressources métalliques suscite de plus en plus de contraintes sur la chaine complète de production des véhicules et remet en question les solutions technologiques de ces dernières années qui entrainent de nouvelles demandes. La prise en compte de cet enjeu nécessite d'intégrer l'ensemble des processus de l'extraction au recyclage dans les périmètres d'études des transports.

Occupation du sol :

Au même titre que les ressources fossiles ou métalliques, la consommation de l'espace est considérée comme une ressource limitée à protéger dans certains pays avec des contraintes de places. La préservation des espaces qui contribuent à diverses fonctions naturelles (écologiques, agricoles, forestière…) est un levier important de la conservation de la biodiversité, des milieux naturels et des paysages. La mise en place de zones protégées en France et en Europe (ZNIEFF et Natura 2000) est un exemple de mesures de préservation des principaux espaces remarquables (CGDD & Cerema, 2015). L'usage du sol par le secteur des transports, qui résulte principalement de la construction des voies routières ou ferroviaires, occupe et transforme certaines zones d'intérêt écologiques. Les constructions de réseaux créent aussi des effets de coupures sur le territoire qui impactent à la fois les écosystèmes, en coupant des continuités biologiques, et les relations sociales, en créant des barrières physiques à la mobilité de certains territoires et populations (Héran, 2011).

La mesure utilisée pour déterminer l'occupation du sol des systèmes de transports est la surface en m². En comparant la surface de voirie (routes et parkings) par habitant de différentes villes, Héran et Ravalet (2008) montrent que les habitants de la ville de Delft aux Pays-Bas utilisent 35 m² de surface par habitant contre 300 m² pour les habitants de Denver aux États-Unis. En France, ils estiment également que l'ensemble des stationnements occupent 636 km², soit 10 m² par habitant. L'usage du sol est une problématique majeure en ville à laquelle les transports contribuent fortement. En Europe, les zones urbaines ont ainsi environ 25 % de leur surface dédiée aux infrastructures de transports (Servant, 1996).

L'occupation du sol pour la mobilité ne s'arrête pas aux infrastructures linéaires et ponctuelles des transports. La construction et l'emprise foncière des activités liées aux transports sont à inclure, notamment les sites de fabrication et de stockages des véhicules ou encore la fabrication des carburants. Ce dernier point s'avère significatif avec l'intégration dans les carburants liquides d'agrocarburants provenant de cultures dédiées (par exemple de champs de colza) (François *et al.*, 2017).

1.1.4. Atteintes aux milieux naturels

Au même titre que les transports nuisent à la santé humaine (§1.1.2), ils nuisent aussi au reste de la biosphère et aux milieux naturels. Exposée aux polluants d'origine anthropique et aux nuisances des transports, la faune subit des effets toxiques et gênants qui induisent des pertes d'espèces et des migrations. Pour la flore, certains mécanismes fondamentaux sont affaiblis par les externalités des transports, notamment la photosynthèse par des concentrations élevées de particules ou d'ozone. Les émissions des transports contribuent aussi à la modification de certains milieux naturels en modifiant leurs équilibres chimiques et biologiques, notamment via des phénomènes d'acidification et de pollutions des eaux (Deletraz, 2002).

Acidification terrestre :

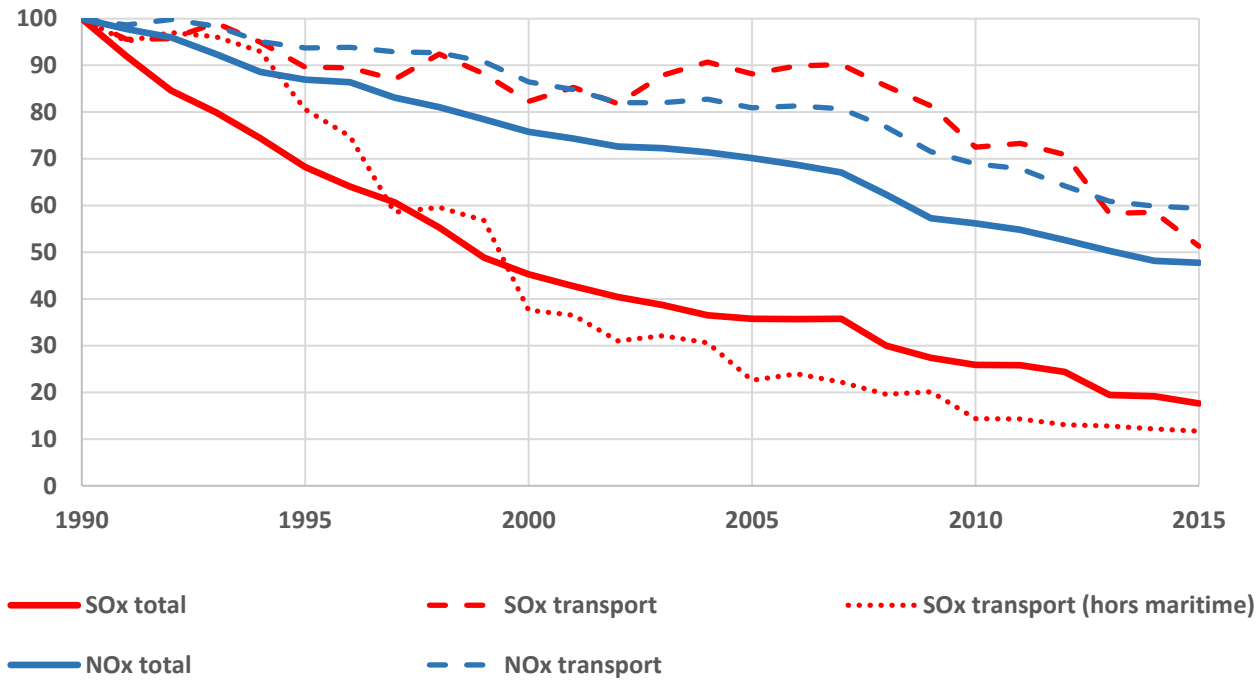
L'acidification est un phénomène local et continental qui transporte les polluants acides par voie atmosphérique ou par ruissellement avant de s'acculer dans les milieux cibles. L'acidité des sols et des cours d'eau est ainsi modifiée, réduisant leur fertilité et détruisant certaines espèces sensibles. Les pluies acides qui ont lieu en Scandinavie et en Europe de l'Est sont des exemples de ce phénomène, les polluants peuvent parcourir des centaines de kilomètres par voies aériennes depuis leurs sources d'émission avant de se déverser[10]. Les principaux polluants mis en cause dans cette pollution sont le dioxyde de soufre (SO_2), les NO_x et l'ammoniac (NH_3).

. En Europe, les mesures mises en place sur la composition des carburants liquides, réduisant leurs teneurs en soufre (*Directive 98/70/CE du Parlement Européen et du Conseil*, 1998), et les améliorations sur les systèmes de dépollutions, ont fortement réduit les émissions de SO_2 et de NO_x du secteur des transports ainsi que de la majorité des autres secteurs d'activités (Figure I-3). Le phénomène d'acidification en Europe a donc significativement réduit depuis 1990, passant de 35 % de la surface européenne en excès de charge acide à 9 % en 20 10[10]. La pollution acide au niveau international reste encore très surveillée puisqu'elle rentre dans le

[10] https://www.citepa.org/fr/air-et-climat/phenomenes/acidification-eutrophisation (consulté le 09/07/2018)

cadre de la *Convention sur la pollution atmosphérique transfrontière à longue distance* (1981, 171 OJ L) adoptée par l'UE en 1981 pour une coopération internationale de surveillance de polluants atmosphériques.

Figure I-3 : Évolution des émissions européennes (EU28) de SO2 et NOx (base 100 en 1990)



Source : European Environment Agency, 2017

Pollution des eaux :

Les milieux aquatiques ne sont pas épargnés par la pollution des transports, les eaux souterraines, les cours d'eau, les lacs et marais sont différents milieux susceptibles d'accumuler des éléments toxiques et de voir leurs propriétés chimiques et biologiques perturbées. L'eau constitue aussi une ressource importante pour le développement de la société, au même titre que l'énergie, et sa disponibilité et sa qualité sont deux critères importants pour l'approvisionnement (Kumar & Saroj, 2014).

En ville, la présence de nombreuses infrastructures de transports en surface (routes, parking) contribue à l'imperméabilisation des sols modifiant les flux de ruissellement. Fortement polluées par l'ensemble des éléments polluants déposés sur les infrastructures (métaux lourds, hydrocarbures, déchets, éléments infectieux…), les eaux de ruissellement urbaines ne peuvent pas être rejetées directement dans les milieux aquatiques, l'installation de bassins de rétention pour retenir ces polluants est rendue obligatoire par la réglementation. En zone rurale, la modification des ruissellements accentue les risques de mouvements de terrain (Dechesne *et al.*, 2004; Revitt *et al.*, 2014).

Un autre phénomène important de pollution des cours d'eau, des zones lacustres et côtières est l'eutrophisation, qui est une détérioration des milieux naturels suite à une accumulation d'azote. Les polluants azotés proviennent principalement des ruissellements, cependant la déposition atmosphérique de polluants tels que les NO_x et l'ammoniac est un deuxième vecteur de pollution avec une portée continentale (plusieurs dizaines de kilomètres). Après le dépôt et la réduction des polluants, les espèces végétales nitrophiles prolifèrent et envahissent les divers milieux, diminuant la biodiversité en privant d'oxygène et de lumière les autres espèces (Pinay *et al.*, 2017). L'agriculture, avec l'usage de fertilisant azoté, est le principal secteur d'activité à l'origine de l'eutrophisation, les émissions de NO_x des transports sont secondaires mais restent surveillées dans le cadre de la *Convention sur la pollution atmosphérique transfrontière à longue distance* (1981, 171 OJ L)[10].

1.1.5. Synthèse des enjeux environnementaux des transports

Le secteur des transports, et principalement les transports routiers, participe à de nombreuses dégradations de l'environnement, et ceci pour des cibles diverses et sur des échelles temporelles et spatiales très larges (immédiat à très long terme ; local à mondiale). Les phénomènes de dégradations mis en jeu sont hétérogènes avec des niveaux de complexité variés, faisant intervenir des mécanismes différents (physiques, chimiques, météorologiques, climatiques, médicaux…). Le Tableau I-3 illustre ces diversités en reprenant les enjeux environnementaux décrits précédemment.

Tableau I-3 : Synthèse des cibles, des échelles spatiales et temporelles des enjeux environnementaux des transports

Impacts environnementaux	**Cibles**	**Échelle spatiale**	**Échelle temporelle**	**Contribution du secteur de transports**
Réchauffement climatique	Climat L'ensemble de la biosphère	Mondiale	Long terme	Forte : 23 % du bilan mondial 33 % du bilan français
Pollution atmosphérique directe (particules, NO_x…)	Hommes Faune et flore	Surtout locale, possible transport des polluants	Court terme avec des saisonnalités	Forte pour les NO_x (74 % PPA de Lyon 2007) Forte pour les particules (39 % de $PM_{2,5}$ PPA 2007)
Ozone troposphérique	Hommes Faune et flore	Locale dans des conditions spécifiques	Court terme avec des saisonnalités	Contribution indirecte liée aux émissions de NO_x Attention, concentration en augmentation
Pollution sensible (bruits, odeurs)	Homme	Locale	Immédiat	Importante d'après les cartes de bruits et les enquêtes
Pressions sur les ressource énergétique fossile	Ressources naturelles	Mondiale	Quasi irréversible	Forte : 33 % de la consommation d'énergie finale fossile
Pressions sur les ressource métallique	Ressources naturelles	Mondiale	Irréversible	À surveiller avec les véhicules électriques et la complexification des matériaux
Occupation du sol	Ressources naturelles Flore et faune	Locale et régionale	Long terme	Forte en zone urbaine ≈ 25 % de la surface Concurrences des sols pour les agrocarburants

Acidification terrestre	Milieux naturels Flore et faune	Régionale à continentale	Court et moyen terme	Secondaire derrière les secteurs industriel et agricole, SO_2 et NO_x en forte baisse
Pollution des eaux	Milieux naturels Faune et flore	Locale à continentale	Court et moyen terme	Faible contribution directe des transports, mais impacts via le ruissellement sur les infrastructures et les activités industrielles et agricoles (usines et biofuel)

Source : synthèse auteur

La spécificité du secteur des transports en matière d'impacts environnementaux réside dans la multiplicité des sources de pollutions, avec les véhicules, pilotés individuellement, mais aussi l'ensemble des usines, des centrales et raffineries qui produisent les véhicules, les carburants ou les infrastructures. Contrairement aux autres secteurs d'activités, les sources de pollutions des transports sont mobiles et se déplacent sur des distances très variables (de quelques mètres à des milliers de kilomètres) avec, d'un point de vue agrégé, des variations de flux qui peuvent évoluer dans le temps en quelques minutes. La majorité des émissions polluantes atmosphériques ont lieu sur les axes de transports, augmentant fortement l'exposition aux nuisances environnementales dans les zones riveraines des grands axes. Les utilisateurs du système de transport sont ainsi fortement exposés aux impacts de ce même système, les conducteurs et les passagers de voitures en première ligne, mais les usagers des transports en commun ou des modes actifs ne sont pas épargnés non plus (Sider *et al.*, 2013; Okokon *et al.*, 2017).

L'intensité, la localisation et la temporalité des transports sont directement liées aux activités humaines, ce qui explique l'augmentation de la circulation lors des heures de pointe correspondant au début et à la fin des heures d'activités (Cebeillac *et al.*, 2017). Cette corrélation entre flux de transports et activités apporte une explication aux faibles améliorations environnementales du secteur des transports ces dernières années. La modification du type, du nombre, de la localisation et de la temporalité des activités influence l'impact des transports sur l'environnement, comme la périurbanisation ou le développement du secteur tertiaire.

Les progrès environnementaux des transports proviennent aujourd'hui majoritairement des avancées technologiques sur les véhicules et les carburants avec la diminution des émissions de gaz d'échappement, l'incorporation d'agrocarburants ou le développement de nouvelles motorisations (électrique, hybride) (Bouzouina *et al.*, 2011). Pour certaines de ces solutions « faciles », qui ne modifient pas les pratiques, les progrès environnementaux ne sont effectifs que sur une partie des enjeux cités. Certaines solutions technologiques induisent des transferts d'impacts, par exemple le véhicule électrique réduit les gaz d'échappement, mais renforce les impacts de la production des véhicules et des batteries, les agrocarburants transfèrent l'usage de ressources pétrolières en occupation du sol. La prise en compte de ces répercussions nécessite d'élargir le champ d'étude du secteur au-delà du simple usage des véhicules pour adopter une approche systémique incluant l'ensemble des processus nécessaires à la réalisation des déplacements (Le Féon, 2014; François *et al.*, 2017).

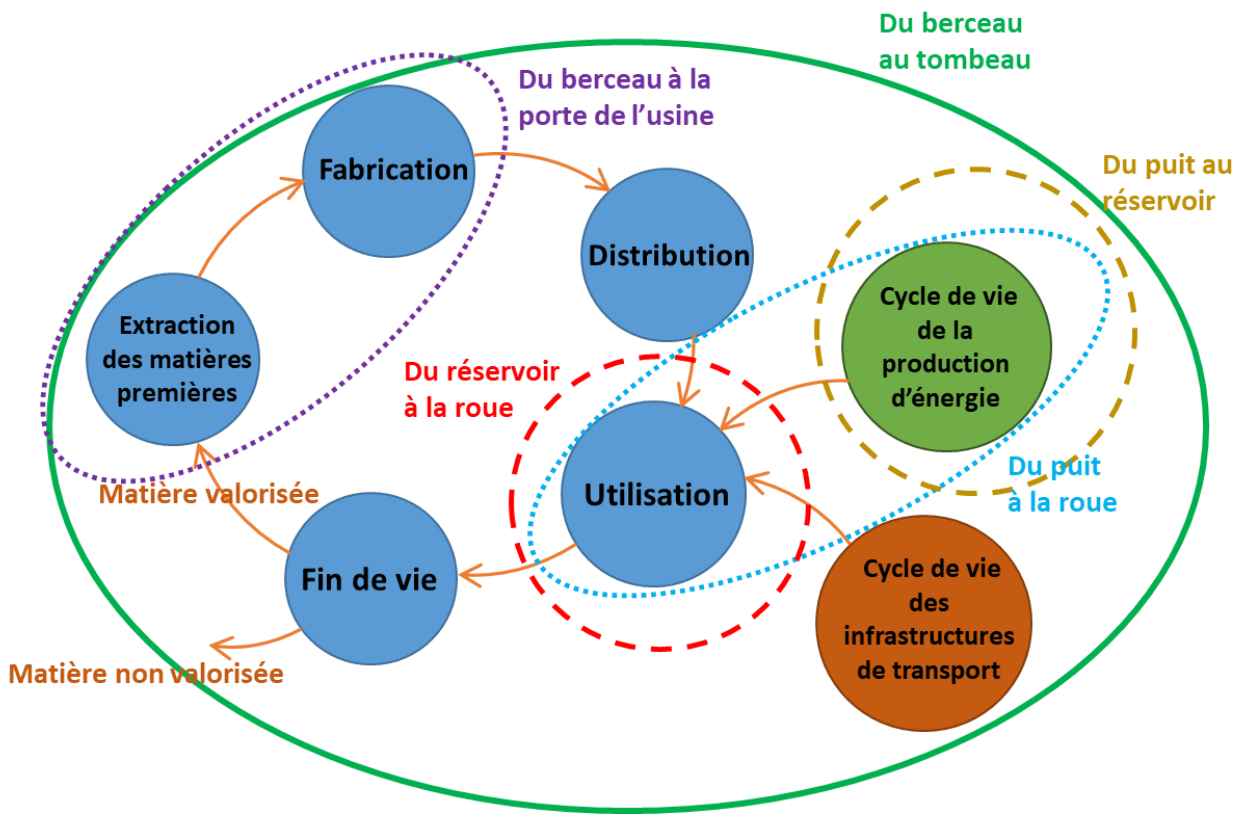
1.2. Élargissement du périmètre d'analyse environnementale

En listant et en décrivant les mécanismes d'impacts des principaux enjeux environnementaux des transports dans la partie précédent (§1.1), le périmètre d'étude choisi pour réaliser l'évaluation de ces enjeux s'avère être essentiel. Avec un périmètre restreint au simple usage des véhicules, certains enjeux seraient insignifiants, comme l'utilisation des ressources métalliques ou l'occupation du sol, et d'autres seraient moins importants (François *et al.*, 2017; Hawkins *et al.*, 2013). L'élargissement des limites du système évalué complexifie l'étude, mais complète l'évaluation avec des processus tels que la fabrication des véhicules, l'approvisionnement en carburant ou la fabrication des infrastructures de transports. De nombreuses études environnementales existent pour les systèmes de transports, principalement les transports routiers, reposant sur des périmètres divers. La Figure I-4, proposée par Le Féon (2014), résume les différents périmètres utilisés pour l'évaluation des transports. L'agrandissement du périmètre est au cœur des méthodologies d'évaluation qui ajoutent d'autres phases de cycle de vie à celle de l'usage des transports (Analyse de Cycle de Vie (ACV), bilan carbone, Analyse de Flux de Matières (AFM)). Contrairement aux calculs d'émissions et de consommations de la phase d'usage, l'analyse des cycles de vie des véhicules et des infrastructures questionne sur la durée de vie de ces objets, car les résultats des évaluations environnementales seront sensibles à cette variable (ADEME, 2013; Le Féon, 2014).

Pour l'évaluation des impacts des transports, la phase d'usage est au centre de l'étude, les phases liées à la fabrication des véhicules, des carburants et des infrastructures dépendent de l'usage des véhicules. De nombreux outils et modèles existent pour quantifier la phase d'utilisation des véhicules et les émissions et consommations qui sont liées, la partie suivante présentera ces outils (§1.3). L'élargissement du périmètre d'étude peut aller dans trois directions, la première en incluant l'ensemble de la chaine énergétique des transports afin d'avoir une approche *du puit à la roue* souvent utilisée dans les bilans énergétiques et carbone des transports. La deuxième extension concerne les impacts liés à la fabrication des véhicules et l'ensemble du cycle de vie des véhicules qui sont mis sur le marché, de l'extraction des ressources à la fin de vie du véhicule. Le dernier prolongement s'intéresse à la mise à disposition d'infrastructures de transport et de leurs cycles de vie, cette approche est rarement

connectée avec les autres extensions possibles (Chester & Horvath, 2009). On retrouve, dans de rares études, le secteur de l'assurance pour les automobiles et les infrastructures, ce secteur reste cependant largement minoritaire en matière d'impacts environnementaux (Chester *et al.*, 2013).

Figure I-4 : Schéma des différents périmètres d'étude environnementaux pour la mobilité



Source : Le Feon, 2014

1.2.1. Approvisionnement en carburants

La phase d'usage des véhicules est en relation étroite avec le type d'énergie utilisée. Les émissions de CO_2 par kilomètre sont plus importantes pour les véhicules à essence que ceux à carburation diesel (ADEME, 2013). Les carburants utilisés influencent les facteurs d'émissions des véhicules et chaque carburant possède une chaine d'approvisionnement différente. L'étude

du cycle de vie des carburants est associée à la diversification des énergies, car il existe une forte variabilité dans les différentes chaines d'approvisionnement de l'extraction des ressources à la distribution (Well to Tank). Pour les filières énergétiques principales (essence et diesel), produits à partir du pétrole, la chaine d'approvisionnement comprend la production de pétrole brut, son acheminement, son raffinage et enfin sa distribution dans les stations-service. La méta-analyse de (Eriksson & Ahlgren, 2013) sur les études d'ACV menées sur l'essence et le diesel montre des variations entre les deux carburants, mais la performance environnementale des deux carburants est fortement impactée par le type de pétrole extrait. La production d'essence émet entre 6,7 et 27 g de CO_2-eq par MJ et le diesel entre 7,9 et 24 g de CO_2-eq par MJ représentant, en incluant les émissions liées à la combustion, entre 8 % et 26 % des émissions totales liées aux carburants. La chaine de production et de distribution des carburants fossiles émet aussi d'autres polluants atmosphériques, notamment des SO_2, des NO_x et des COV (Nigge, 2000). Le développement de nouveaux vecteurs d'énergie pour les transports modifie les impacts liés à l'approvisionnement en carburants avec notamment les agrocarburants et l'électrification des transports.

Les agrocarburants :

La substitution d'une partie des carburants liquides fossiles par des agrocarburants influence significativement l'évaluation environnementale de la chaine d'approvisionnement énergétique. Lors de la combustion dans les moteurs, on considère que les carburants biosourcés n'émettent pas de GES du fait de leur origine biogénique. Cependant, le reste de la chaine de production des agrocarburants est émettrice de polluants atmosphériques et aquatiques qui conduisent à de nouvelles externalités environnementales (Bicalho, 2013). Ce transfert d'impact du secteur pétrolier au secteur agricole modifie aussi les méthodes d'évaluation à mobiliser avec un usage important de l'ACV pour faire le bilan environnemental des agrocarburants en intégrant l'ensemble des processus mis en œuvre (Menten, 2013).

La production d'agrocarburants a été précipitée en Europe par l'objectif de 20 % d'énergie renouvelable dans le mix total à l'horizon 2020 (*Directive 2009/28/CE du parlement européen et du conseil relative à la promotion de l'utilisation de l'énergie produite à partir de sources renouvelables*, 2009). Or cette nouvelle demande a eu deux effets rebonds majeurs sur l'environnement, une augmentation des impacts environnementaux du secteur agricole sur

lequel repose une partie de la production des agrocarburants, ainsi que des émissions supplémentaires liées aux changements indirects dans l'affectation des sols. L'étude de l'ADEME (2010) sur différents biocarburants de première génération présente la complexité de comparer ces deux filières. D'un côté, une filière pétrolière mature, de l'autre une diversité de biocarburants importante dont les bénéfices environnementaux sont discutables. En effet, les agrocarburants réduisent certaines émissions atmosphériques, mais l'usage de pesticides et de fertilisants porte atteinte à la santé humaine et contribue à l'eutrophisation. L'étude souligne des gains potentiels sur l'usage d'énergie non renouvelable et sur les émissions de GES, mais l'étude reste prudente dans ces conclusions du fait du phénomène de *changement d'affectation des sols* (CAS). En effet, le CAS peut induire des émissions de GES supplémentaires.

Un changement d'affectation du sol direct consiste en la conversion d'une surface en une culture dédiée aux agrocarburants. En fonction de l'usage initial du terrain, la capacité de stockage en carbone va varier et si la capacité diminue, du carbone sera relâché dans l'atmosphère. Un exemple de CAS direct serait la déforestation d'une surface pour implanter une culture de palme. Un CAS indirect repose sur l'hypothèse d'un maintien du niveau de production alimentaire. Si une culture dédiée à un agrocarburant est implantée sur un terrain initialement utilisé pour l'alimentaire, ce dernier va se réimplanter ailleurs et induire un changement de capacité de stockage en carbone (Menten, 2013). La déforestation et le CAS sont à l'origine de 11 % des émissions de GES en 2010 et leurs impacts ne touchent pas que l'environnement puisque la sécurité alimentaire est aussi remise en question, notamment aux États-Unis et au Brésil (IPCC, 2015; Koizumi, 2015).

Les débats sur la production d'agrocarburants sont nombreux au sein des instances internationales et évoluent rapidement avec le développement de nouvelles générations de biocarburants. L'Union Européenne et ses membres ont adopté différents textes pour règlementer et ralentir la consommation d'agrocarburants. La notion de cycle de vie est spécifiée dans la directive de 2015 pour garantir la décarbonisation du mix énergétique européen (*Communication de la Commission au Parlement Européen relative à la promotion de l'utilisation de l'énergie produite à partir de sources renouvelables* 2012; *Directive (UE) 2015/1513 concernant la qualité de l'essence et des carburants diesel* 2015).

L'électrification des transports :

La diffusion des moteurs électriques dans les transports constitue aussi un changement majeur de la chaine d'approvisionnement en énergie. Présent depuis plusieurs décennies dans les transports guidés (train, tram, métro, téléphérique), la motorisation électrique se démocratise aujourd'hui dans les transports routiers avec l'usage de batteries[11]. L'origine de l'électricité pour ces véhicules électrifiés varie en fonction du type de motorisation, on distingue trois sources d'alimentation. Le branchement sur le réseau d'électricité, via une borne de recharge, est la source d'énergie principale des véhicules 100 % électrique, les véhicules hybrides rechargeables disposent aussi de cette capacité de recharge. Pour les véhicules hybrides, l'électricité utilisée par le moteur provient en partie de la génération électrique produite par un moteur thermique alimenté en carburant traditionnel. Enfin, la récupération d'énergie cinétique, lors des freinages et des descentes, constitue la dernière source d'alimentation électrique. Pour les véhicules hybrides, le niveau d'hybridation dépend du nombre et de la puissance des sources électriques mobilisées : les véhicules *mild hybrid* représentent le niveau d'hybridation minimal avec une récupération d'énergie cinétique et un stockage réduit ; les véhicules *full hybrid* sont entrainés par un moteur thermique et un moteur électrique ensemble ou séparément, la récupération cinétique reste effective ; les véhicules hybrides rechargeables peuvent en plus s'alimentés sur le réseau électrique (Badin, 2013).

La structure interne des véhicules (type d'électrification) joue un rôle important dans la chaine énergétique des véhicules électrifiés. Cependant, pour les véhicules 100 % électriques, l'approvisionnement par le réseau électrique est un facteur important d'impacts environnementaux. Plusieurs études soulignent l'importance, pour les politiques publiques, de combiner le développement des véhicules électriques avec une amélioration du système de production électrique (Daxner *et al.*, 2014; Hawkins *et al.*, 2013). En France, l'origine nucléaire de l'électricité permet d'avoir un bilan carbone intéressant pour les véhicules électriques contrairement à l'Allemagne dont la production électrique est plus carbonée (ADEME, 2013). Cette variabilité, liée aux différentes sources de production électrique, est valable aussi pour l'ensemble des autres enjeux environnementaux, par exemple l'origine nucléaire de l'électricité française induit des émissions radioactives (Bauer *et al.*, 2015). L'approvisionnement en

[11] Développement des véhicules propres, https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/developpement-des-vehicules-propres, consulté le 15 août 2018

électricité nécessite aussi un réseau de distribution et des infrastructures de recharge, mais peu d'études les intègrent dans leurs périmètres d'analyse.

1.2.2. Cycle de vie des véhicules

La mise en place de politiques et d'outils d'écoconception, comme l'ACV, par les constructeurs automobiles européens a débuté au début des années 90 avec la création de l'EUCAR (European council for automotive research). L'objectif premier de l'usage de l'ACV par les constructeurs est d'intégrer la dimension environnementale dans la prise de décision, notamment pour inclure la fin de vie des véhicules et leurs impacts en matière de déchet (Le Borgne & Feillard, 2000). Depuis les années 80 et la diffusion de la notion de « *responsabilité élargie du producteur »*, la gestion des déchets en fin de vie de produit est devenue un enjeu pour les différentes filières industrielles (*Directive 2008/98/CE du Parlement européen et du Conseil relative aux déchets et abrogeant certaines directives*, 2008). Le système d'étude pour l'écoconception s'élargit alors sur l'extraction des matières premières, la fabrication du véhicule, son utilisation et son traitement en fin de vie avec notamment les filières de recyclages. La maintenance des véhicules pendant leur vie est aussi une étape majeure du cycle de vie des véhicules (Le Féon, 2014).

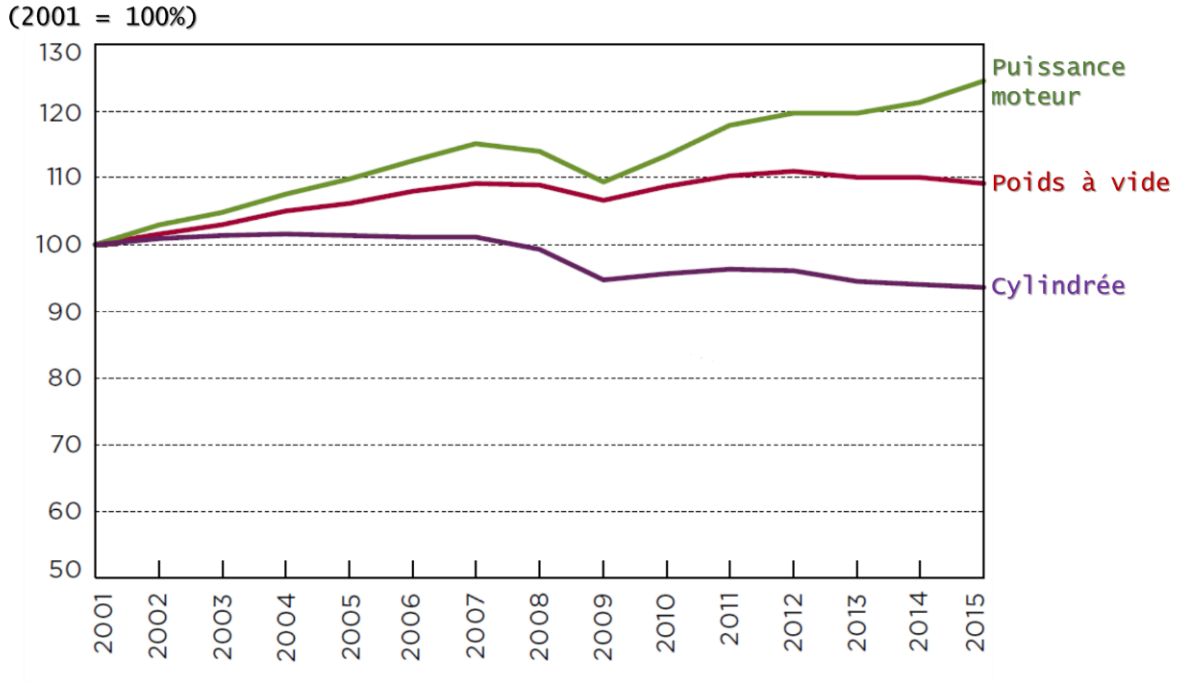
Au cours du cycle de vie d'un véhicule personnel à combustion interne, la majorité des impacts environnementaux ont lieu lors de l'utilisation, cependant les phases de fabrication et de fin de vie restent significatives dans les bilans environnementaux (Le Borgne & Feillard, 2000). Pour les émissions de CO_2, la majorité des études intégrant le cycle de vie des véhicules montrent une contribution de la phase d'usage de l'ordre de 80 % (Chester & Horvath, 2009; Le Féon, 2014). Néanmoins, l'arrivée de nouvelles motorisations et de nouveaux matériaux dans les véhicules modifie le profil environnemental d'un véhicule.

Avec l'électrification des véhicules, on observe un transfert d'impact très net de la phase d'utilisation vers la phase de fabrication du véhicule. Certains impacts tendant à s'améliorer (réchauffement climatique, acidification), d'autres à se dégrader (eutrophisation, ressource métallique) du fait de ce transfert d'impact et de la modification de l'approvisionnement en énergie (cf. §1.2.1) (ADEME, 2013; Hawkins *et al.*, 2013). Au sein de la phase de fabrication, la production de la batterie est un processus fortement impactant pour l'environnement, et le résultat final d'un véhicule électrique est fortement dépendant des caractéristiques de la batterie

(durée de vie, densité d'énergie) et du processus de fabrication de la batterie (Picherit, 2010). Ainsi, des études comparatives montrent que les émissions de GES augmentent entre 66 % et 75 % pour la production d'une voiture électrique par rapport à un équivalent diesel (ADEME, 2013; Bauer *et al.*, 2015), renforçant l'intérêt d'élargir le périmètre d'étude sur la production des véhicules.

L'introduction de nouveaux matériaux plus légers et résistants dans les véhicules est devenue un enjeu pour les constructeurs afin de réduire la consommation de carburant et les émissions de GES de leurs véhicules afin d'atteindre l'objectif de 95 g de CO2 par kilomètre en moyenne pour le parc automobile neuf (*Règlement (CE) no 443/2009 du Parlement européen et du Conseil du 23 avril 2009 établissant des normes de performance en matière d'émissions pour les voitures particulières neuves*, 2009). Les tendances passées montrent une augmentation du poids des véhicules personnels vendus chaque année depuis 2001 (Figure I-5), due en partie à la multiplication des ventes de SUV et tout-terrain par 5 sur cette période en Europe (ICCT, 2017). Des solutions telles que des matériaux en fibre de carbone ou en alliage de magnésium, environ 60 % plus léger que l'acier, permettent de réduire significativement la consommation de carburant et les émissions atmosphériques lors de l'usage du véhicule. Cependant, pour ces matériaux, les impacts environnementaux associés à la consommation de ressources minérales rares et la consommation énergétique liés aux matières premières et de leur usinage recouvrent, voire dépassent, les gains réalisés lors de l'utilisation (Witik *et al.*, 2011). On constate ainsi que le choix des matériaux est primordial afin d'éviter les transferts d'impacts au sein du cycle de vie des véhicules.

Figure I-5 : Évolution des caractéristiques techniques du parc automobile neuf en Europe



Source : ICCT, 2017

1.2.3. Cycle de vie des infrastructures

La construction et le cycle de vie des infrastructures présentent de forts enjeux environnementaux et l'évaluation environnementale des projets d'infrastructures est définie par un cadre réglementaire précis (Etude d'Impact sur l'Environnement). L'analyse des impacts liés aux infrastructures au sein d'un projet de transport en commun par bus hybride montre la part significative des infrastructures dans le projet global qui inclut aussi l'analyse des véhicules, des carburants et de l'aménagement le long du tracé (espaces verts, trottoirs…) (de Bortoli *et al.*, 2017). Environ 20 % des émissions de GES, des polluants acides ou de polluants participant à la formation d'ozone troposphérique sont émis lors de phases de terrassement, la construction et de maintenance des infrastructures, pour d'autres enjeux tels que l'eutrophisation ou l'utilisation de ressources la contribution est même supérieur à 20 %. Les sections linéaires de voies constituent la majeure partie des impacts des infrastructures, mais dans le cas d'une ligne de bus, la mise en place des stations et de dépôts à une contribution

significative (de Bortoli *et al.*, 2017). Dans un cadre plus global, Chester et Horvath (2009) montrent aussi l'importance des infrastructures pour la performance environnementale des transports, notamment dans les transports publics ferrés.

Afin d'améliorer la conception et le reporting des infrastructures de transports, les constructeurs utilisent parfois l'ACV dans leurs études. Mise en œuvre lors de la phase de conception, l'ACV permet au constructeur d'adapter son ouvrage en fonction des phases de construction, de maintenance, d'usage et de fin de vie de l'infrastructure (Fédération Nationale des Travaux Publics, 2015). Des logiciels et des bases de données sont disponibles pour faciliter la réalisation de ces études, notamment en France avec ECORCE[12] et DIOGEN[13].

Malgré le développement de logiciels et de bases de données, chaque projet est unique et les résultats sont fortement variable en fonction du terrain et du contexte de réalisation. L'une des sources de variabilité est la localisation spatiale de l'infrastructure. Les travaux de terrassement peuvent fortement varier d'un tracé à un autre du fait de la typologie et de la structure géologique du terrain, mettant ainsi en avant l'intérêt d'utiliser des logiciels de SIG lors des choix de tracé (Karlsson *et al.*, 2017). Une deuxième source de variabilité réside dans les matériaux utilisés pour réaliser les ouvrages. Différentes études traitent de cet aspect en comparant différents matériaux, notamment l'asphalte et le béton de ciment. Cependant, les résultats sont sensibles à des paramètres locaux liés au terrain et aux fournisseurs disponibles (Santero, 2010; Santos *et al.*, 2017).

En dépit des différentes études d'impact sur l'environnement des infrastructures de transport, peu d'études environnementales de systèmes de transports intègrent les infrastructures à leur périmètre d'évaluation. (Le Féon, 2014) montre que 6 % du bilan carbone lié à la mobilité de personnes de Saint-Étienne résulte de la construction et de la maintenance des infrastructures. En fonction des enjeux environnementaux et des modes de transport analysés, la contribution des infrastructures au bilan du cycle de vie des transports varie.

[12] http://ecorce2.ifsttar.fr/index.php, consulté le 19 août 2018
[13] http://www.diogen.fr/index.php, consulté le 19 août 2018

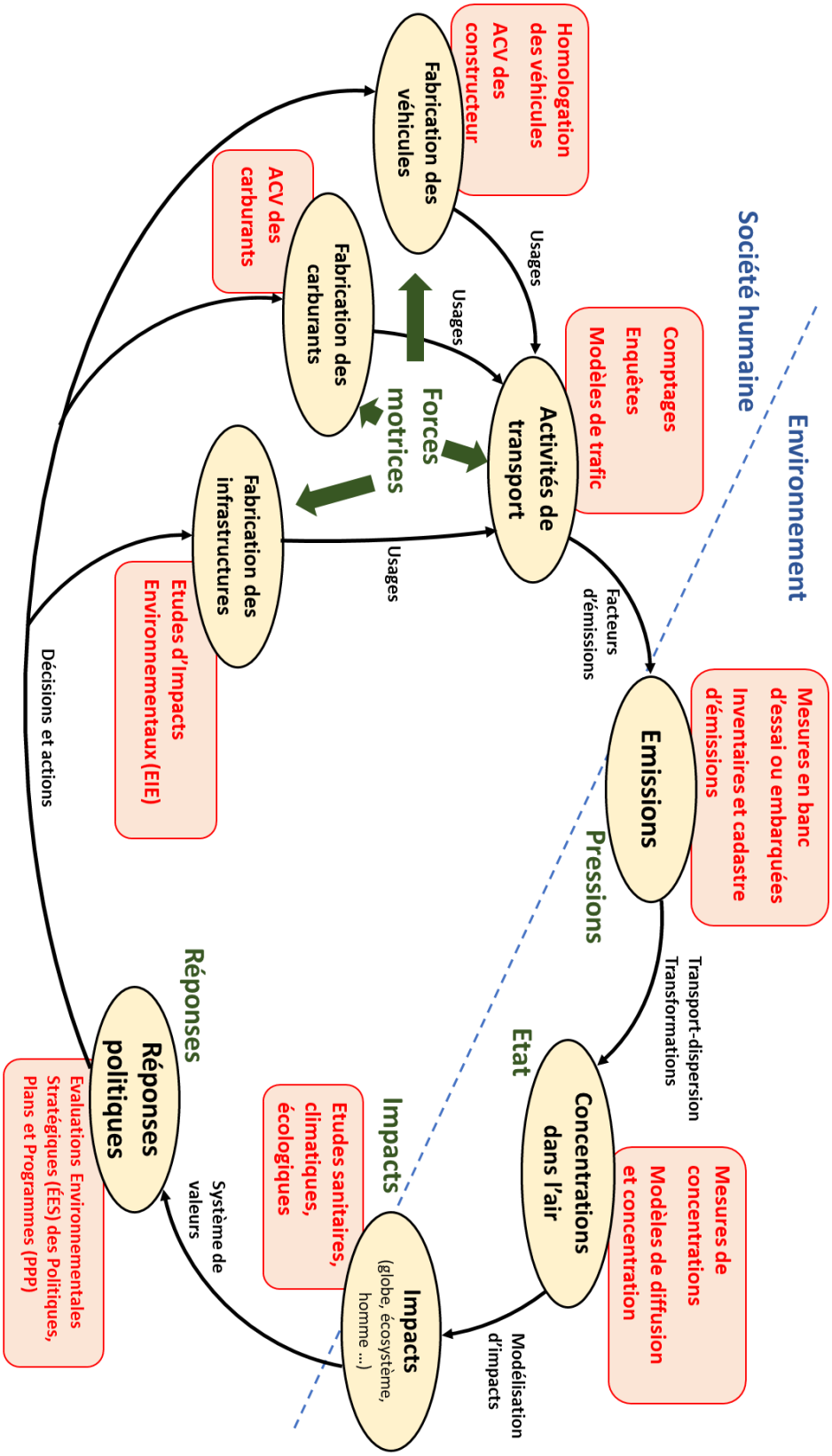
1.3. Mesures et modélisation des mécanismes d'impacts des transports

Du fait des enjeux environnementaux des transports et avec les réglementations adoptées au niveau international, le développement et la mise en œuvre d'outils de mesure et de suivi se sont systématisés. L'objectif de cette sous-partie est de formuler les différents mécanismes d'impacts liés aux transports et de présenter les outils de mesure et de modélisation qui y sont appliqués. Les principaux outils de suivi étant développés pour les polluants atmosphériques, cette sous-partie se focalisera sur les mécanismes liés à la pollution atmosphérique.

1.3.1. Représentation des mécanismes d'impacts de la pollution atmosphérique

La pollution atmosphérique est un enjeu majeur des transports. Elle est à l'origine de différents effets sur l'environnement (réchauffement climatique, santé humaine, écotoxicité) résultants de différents mécanismes d'impacts. Les mécanismes d'impacts de la pollution atmosphérique sont longs et complexes mettant en œuvre des phénomènes environnementaux et physico-chimiques ainsi que des phénomènes liés à la société. Les mesures et les suivis règlementaires de ces impacts reposent sur plusieurs outils de mesure et de modélisation qui se sont largement développés ces dernières années. La Figure I-6 schématise ces mécanismes sous forme d'une boucle incluant les réponses et réactions des politiques face aux problèmes générés sur la société et les technologies mobilisées. Cette boucle reprend la structure FPEIR (*Force motrice*, *Pressions*, *État*, *Impacts*, *Réponses*, DPSIR en anglais) mise en œuvre par l'Agence Européenne de l'Environnement pour ses expertises environnementales (Smeets *et al.*, 1999).

Figure I-6 : Schéma des mécanismes d'impacts des polluants atmosphériques des transports sous la forme du modèle FPEIR (outils de mesures et d'évaluation en rouge)



Source : représentation auteur

- Les *Forces motrices* englobent les changements de la société notamment l'urbanisation, les pratiques de consommation ou les développements technologiques. La mesure et le suivi de cette composante reposent sur des méthodes variées, comme celles de la sociologie, telles que les enquêtes, les recensements ou les entretiens. L'*Enquête Ménages Déplacements* (EMD) est un outil de mesure important des forces motrices des transports.
- Les *Pressions* résultent des forces motrices et représentent, pour la pollution atmosphérique, les émissions atmosphériques. Le suivi des émissions de polluants nécessite la mesure des émissions unitaires des différentes technologies existantes et le recensement des différentes sources sur le territoire pour réaliser un cadastre des émissions.
- L'*État* est influencé par les pressions et décrit la qualité de l'environnement. Pour la pollution atmosphérique, le suivi de l'état de l'environnement consiste à mesurer la concentration en polluants.
- L'état dans lequel se trouve l'environnement a des *Impacts* sur la société influençant la santé humaine, le cadre de vie, engendrant des coûts et des dépenses. Pour la santé humaine, sa mesure s'exprime à travers des études sanitaires en morts par an ou en espérance de vie perdue, sa transposition en coût monétaire est aussi un moyen de mesurer un impact.
- En fonction des impacts, des *Réponses* peuvent être prises pour y remédier et influer sur les forces motrices. Les actions mises en œuvre sont de natures très variées, curatives ou préventives, avec des interdictions, des régulations ou des incitations. Pour la mobilité quotidienne, la mise en place de la circulation alternée, l'installation d'une ZFE (Zone à Faibles Emissions), ou l'agrandissement du réseau cyclable sont des exemples de réponses politiques. La mise en place d'indicateurs de réponses permet de suivre l'avancement des actions engagées, par exemple le nombre de kilomètres de pistes cyclables construites.

La transposition des activités de transports en émissions de polluants repose sur des facteurs d'émissions variables en fonction du type de technologie utilisée et des conditions d'utilisation. À partir des émissions de nombreux phénomènes physico-chimiques (dispersions, transformations, dépôts) interviennent pour déterminer la concentration de polluants dans l'atmosphère (Goger, 2006). En fonction de l'enjeu considéré, différentes lois d'impacts permettent de convertir les concentrations en impacts. Par exemple, pour le réchauffement

climatique, les potentiels de réchauffement globaux (PRG) des gaz permettent de convertir des concentrations en intensité énergétique et en température (IPCC, 2015). Pour la santé humaine, les lois d'impacts sont plus complexes du fait de nombreuses variabilités liées à l'origine du polluant, du temps d'exposition, de la sensibilité des populations présentes (publics âgés ou enfants) (Beelen *et al.*, 2014; Forsberg, 2008; Segersson *et al.*, 2017).

La complexité de l'ensemble des mécanismes d'impacts de la pollution atmosphérique rend la compréhension et la prise de décisions compliquées. Les mesures et les réglementations s'attachent dès lors principalement aux précurseurs, c'est-à-dire aux émissions et à la concentration des polluants dans l'atmosphère, plutôt qu'aux impacts finaux (hausse de la température, mortalité…), notamment au travers des limites ou des quotas d'émissions ou des seuils de concentration avec les seuils de l'OMS (Goger, 2006; OMS, 2006; *Règlement (CE) no 443/2009 du Parlement européen et du Conseil établissant des normes de performance en matière d'émissions pour les voitures particulières neuves*, 2009).

1.3.2. Outils de mesures de la pollution atmosphérique

Cette partie présente deux outils majeurs de mesures de la pollution atmosphérique situés à deux niveaux différents du schéma présenté en Figure I-6. Le premier, avec les bancs d'essai des véhicules, se situe dans la boucle FPEIR au niveau des pressions avec la mesure d'émissions. Le second outil évalue l'état avec la mesure de concentration de polluants.

Bancs d'essai des véhicules :

La mesure sur banc d'essai (ou banc à rouleaux) est un moyen précis de quantifier les émissions de polluants et les consommations de carburants de différents véhicules dans un environnement contrôlé. Ce type de mesure est utilisé principalement à des fins d'homologation de véhicules ainsi que pour les différents reportings d'émissions des pays.

Mise en place depuis plusieurs années, notamment avec l'application de la *Directive 70/220/CEE du Conseil* (1970) sur les exigences en matière de gaz d'échappement des véhicules réceptionnés par les pays membres de l'UE, l'homologation des véhicules exige la

mise en place de dispositif de mesures des émissions atmosphériques. Installé sur le banc d'essai et équipé de capteur, le véhicule simule un ou plusieurs cycles de conduite prédéfinis et standardisés, représentant l'utilisation du véhicule (phases d'accélération, freinages, conduite urbaine ou extra-urbaine). Jusqu'à présent, le principal cycle de conduite utilisé en Europe pour l'homologation est le cycle NEDC (*New European Driving Cycle*), présentant des accélérations linéaires et une grande stabilité de conduite (Joumard *et al.*, 1999). Cependant, avec l'arrivée de nouvelles normes Euro fixant les niveaux d'émissions des véhicules et les récents scandales industriels sur les émissions réelles et les procédures de mesures réalisés par les constructeurs (MEEM, 2016), l'Europe a modifié la procédure de mesure des émissions en utilisant le cycle WLTP (*Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedures*) et en associant des mesures en conditions réelles (*Règlement (UE) 2017/1151 de la Commission relatif à la réception des véhicules à moteur*, 2017). Contrairement au cycle NEDC, le nouveau cycle présente plus d'accélérations plus rapides et moins de régimes stabilisés de conduite, plus proche des conditions réelles de circulation. De plus, trois cycles sont utilisés pour différentes classes de véhicules en fonction de leur rapport puissance/poids. Ces procédures de mesures servent aussi à l'étiquetage des performances environnementales de véhicules (émissions de CO_2 et consommation de carburant) (*Directive1999/94/CE du Parlement Européen et du Conseil concernant la disponibilité d'informations sur la consommation de carburant et les émissions de CO2 à l'intention des consommateurs lors de la commercialisation des voitures particulières neuves*, 1999).

Au niveau national, un inventaire d'émissions des polluants atmosphériques est réalisé pour l'ensemble des secteurs d'activités. Afin de mener à bien le bilan du secteur des transports, des facteurs d'émissions unitaires sont nécessaires pour les différents types de véhicules qui composent le parc de véhicules français (European Environment Agency, 2016). Les facteurs d'émissions sont des coefficients multiplicateurs permettant de connaître les émissions de polluants à partir de la circulation des véhicules. Plusieurs niveaux de précision existent pour les facteurs d'émissions (Tier1, Tier2 et Tier 3) (Ntziachristos *et al.*, 2016). Les facteurs d'émissions sont élaborés lors de campagne de mesures réalisée sur de nombreux véhicules par différents laboratoires. Pour l'élaboration des facteurs d'émissions, le choix du cycle de conduite est un facteur important et de nombreux cycles de conduite plus réalistes que les cycles de normalisation (NEDC ou WLTP) ont été développés au sein des différents laboratoires (André, 2004; André *et al.*, 2006).

La réalisation des bases de données de facteurs d'émissions est complétée par un ensemble de mesures embarquées permettant de quantifier les niveaux d'émissions d'un véhicule en circulation dans un environnement réel. Les différences entre mesures sur bancs d'essai et mesures embarquées sont non-négligeables, notamment avec l'usage de cycles standardisés tels que WLTP (+64 % pour les NO_x et +31 % pour le CO_2) (Kumar Pathak *et al.*, 2016).

Surveillance de la qualité de l'air :

Dans le cadre de la *Directive 2008/50/CE du Parlement européen et du Conseil concernant la qualité de l'air ambiant et un air pur pour l'Europe* (2008), les états membres de l'UE sont chargés de la surveillance de la concentration de polluants sur son territoire afin de respecter les seuils en vigueur (cf. Tableau I-2). Le réseau de surveillance français est organisé en Agences Agrées de Surveillance de la Qualité de l'Air (AASQA) rattachées à chaque région et à un Plan Régional pour la Qualité de l'Air (PRQA). Chaque AASQA est en charge de la mesure, mais aussi de la publication des résultats et de la sensibilisation de la population aux problèmes de la qualité de l'air. Une partie des mesures de polluants est réalisée en continu afin d'alerter la population en cas de forte concentration. Elles concernent les oxydes d'azote (NO_x), les particules PM_{10} et $PM_{2,5}$, l'ozone (O_3) et le dioxyde de soufre (SO_2). D'autres polluants sont aussi mesurés par prélèvements et analyses en laboratoire afin de compléter les bilans de qualité de l'air (Atmo Auvergne–Rhône-Alpes, 2017a). Afin de faciliter la compréhension, un indice agrégé est proposé par les AASQA pour qualifier la qualité de l'air, l'indice ATMO regroupant les NO_x, les PM_{10}, le SO_2 et l'O_3.

Dans la région Auvergne Rhône-Alpes, les 96 stations de mesures réparties sur le territoire permettent de rendre compte de la variété des espaces impactés par différentes sources polluantes (trafic, résidentielle, industrielle, agricole)[14]. Cette répartition spatiale permet d'appréhender les phénomènes de transport et de dispersion des polluants importants pour les polluants atmosphériques. Par exemple, les particules PM2,5 présentes sur le territoire du Grand Lyon sont, pour plus de la moitié, originaires de l'extérieur du territoire de la métropole (DREAL Rhône-Alpes, 2014).

[14] https://www.atmo-auvergnerhonealpes.fr/, consulté le 21 août 2018

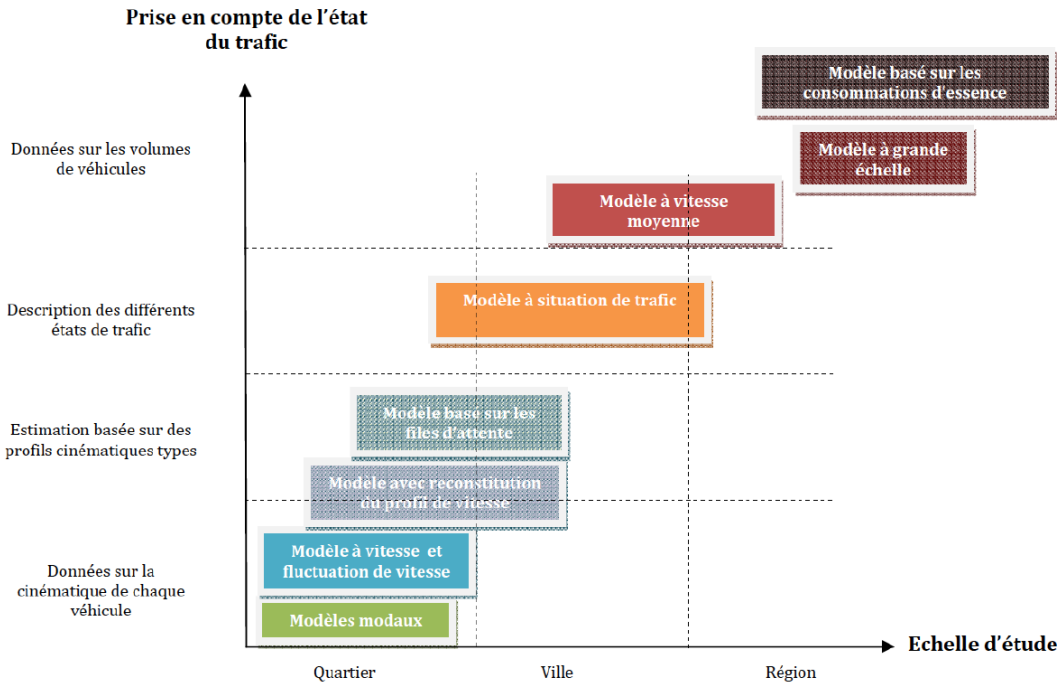
1.3.3. Outils de modélisation de la pollution atmosphérique

Les outils de mesures précédentes fournissent de nombreuses informations par type de véhicules ou par localisation, cependant, la représentation de l'ensemble des étapes du modèle FPEIR de la pollution atmosphérique nécessite une approche systémique possible grâce à la combinaison de différents modèles. La généralisation des mesures sur bancs d'essai à l'ensemble d'un trafic implique l'usage de modèles d'émissions routières, alors que la représentation continue des concentrations de polluants sur un territoire fait appel à des modèles de dispersions et de concentration.

Modèles d'émissions routières :

Les facteurs d'émissions obtenus au cours des mesures effectuées sur les véhicules grâce aux bancs d'essai et aux mesures embarquées constituent la base scientifique des modèles d'émissions. Différents modèles d'émissions existent, et le choix d'un modèle est principalement dicté par le type de modèle de trafic avec lequel il est couplé. Les recueils de données locales sont rarement suffisants pour connaître l'état global du trafic et le recours à un modèle de trafic est nécessaire. Le niveau de finesse du modèle de trafic et du modèle d'émission doit être compatible. Un modèle de trafic à l'échelle macroscopique avec peu de détails utilisera un modèle d'émissions plus général. La Figure I-7 présente les différents types de modèles d'émissions existant ainsi que leurs domaines d'application liés au niveau de connaissance du trafic et de l'échelle d'analyse (Fallah Shorshani, 2014; Lejri, 2015).

Figure I-7 : Classification des modèles d'émissions en fonction de l'échelle d'étude et de la façon de prendre en compte l'état de trafic



Source : Fallah Shorshani, 2014 et Lejri, 2015

Avec un niveau de connaissance faible sur le trafic, il est possible d'utiliser des facteurs génériques qui considèrent un parc automobile moyen et une vitesse de circulation standard (exemple des facteurs de *Bilan GES*[15]). Lorsque la connaissance du trafic et de ses caractéristiques s'améliore, le niveau de finesse sur les facteurs d'émissions peut augmenter, permettant de prendre en compte la carburation, le poids, l'année, la vitesse de circulation (Fallah Shorshani, 2014). Certains modèles sont plus précis, comme HBEFA qui intègre différents cycles de conduites avec des facteurs différents en fonction du type de zone (rurale ou urbaine), du type de voies, de la vitesse autorisée et du niveau de saturation (fluide, chargé, quasi-saturé ou stop&go). Le modèle PHEM est basé sur la cartographie du moteur et détermine les facteurs d'émissions en fonction de la vitesse de rotation du moteur et du couple du moteur, permettant ainsi de modéliser différents régimes d'accélération et de décélération ainsi que d'intégrer la pente de la route ou le chargement du véhicule (Eichlseder *et al.*, 2009). Pour l'ensemble des modèles d'émissions, le bilan d'émissions est obtenu avec la formule suivante :

[15] http://www.bilans-ges.ademe.fr, consulté le 21 août 2018

Émissions [g] =

Facteur d'émissions [g/km] × nb de véhicules [veh] × kilométrage des véhicules [km/veh]

Source : Ntziachristos et al.*, 2014*

Le modèle COPERT permet de caractériser les facteurs d'émissions pour les différents transports routiers à partir des vitesses moyennes de circulation et des caractéristiques du véhicule (carburation, années, taille, système de dépollution). Il intègre les émissions d'échappement, mais aussi les phénomènes d'évaporation des carburants, de surémissions au démarrage à froid ainsi que les émissions non liées à l'échappement (abrasion des freins, des pneus et de la route) (Ntziachristos *et al.*, 2014). Son utilisation est mentionnée par l'Agence Européenne pour l'Environnement (AEE) afin de réaliser les inventaires d'émissions de polluants sur différents territoires (European Environment Agency, 2016). Ce modèle est construit à partir de plusieurs mesures d'émissions de polluants réalisées sur différents véhicules considérant une typologie très large de véhicules ainsi que leur vitesse de circulation, le modèle estime aussi les facteurs de consommation des véhicules routiers. Le modèle COPERT a initialement été conçu pour réaliser des inventaires d'émissions au niveau macroscopique, comme pour les cadastres d'émissions effectués par les AASQA (André, 2015; Atmo Auvergne–Rhône-Alpes, 2017b). Mais la méthodologie de COPERT peut être réutilisée au niveau des tronçons avec par exemple le développement de CopCETE[16] utilisé notamment pour la réalisation des Diagnostics Energie Émissions des Mobilités (DEEM) basés sur les EMD (Fallah Shorshani, 2014; Verry & Hivert, 2014). Malgré un niveau de détail plus faible que les modèles PHEM ou HBEFA, le modèle COPERT est le plus fréquemment utilisé pour les analyses à l'échelle d'une agglomération ou au-delà.

[16] https://www.cerema.fr/fr/actualites/copcete-outil-calcul-emissions-du-trafic-routier, consulté le 21 août 2018

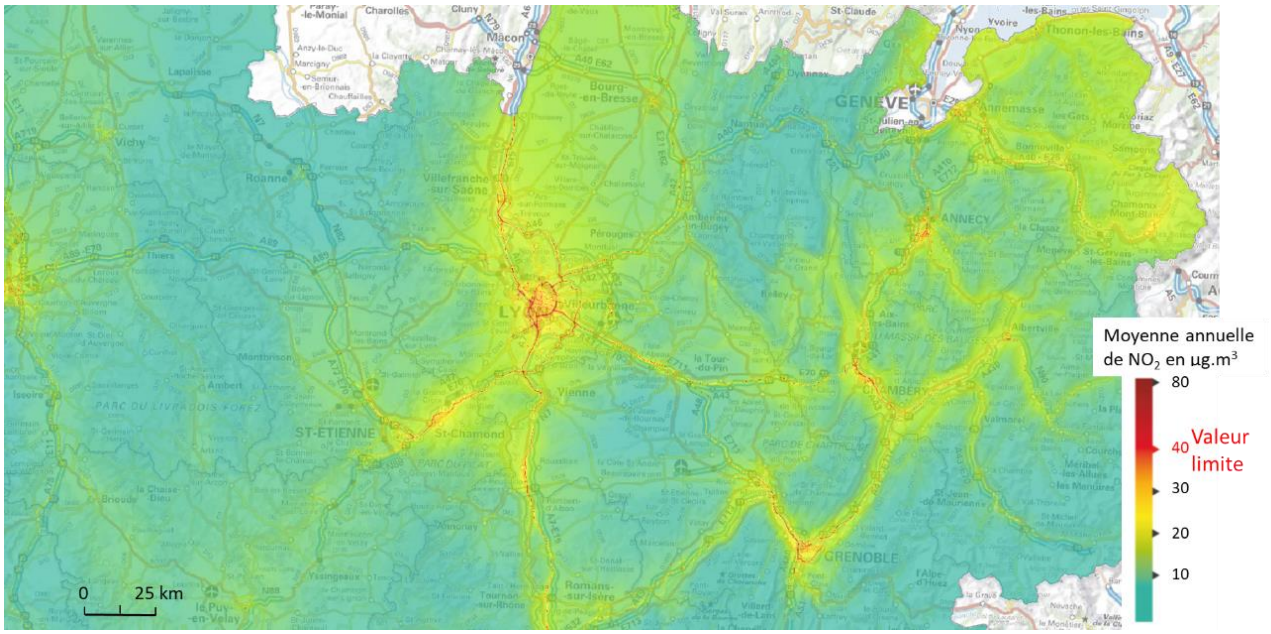
Modèles de dispersion et concentration :

Les concentrations de polluants sont mesurées de façon discrète sur le territoire grâce aux différentes stations de mesures mises e, œuvre par les AASQA. La connaissance sur l'ensemble du territoire nécessite donc l'usage de modèles prenant en compte les phénomènes de dispersion et de transport ainsi que les phénomènes de transformations chimiques des polluants. Les stations de mesures fournissent une partie des données nécessaires aux modèles de dispersion, la spatialisation des sources polluantes des différents secteurs d'activités constitue l'entrée principale des modèles. Les modèles peuvent être affinés en ajoutant des données relatives aux conditions météorologiques, à la disposition des bâtiments et à la topologie (Fallah Shorshani, 2014; Michelot *et al.*, 2015).

Les modèles de dispersion reposent sur les équations de la mécanique des flux, et la méthode mise en œuvre dépend du niveau de détail souhaité et de l'échelle d'étude. Les approches Eulérienne ou Lagrangienne sont recommandées à des échelles régionales et continentales. Pour une échelle locale, une approche Gaussienne est appropriée dans le cas de situation uniforme alors que les approches « street-canyon » basées sur la CFD (C*omputational Fluid Dynamics*) sont plus à même de modéliser des géométries complexes, notamment avec des bâtiments en zone urbaine, mais ont des temps de calculs plus longs. Le choix du modèle dépend donc de divers paramètres tels que la taille du territoire étudié, la présence d'obstacle (bâtiments, montagnes…) et de la disponibilité des données (Fallah Shorshani, 2014; Pourtier *et al.*, 2007).

Les AASQA disposent de modèles de dispersion pour réaliser des cartes de concentration de polluants (cf. Figure I-8). ATMO Auvergne–Rhône-Alpes, l'AASQA de ladite région, utilise principalement le modèle de dispersion WRF, qui est principalement Eulérien, pour son territoire (Atmo Auvergne–Rhône-Alpes, 2014; Pillai *et al.*, 2012). Pour des échelles d'analyses plus fines comme en milieu urbain, l'utilisation d'autres modèles est nécessaire notamment le modèle SIRANE, pouvant aller à une résolution de 10 m. Il peut ainsi être mis en œuvre sur des territoires plus petits et plus urbains comme le territoire du Plan de Protection de l'Atmosphère (PPA) de Saint-Étienne de 2008, couvrant 22 communes (AMPASEL, 2011).

Figure I-8 : Concentration moyenne annuelle de NO2 pour la région Auvergne Rhône-Alpes en 2017



Source : ATMO Auvergne Rhône-Alpes

L'utilisation des modèles de concentration et les choix méthodologiques sont à adapter en fonction des situations analysées et du niveau d'expertise en la matière. Quel que soit le modèle choisi, les résultats seront dépendants de la qualité des données d'entrée et des configurations du modèle. Son usage reste donc limité, faisant ainsi de la modélisation de dispersion un outil complémentaire à la mesure, et non un substitut, permettant de caractériser la qualité de l'air (Michelot *et al.*, 2015).

Conclusion de la partie 1

Les enjeux environnementaux des transports ont été très documentés depuis plusieurs années. Cette revue de littérature révèle un large spectre d'impacts environnementaux pour lesquels le secteur des transports est impliqué significativement et nuit à l'ensemble des cibles finales (hommes, faunes, flores, milieux naturels, ressources, climat). Ces impacts couvrent à la fois un spectre temporel étendu, allant de l'impact immédiat (le bruit) à des impacts à long terme (réchauffement climatique), souvent irréversibles (ressources métalliques), ainsi que des échelles spatiales variées, allant du local au global.

Les évolutions temporelles des impacts environnementaux montrent le poids des transports pour atteindre les différents objectifs environnementaux dont la France s'est engagée à tenir. L'atteinte du facteur 4 en 2050 en matière de GES, le respect des seuils de l'OMS en matière de pollutions locales ou encore le développement des énergies renouvelables font partie de ces enjeux dans lesquels le secteur des transports est en retard et révèle l'urgence des actions à mettre en oeuvre.

Cependant, l'élargissement du périmètre d'étude sur les phases du cycle de vie des transports, telles que la production des véhicules et des carburants ou la construction des infrastructures, questionne la durabilité environnementale de solutions technologiques vantant certains gains environnementaux. Les exemples des véhicules électriques et des agrocarburants sont deux situations où des transferts d'impacts ont lieu, notamment avec la fabrication des véhicules et la production électrique pour le premier et les activités agricoles pour le second.

Face aux enjeux environnementaux et politiques, les méthodes de mesures et de modélisation se sont développées pour mieux comprendre les mécanismes d'impacts qui interviennent entre la source polluante et les cibles. Pour la pollution atmosphérique, les systèmes de capteurs et de mesures permettent de contrôler la qualité des véhicules vendus ainsi que la qualité de l'air du territoire. Les outils de modélisations ont été développés en revanche pour permettre des applications à plus grande échelle notamment pour des inventaires territoriaux de polluants avec les modèles d'émissions ou pour estimer la qualité de l'air d'un territoire avec les modèles de dispersion et concentration.

La quantification des enjeux environnementaux présentés dans cette partie, ainsi que la problématique du périmètre d'étude et des outils de mesures, ne constituent que la partie avale de l'évaluation environnementale des transports. La partie amont consiste à quantifier le niveau de performance des transports dont le but est de permettre la mobilité des personnes du territoire étudié.

Partie 2 : La mobilité quotidienne au cœur de l'aménagement du territoire

« Penser la mobilité, c'est la penser à diverses échelles pour essayer de comprendre les contradictions qui minent notre histoire. » (Augé, 2009, p. 85)

« *Le miracle du cyclisme refait de la ville une terre d'aventure ou, tout du moins, de voyage… La bicyclette devient ainsi le symbole d'un avenir écologique pour la ville de demain et d'une utopie urbaine qui réconcilierait la société avec elle-même.* » (Augé, 2008, p. 10)

Avec l'accroissement de la circulation des personnes (voyages, migrations, déplacements quotidiens), des marchandises et de l'information, représenter et comprendre la mobilité (ou surmobilité) est devenu un enjeu pour la recherche en sciences humaines et sociales (Pineau, 2010). La notion polysémique de « mobilité » partage les chercheurs en fonction de l'approche qu'ils privilégient (sociale, spatiale, économique …). Ainsi les nouveaux rapports de la société aux espaces, aux temps, aux autres et à soi-même bousculent les différentes représentations existantes de la mobilité. De nombreuses formes de mobilités se dessinent, hypermobilité, immobilité, mobilité lente… (Gallez & Kaufmann, 2009; Sansot, 1999)

L'objectif de cette partie est de présenter certains des regards portés sur la mobilité pour introduire l'objet d'étude de cette thèse qui est la mobilité quotidienne et urbaine de personnes. Du fait des enjeux environnementaux évoqués dès l'introduction, nous avons concentré spatialement notre regard en mettant un focus sur le cadre urbain et plus spécifiquement sur celui du système urbain dont les spécificités seront présentées. La relation entre mobilité quotidienne et forme urbaine sera aussi traitée dans cette partie afin d'en appréhender les dimensions structurelles et fonctionnelles.

2.1. Une notion polysémique pour une approche systémique

L'objectif de cette sous-partie est d'apporter les éléments généraux sur la notion de mobilité et de présenter notre objet d'étude spécifique qu'est la mobilité quotidienne et urbaine de personnes. L'étude de cette dernière met en œuvre différents outils de mesures, qui seront exposés, et inclut des objets tels que les individus et les territoires. Les composantes spatiales, technologiques, mais aussi sociales et économiques font ainsi de la mobilité quotidienne un objet d'évaluation systémique plus large que celui des transports.

2.1.1. Un objet, des regards

Le sens du terme « mobilité » fait référence à la propriété d'un corps plutôt qu'à son action, « *Propriété, caractère de ce qui est susceptible de mouvement, de ce qui peut se mouvoir ou être mû, changer de place, de fonction* »[17]. Ainsi la mobilité va au-delà de la simple réalisation d'un déplacement physique, mais inclut aussi les mouvements au sein d'espaces sociaux (évaluation familiale, de carrière, de statut social) (Urry, 2005). On distingue ainsi deux types de mobilités, la mobilité sociale et la mobilité spatiale (Gallez & Kaufmann, 2009).

Les sociologues qui analysent la mobilité sociale portent leur attention principalement sur le fonctionnement et les transformations du système social, sans forcément s'intéresser à la relation à l'espace. Ils étudient les trajectoires d'individus, « ascension » ou « descente » sociale, situation familiale, appartenance politique ou orientation professionnelle, et l'influence de l'environnement social sur ces dernières (Urry, 2005). Un certain nombre de travaux sur la mobilité sociale différencient clairement les changements sociaux des déplacements pendulaires quotidiens qui, par leur stabilité temporelle, s'opposent à la notion de mobilité au sens social (Grafmeyer & Joseph, 1984).

[17] Mobilité, *Larousse.fr - Dictionnaires.* Accessible à : http://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/mobilit%C3%A9/51890 [consulté le 5 avril 2018].

La notion de mobilité spatiale, vue par les géographes et les sciences de l'aménagement met en revanche en retrait l'analyse des changements sociaux et privilégie l'aspect spatial des mouvements devenu central avec l'essor de l'automobile dans les années 50 et 60 (Orfeuil, 2000). Le développement de la science des trafics va favoriser la mise au point des outils et des modèles de circulation qui, avec le développement des outils numériques, vont devenir de plus en plus précis et fins aux niveaux spatial et temporel pour décrire les divers flux de transports. Dans le même temps, on observe l'essor du domaine de la socioéconomie des transports qui s'affaire principalement à l'évaluation de projets d'infrastructures de transports. L'essor de ce domaine va aussi développer ses propres outils et modèles afin d'estimer la demande de déplacements (Gallez & Kaufmann, 2009).

La mobilité spatiale est dès lors partitionnée en quatre formes de mobilité, se différenciant par leur temporalité et leurs périmètres spatiaux. La *mobilité quotidienne* se caractérise par une temporalité courte et ses déplacements sont contenus à l'intérieur du bassin de vie. La *mobilité résidentielle* se réalise sur une temporalité longue à l'intérieur du bassin de vie. La mobilité liée aux *voyages* et celle liée aux *migrations* s'effectuent en revanche sur un périmètre allant au-delà du territoire vécu avec respectivement une temporalité courte et une temporalité longue. Les interactions entre ces quatre formes de mobilités sont multiples même si elles ont été, dans un premier temps, traitées séparément par les chercheurs (Gallez & Kaufmann, 2009).

Alors que les approches étaient initialement cloisonnées entre mobilité spatiale et sociale et entre temporalité de court et long terme, l'analyse de la mobilité est aujourd'hui de plus en plus systémique, car la mobilité quotidienne est à la fois le résultat des interactions sociales de la ville et en même temps la condition pour le développement urbain. Les premiers modèles de circulation et d'économie, basés sur l'hypothèse d'un état d'équilibre, vont progressivement s'ouvrir aux approches sociales, tournées vers l'individu, pour aller vers des approches désagrégées plus à même de capter les spécificités individuelles et territoriales de la demande de déplacements. Cette ouverture de la mobilité sur l'urbanisme va permettre aux modèles de mobilité quotidienne et aux modèles d'interaction transport-urbanisme de s'ouvrir à des temporalités plus longues permettant le développement de réflexions prospectives (Gallez & Kaufmann, 2009; Massot *et al.*, 2000; Wiel, 2004).

2.1.2. Définition et représentations de la mobilité quotidienne des personnes

Afin de quantifier et d'évaluer les impacts de la mobilité quotidienne des personnes, il est nécessaire de définir cet objet et de présenter les dispositifs de mesures existants. La majeure partie des études de quantification de la mobilité quotidienne proviennent du domaine de la socioéconomie des transports qui a pendant de nombreuses années développé différents dispositifs techniques de quantification qui se sont ensuite diffusés au sein d'autres champs de recherche (Orfeuil, 2000). Quatre grands dispositifs de quantifications sont aujourd'hui utilisés pour quantifier la mobilité quotidienne : les *comptages* et les *enquêtes* qui s'intéressent à la mobilité présente, la *modélisation* qui prévoit la mobilité future et l'*évaluation économique* qui chiffre les coûts et les bénéfices d'un investissement (Commenges, 2013).

- Le *comptage* est le dispositif de quantification le plus ancien. Il quantifie la circulation et les flux, soit sur une route pour en connaître son efficacité et son usure, soit sur un périmètre afin de mesurer les entrées et sorties. Plus récemment, la géolocalisation via GPS permet une nouvelle forme de comptage. Porteurs d'information sémantique limitée, les comptages sont des sources quantitatives importantes souvent utilisés pour vérifier et calibrer les enquêtes et les modèles.
- Les *enquêtes* sont des dispositifs de quantifications qui, contrairement aux comptages qui se focalisent sur le trafic et les infrastructures de transports, s'intéressent aux individus et à leurs déplacements. Qu'il s'agisse d'une enquête en face à face, par téléphone ou par internet, ce dispositif quantifie principalement le couple origine-destination des déplacements des individus interrogés ainsi que les modes et les motifs des déplacements. En France, l'Enquête Nationale Transports et Déplacements (ENTD), ainsi que les Enquêtes Ménages Déplacements (EMD) réalisées dans les grandes agglomérations, se sont largement enrichies en information quantitative à la fois sur les déplacements et sur les individus interrogés. Ces données sont utilisées principalement pour construire des modèles prévisionnels de mobilité aidant à planifier de nouvelles infrastructures de transports.
- La *modélisation* est initialement un dispositif de prévision de trafic basé sur le principe de modélisation à quatre étapes : la génération de déplacements qui estime la quantité de déplacements émis et attirés par la population et les activités de chaque zone du

territoire ; la distribution des déplacements qui va répartir spatialement l'ensemble des déplacements générés par les zones en fonction des poids de chaque zone (nombre de déplacements émis ou attirés) et des distances entre chacune des zones ; le choix modal qui va déterminer les modes de transports utilisés pour relier chacune des zones entre elles ; et l'affectation sur les réseaux qui répartit l'ensemble des déplacements en fonction de leur mode sur les différents chemins possibles. La modélisation peut être utilisée pour une meilleure planification des systèmes de transports ou en complément de modèle d'usage du sol.

- L'*évaluation économique* est un dispositif de quantification monétaire qui rend compte principalement de l'efficacité d'une infrastructure de transports. En s'appuyant sur les notions de coût généralisé et rentabilité collective, l'évaluation économique met en comparaison des éléments monétaires (investissements) et non monétaires (tels que le temps gagné ou les accidents évités) pour juger de l'intérêt des choix d'investissements d'infrastructure ou de services de transports.

Dans un but de quantification et afin de garder une vision systémique, nous définissons la mobilité de personnes comme l'ensemble des déplacements relatifs aux activités des individus. La mobilité quotidienne fait ainsi référence aux déplacements liés aux activités habituelles et routinières des individus pendant la semaine, comme le travail, les achats, les loisirs ou encore les déplacements liés aux études. La mobilité urbaine restreint spatialement le périmètre d'étude en se focalisant sur un espace urbain et ses activités (Raux & Andan, 1988). La mobilité quotidienne et urbaine des personnes limite l'étude sur trois dimensions en considérant uniquement les activités « *banales* » en milieu urbain pour les individus. Son équivalent pour les marchandises est la logistique urbaine qui repose sur des mécanismes différents du fait de la nature des flux. Dans les propos qui suivront, la définition de la mobilité quotidienne des personnes reprend celle présentée précédemment qui la définit comme **« l'ensemble des déplacements liés aux activités habituelles des individus et réalisés au sein d'une agglomération et de son territoire d'influence »**. Cette définition exclut certains déplacements quotidiens tels que les mouvements de grands pendulaires qui viennent des zones urbaines éloignées et qui sont de plus en plus nombreux avec les modes de transports rapides (TGV, avion).

Une des difficultés de l'approche systémique pour la mobilité quotidienne et urbaine des personnes est de garder le lien entre le déplacement et l'individu. En France, les EMD, qui étaient initialement centrées sur les déplacements, ont évolué pour décrire de plus en plus

précisément les individus interrogés (Commenges, 2013; Orfeuil, 2000). D'un côté, la notion de déplacement se caractérise par les lieux d'*origine* et de *destination* où se réalisent les activités, définissant le *motif* du déplacement, ainsi que par l'*horaire* et le ou les *modes de transport* utilisés pour effectuer le déplacement. Les modes de transport se différencient entre eux par leurs caractères individuels ou collectifs, motorisés ou non, et plus spécifiquement par les technologies mises en œuvre. Les aspects spatiaux et physiques des déplacements seront nécessaires à l'évaluation des impacts environnementaux de la mobilité (Orfeuil, 1996).

De l'autre côté, l'individu participe grandement à la caractérisation de la mobilité en apportant la dimension sociale, évitant d'assimiler mobilité avec déplacement. Chaque individu se caractérise par des traits et paramètres personnels ainsi que par l'environnement (social, culturel, économique…) dans lequel il évolue (Kaufmann *et al.*, 2004). En partant de l'individu, qui est l'unité la plus fine, plusieurs niveaux d'analyse sont utilisés, regroupant différents types d'individus et élargissant spatialement leur environnement : le ménage, le quartier, la commune, l'établissement public de coopération intercommunale (EPCI), la division territoriale (département, région), l'État. Chaque niveau d'agrégation et de représentation est décrit par des variables socio-économiques spécifiques qui soulèvent et permettent d'explorer des problématiques différentes telles que la richesse nationale ou le cycle de vie des individus, etc... Les aspects territoriaux et sociaux liés au regard porté sur les individus permettront d'explorer certains déterminants de la mobilité et de ses impacts.

Ces différents regards et dispositifs de quantification de la mobilité quotidienne des personnes sont nécessaires à son étude systémique, qui s'ouvre sur l'individu et son territoire. Des objets de natures différentes (spatiale, sociale, économique, technologique…) entrent en relation pour définir cette mobilité. Le regroupement de ces liaisons constitue ainsi le « système urbain », sur lequel nous reviendrons plus tard (cf. §2.2.2).

2.2. Les mécanismes de la mobilité quotidienne de personnes

En partant du constat que la mobilité quotidienne est à la croisée de plusieurs dimensions, cette sous-partie présentera le système urbain dans lequel s'intègre la mobilité quotidienne et urbaine. Après avoir décrit le cadre urbain évolutif délimitant la mobilité, les différentes composantes du système urbain et leurs relations seront résumées. La relation entre la mobilité quotidienne et la forme urbaine sera par la suite détaillée en présentant les mécanismes en jeu pour les différentes échelles spatiales du territoire.

2.2.1. Qu'est-ce que l'urbain ? :

La ville représente un enjeu mondial de premier plan puisque plus de la moitié de la population mondiale actuelle vit en ville et la croissance démographique urbaine continue, portée principalement par l'urbanisation dans les pays en développement (United Nations *et al.*, 2014). La ville est caractérisée par une concentration de populations et d'entreprises, offrant ainsi des opportunités de mises en relation extrêmement riches et variées. La structure même de la ville permet à ces échanges d'être mieux organisés avec des services de transport, de communication et d'information plus efficaces et mieux articulés qu'en milieux diffus favorisant l'apparition de réseaux sociaux et économiques comme des réseaux d'entreprises (Derycke, 1999; Pouyanne, 2004). Les échanges qui ont lieu entre les acteurs urbains sont créateurs de valeurs économiques et sociales, ils s'organisent et s'intensifient autour de la forme urbaine qui aménage la proximité, car « *c'est la proximité qui rend la ville si intéressante* » (Huriot, 1998).

La forte croissance démographique urbaine actuelle résulte de deux principaux phénomènes, avec d'un côté le développement interne des villes, qui attirent la population et les activités aboutissant à de plus grandes densités, et de l'autre la métropolisation des villes liée à l'expansion des limites urbaines du fait des interactions de plus en plus nombreuses qui s'effectuent entre la zone urbaine et l'extérieur (Wiel, 1999). La taille et le périmètre du système

urbain sont donc en perpétuels changements, remettant en question la possibilité de délimiter spatialement un système urbain.

Lévy souligne cette problématique de la limite de l'espace urbain lorsqu'il dit « *l'urbain est partout, mais il y a plusieurs espèces d'urbain* » (Lévy, 2004). Différents types d'espaces urbains résultant de mécanismes divers sont présents dans les zones urbaines. Historiquement pédestre et souvent délimitée par un mur d'enceinte, la ville est un lieu de concentration et de proximité permettant de réduire les coûts de transport de biens et le développement des échanges commerciaux. Les forces de concentration et d'agglomération sont majoritaires. Le développement du transport ferroviaire au cours du XIXe siècle va permettre aux villes de sortir de leurs murs et de s'étaler le long des lignes ferroviaires. Les distances parcourues sont plus longues, les échanges commerciaux interurbains s'accélèrent et l'urbanisation autour des gares s'intensifie (Hoffman & Felkner, 2002). L'équilibre entre force de concentration et force de dispersion commence à s'inverser avec la diminution des coûts de transports (Krugman, 1996).

Les coûts de transports vont continuer à baisser avec la diffusion de l'automobile, renforçant encore les effets des forces de dispersion. La généralisation des modes motorisés individuels et des infrastructures routières va permettre à la ville de s'étendre de façon diffuse sur un territoire de plus en plus étendu (Dupuy, 1999b). Le rejet de la ville-centre et des désagréments liés à sa concentration amplifie l'extension urbaine illustrant le processus de « *concentration-débordement* » qui peut être subdivisé en deux phases, la suburbanisation et la périurbanisation. La suburbanisation commence dans les années 70 et touche fortement et rapidement les zones à proximité immédiates du centre urbain avec le développement de grands ensembles, de lotissement ou de zones industrielles (Enault, 2003). La périurbanisation, qui fait suite, concerne les communes plus éloignées, auparavant rurales, devenues accessibles et dont les activités et les modes de vie ont changé pour devenir plus connectés au centre principal. Le faible coût du foncier permet différentes formes de développement dans ces zones : le prolongement de villages existants avec des zones spécifiques ou des lotissements, la densification des centres des villages, le mitage et la dispersion de maisons isolées, la création de villes nouvelles. On assiste ainsi à l'étalement urbain.

Avec la métropolisation et l'étalement urbain, les limites de la ville se dissolvent, ce qui soulève la question de l'évaluation du système urbain. L'INSEE définit plusieurs niveaux d'urbain, l'unité urbaine, l'agglomération urbaine, l'aire urbaine. Cette dernière étant définie *comme 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 des communes attirées par celui-ci[18]. Le nombre d'aires urbaines, ainsi que leurs tailles, évolue avec le temps. En 2008, avec cette définition, les aires urbaines françaises représentaient près de la moitié du territoire métropolitain (46,1 %) et plus de 80 % de la population (82,6 %). Certaines des aires urbaines se regroupent en aires métropolitaines, qui se définissent par leurs tailles (500 000 habitants) et par la présence de fonctions métropolitaines, il en existe 12 en France (Brutel, 2011) : Paris, Lyon, Marseille, Lille, Toulouse, Bordeaux, Nice, Nantes, Strasbourg, Rennes, Grenoble et Montpellier.

2.2.2. Le système urbain

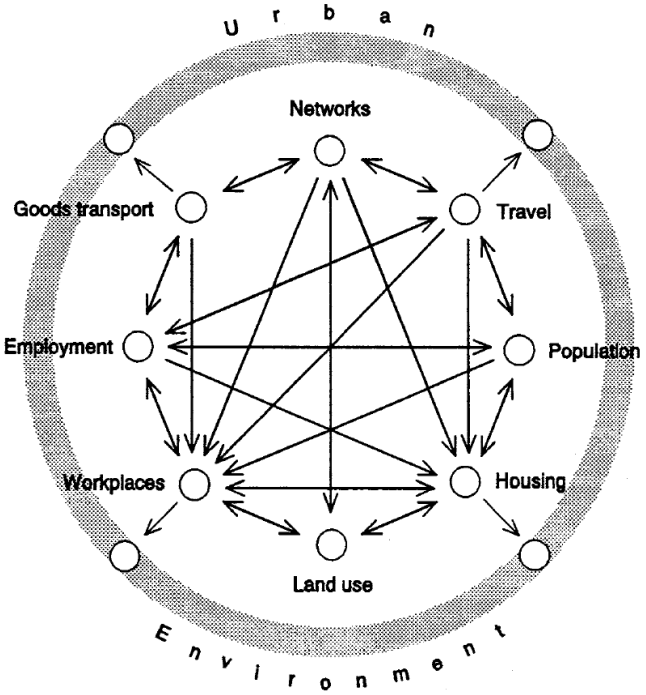
Si le système urbain se définit en fonction de l'intensité des relations et interactions entre les différents agents, sa délimitation spatiale devient discutable. Un périmètre trop resserré du système urbain réduirait le nombre d'interactions prises en compte, c'est d'ailleurs pour cela que l'INSEE a modifié sa définition d'une aire urbaine en 2010 afin d'introduire une condition sur les zones d'emplois qui joue un rôle important dans le système urbain et définit le bassin de vie de chaque individu. Le système d'activités des individus est en effet un des trois grands sous-systèmes constituant le système urbain tel qu'il est proposé par Bonnafous et Puel (1983) avec : le sous-système de « *pratiques et relations sociales* », le sous-système de « *localisation* » et le sous-système de « *déplacements* ». Chaque modification d'un sous-système interfère avec les deux autres, provoquant des répercussions en chaines. La mobilité urbaine se trouve aussi à l'interface de ces trois sous-systèmes qui influencent respectivement le motif, la localisation et le mode des déplacements des individus.

Wegener et Fuerst (2004) vont plus loin dans la décomposition du système urbain avec huit sous-systèmes distincts : les réseaux, l'occupation du sol, les zones d'emploi, les zones de résidence, l'emploi, la population, le transport de marchandises et les déplacements de personnes (Figure I-9). Cette nomenclature plus fine permet de mieux différencier les temporalités des sous-systèmes de localisation et de transport de Bonnafous et Puel :

[18] Aire urbain, définition de l'INSEE, Accessible à https://www.insee.fr/fr/metadonnees/definition/c2070 [consulté le 5 avril 2018]

- Des changements très lents, dépassant le siècle, pour les réseaux et l'occupation du sol. Les différents réseaux urbains (transport urbain, eau, électricité, communication) conditionnent la structure de la ville et restent plusieurs décennies (la problématique est aujourd'hui de les entretenir). Les contraintes d'occupation du sol sont fortes en ville et rarement modifiées.
- Des changements lents, de plusieurs décennies, pour les zones d'emploi et de résidence. La construction de logements et d'entreprises dure souvent suffisamment longtemps pour voir passer plusieurs propriétaires et locataires.
- Des changements rapides, de l'ordre de l'année, pour l'emploi et la population. Le marché de l'emploi varie continuellement, des secteurs économiques croissent, d'autres dépérissent ou se relocalisent. De même, les ménages évoluent et changent de lieu de résidences en fonction de leurs opportunités.
- Des changements immédiats pour le transport de marchandises et les déplacements de personnes. Considérés par certains comme très stables (Grafmeyer & Joseph, 1984), les déplacements de marchandises et de personnes sont sujets en temps réel à l'ensemble des perturbations du système de transports (congestions, travaux).

Figure I-9 : Représentation du système urbain

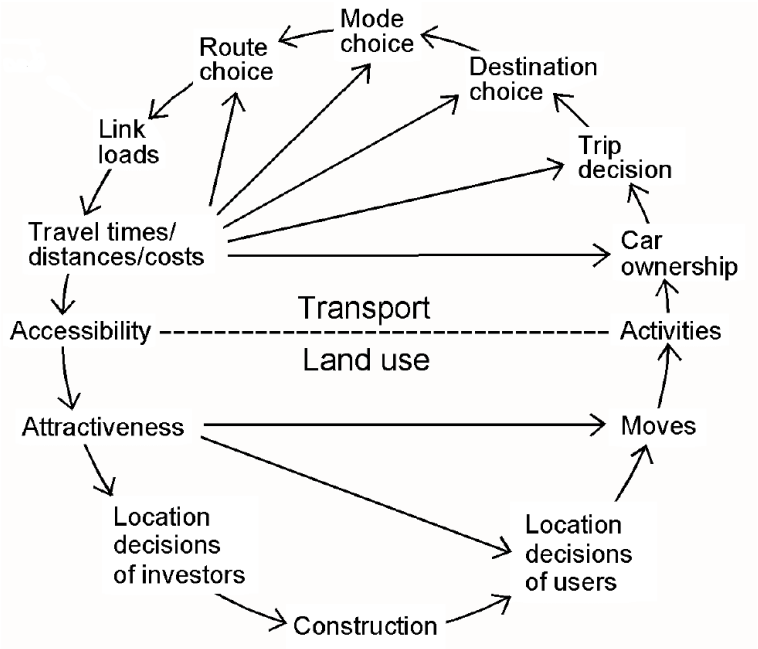


Source : Wegener et Fuerst, 2004

Ces huit sous-systèmes seraient aussi selon les auteurs en interactions avec un autre sous-système, le sous-système de l'environnement urbain qui définit le cadre de vie social ou environnemental urbain. Il est affecté par l'ensemble des autres sous-systèmes et il influence les choix de localisation. Cependant, la temporalité de ce système est complexe, car il couvre l'ensemble du spectre temporel, de l'immédiat, avec le bruit, au très long terme, avec le réchauffement climatique. De plus, la relation entre le système urbain et son environnement n'est pas symétrique. En effet, le système urbain impacte l'ensemble de l'environnement alors que seulement certains paramètres environnementaux ont une influence notable sur le système urbain (Lautso *et al.*, 2004; Wegener & Fürst, 2004).

Les interactions entre les sous-systèmes de localisation et de transport ont été et sont encore largement étudiées, car elles sont au centre des attentions des aménageurs et des politiques publiques sur les questions de choix de localisation et de mobilité des acteurs privés du territoire. Les relations entre usages du sol et pratiques de mobilité sont décrites à travers la boucle de rétroactions de Wegener et Fürst (2004) (Figure I-10).

Figure I-10 : Boucle de rétroaction usage du sol - système de transport



Source : Wegener et Fuerst, 2004

Dans cette représentation, le système de transport et le système de l'occupation du sol interagissent par le biais de la notion d'accessibilité et de la localisation des activités et des agents sur le territoire. L'accessibilité représente le potentiel d'interaction de chaque agent du territoire (population et établissements) en fonction des capacités de déplacements qu'offre le

système de transport. Elle est dépendante des modes de transports et des réseaux de transports disponibles pour l'agent et des conditions de déplacements (congestion) (Geurs & Ritsema van Eck, 2001). L'accessibilité est à l'interface entre le système de transport et le système de localisations, car le niveau d'accessibilité des agents ou des territoires va impacter les processus de construction, de relocalisation et de prix immobilier, modifiant la localisation des agents sur le territoire (mesure de l'accessibilité). La localisation des agents est aussi à l'interface entre le système de localisation et le système de transport puisque l'implantation des agents sur le territoire va générer des déplacements qui vont déterminer le niveau d'accessibilité en fonction du système de transport.

Le développement de technologies de transport joue un rôle dans cette boucle, car elles influencent les temps de déplacements. Wiel (2004) montre d'ailleurs que la vitesse fait gagner, non pas en temps, mais en espace et en productivité. Par exemple, le développement de l'automobile, par sa flexibilité et sa rapidité, a amélioré l'accessibilité des zones périphériques, favorisant ainsi la construction et le développement résidentiel dans ces zones. Les zones périphériques génèrent de plus en plus de déplacements dont le seul choix de transport est la voiture. Avec l'augmentation des vitesses de déplacement et d'échange, les interactions se font sur un territoire de plus en plus étendu, s'affranchissant de la notion physique de proximité (Dupuy, 1999b). En effet en suivant la « loi de Zahavi », selon laquelle les déplacements sont réalisés pour un budget-temps stable dans le temps et à travers le monde, si la vitesse de déplacement augmente, la distance parcourue va croitre, favorisant l'étalement urbain (Zahavi & Ryan, 1980). Afin d'enrayer la boucle vicieuse poussant à la périurbanisation, les politiques publiques mettent en place des actions de régulation du système de transport et de l'usage du sol (Acharya & Morichi, 2007).

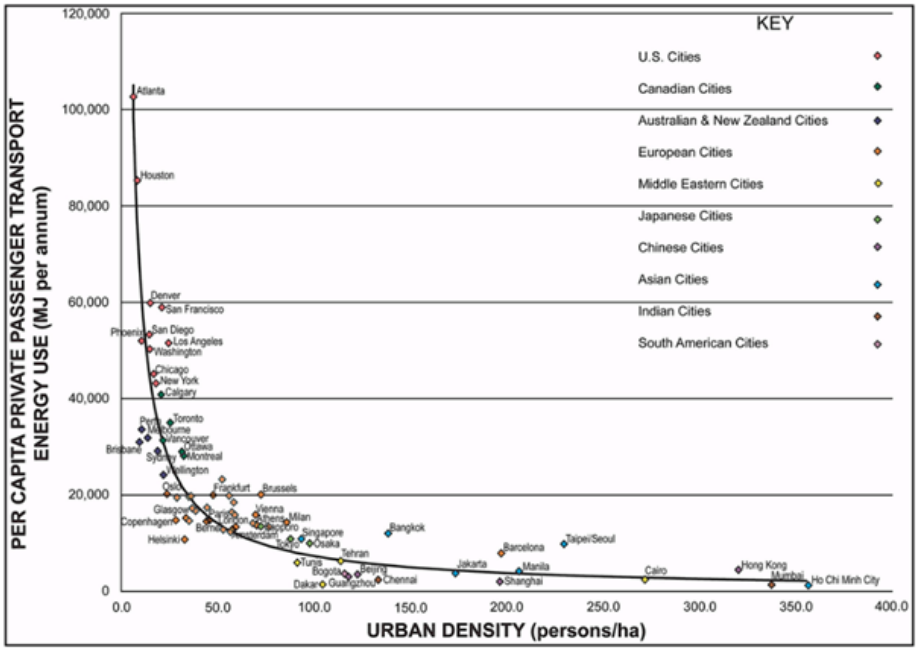
2.2.3. La forme urbaine :

La forte relation entre le système de transport et l'usage du sol souligne l'argument selon lequel les problèmes de transport ne se résoudront pas par une simple amélioration du management du transport pour une meilleure circulation. Les aménageurs et urbanistes considèrent les problèmes de circulation comme des symptômes d'une maladie qui trouve son origine dans l'organisation spatiale et temporelle des activités. À partir de ce constat, de nombreux courants d'aménagement se sont répandus comme les courants « *New Urbanism* », « *Neotradionnal planning* » et « *Transit-Oriented Development* » (Banister, 2012; Crane,

1995). Chacun de ces courants propose des formes urbaines dont les objectifs sont de favoriser les modes alternatifs à la voiture et la mobilité locale tout en préservant un bon niveau d'accessibilité.

Afin d'appuyer les différents courants urbanistiques, de nombreuses études empiriques ont été réalisées pour faire le lien entre forme urbaine et mobilité quotidienne. L'étude la plus souvent citée afin de justifier la densification des villes est la courbe de Newman et Kenworthy (1999), qui relie la consommation énergétique du transport avec la densité dans différentes villes du monde (Figure I-11). La forme exponentielle décroissante montre clairement que les fortes densités réduisent la consommation des transports, mais aussi que les villes faiblement densifiées nécessitent énormément d'énergie pour leurs mobilités. Cette courbe est une preuve empirique d'une interdépendance entre mobilité et forme urbaine. Cependant, il serait beaucoup trop simpliste d'en tirer un lien de causalitédirect entre densité urbaine et consommation énergétique. Il y aurait plutôt une coproduction entre la mobilité et l'usage du sol, se traduisant par l'absence d'un état stable de l'urbain, où dynamisme territorial et marché de déplacements sont associés et non indépendants (Aguilera *et al.*, 2004; Jonas, 2015; Wiel, 1999).

Figure I-11 : Densité et consommation individuelle d'énergie pour 46 villes (données 1990)



Source : Newman et Kenworthy, 1999

De nombreuses études statistiques se sont intéressées à la corrélation entre mobilité et forme urbaine en prenant en compte une variété de plus en plus importante de paramètres pour décrire la morphologie urbaine. Dans un premier temps, Cervero et Kockelman (1997) proposent de décrire la forme urbaine en suivant trois grandes dimensions, 3D : Density, Diversity et Design, qui regroupent les différents paramètres décrivant la densité, la mixité et la diversité d'usage des sols ainsi que des paramètres associés aux orientations lors de la conception des quartiers (taille et longueur des trottoirs, nombre de cul-de-sac, densité de blocs, présence de piste cyclable, largeur des voies de circulation…). Par la suite, de nouvelles dimensions ont été introduites augmentant le nombre de paramètres. Ewing et Cervero (2001, 2010) élargissent ainsi le 3Ds à 7Ds avec l'accessibilité à la destination, la distance au transport en commun, la gestion de la demande et la démographie. Cette multiplication des paramètres permet une meilleure description de la forme urbaine, mais cette complexité du système rend aussi son appréhension moins évidente. En effet, les paramètres urbains ne sont pas indépendants les uns des autres, rendant des liens possibles de causalités difficilement identifiables (Stead & Marshall, 2001), d'autant plus que la mobilité quotidienne possède aussi différentes dimensions. La distance, le temps, la fréquence, le mode et l'énergie constituent ainsi les cinq principales variables descriptives de la mobilité quotidienne de personnes, même si l'on trouve d'autres variables liées aux risques de la mobilité (mortalité routière) (Smart Growth America, 2014) ou encore à l'activité physique (Handy, 2005). La multiplication de variables explicatives pour la mobilité permet de nuancer les conclusions, car les caractéristiques de la forme urbaine influencent différemment chaque paramètre de la mobilité.

En plus des différentes dimensions permettant de décrire la forme urbaine, les paramètres varient avec les différentes échelles d'analyse, allant de l'échelle locale d'un quartier ou d'un bâtiment, qui peuvent disposer d'installation spécifique comme un local à vélo, à l'échelle régionale pour les grandes aires urbaines avec notamment la répartition des pôles urbains. En fonction de la focale spatiale d'analyse, les enjeux de mobilité diffèrent et les outils politiques changent. Le découpage spatial utilisé dans les études est central, car les résultats sont variables en fonction du zonage considéré, rendant les comparaisons entre les villes difficiles et les conclusions difficilement généralisables (Aguilera & Mignot, 2007).

Paramètres globaux :

À une échelle globale, la taille de la ville est un paramètre important pour déterminer la mobilité. Schwanen *et al.* (2002) montrent que la distance et le temps de déplacement en voiture pour aller travailler sont allongés par la taille de la ville. En effet, dans les grandes villes, le bassin d'activité est étendu et son niveau d'équipement est souvent élevé, avec des transports rapides (voies rapides, TGV). L'effet structurant que fournit ce type de système de transport contribue à la croissance de la ville et à une meilleure accessibilité régionale et nationale. Grâce aux économies d'échelles, certaines activités et certains services apparaissent dans les grandes villes spécifiquement, car ils sont devenus rentables avec le nombre d'habitants et d'activités présents, mais certains coûts seront plus importants par habitant comme le coût foncier, le coût de la vie et certaines déviances peuvent être renforcées comme la ségrégation sociale (Bouzouina, 2008; Bretagnolle, 2003; Paulus & Pumain, 2011; Sassen, 1996). Le paramètre de taille de la ville est difficilement interprétable du fait des différents mécanismes économiques et sociaux qu'il influence, de plus il s'agit d'un paramètre avec peu de contrôle puisque la hiérarchie des villes est relativement stable dans le temps. Les grandes villes attirant les innovations et les investissements, elles renforcent leurs forces d'agglomération (Gordon & Lee, 2013).

Au niveau d'une aire urbaine, d'autres paramètres permettent de décrire la forme urbaine, comme la densité globale et la mixité de l'aire urbaine. La centralité de la ville est aussi un paramètre important d'une forme urbaine à cette échelle, car elle représente le poids du centre urbain dans l'aire urbaine par rapport aux nombres d'activités et de populations qui se trouvent au centre. Une forte centralité a pour effet de favoriser l'usage des transports en commun dans le centre. Ce paramètre permet donc de nuancer la simple notion de densité et de décrire une partie de la répartition spatiale. Par exemple, la ville de Los Angeles a une forte densité moyenne, mais sans réel centre dominant et l'on observe une utilisation importante de l'automobile (Litman, 2015). D'autres indicateurs portent sur la répartition spatiale comme le degré de clustering qui décrit la proximité des zones denses entre elles, permettant de décrire des situations où plusieurs nœuds d'urbanisation seraient présents. Ces différents paramètres régionaux se révèlent souvent plus influant que ceux d'échelles inférieures sur la mobilité, notamment la distance moyenne au centre.

Un paramètre disponible à l'échelle globale, et fortement influant sur la mobilité, est l'accessibilité moyenne qui résulte de la disposition sur le territoire des activités et de la

population ainsi que de l'efficacité du système de transport à mettre en relation les différents territoires. Il est fortement corrélé avec d'autres variables de forme urbaine puisqu'il est le résultat de la distribution spatiale, du design urbain avec les tracés des réseaux de transports et de la vitesse de systèmes de transports (Le Néchet, 2010). Les observations de Enault (2003) (2003) montrent d'ailleurs que le gain d'accessibilité lié à l'amélioration de la vitesse des systèmes de transports réduit le gradient de densité de la ville et repousse ses limites.

La distribution spatiale des activités et des logements joue un rôle important dans le système urbain et certaines agglomérations présentent des situations de déséquilibre important entre la localisation des logements et des activités avec une faible mixité amenant à des trajets domicile-travail longs. La mobilité pendulaire domicile-travail est au cœur de beaucoup d'études de forme urbaine, à la fois pour des raisons de données disponibles, mais aussi parce qu'il s'agit d'une mobilité très stable, structurante pour les autres déplacements quotidiens des actifs et fortement créatrice de longs déplacements motorisés. Cette approche fonctionnaliste de la mobilité permet de décrire différentes typologies de forme urbaine et de mobilité pendulaire (Schwanen *et al.*, 2002) :

- « *centralized* » : les emplois sont surtout situés dans le centre urbain et les résidents périurbains se rendent dans le centre de la ville.
- « *decentralized* » : les emplois sont plutôt en périphérie et une partie des résidents du centre voyagent vers l'extérieur de la ville.
- « *cross-commuting* » : les résidents du centre travaillent principalement au centre et les résidents des banlieues travaillent dans les différents pôles d'emploi périphérique.
- « *exchange commuting* » : les résidents du centre travaillent en périphérie alors que les résidents extérieurs travaillent principalement dans le centre.

Les différentes incohérences spatiales (spatial mismatchs) qui peuvent apparaitre entre logements et activités ont été repensées dans un modèle de « *ville cohérente* » où les actifs sont relocalisés près de leurs emplois leur permettant de moins utiliser leurs voitures (Korsu *et al.*, 2012).

Les débats sur la forme urbaine globale portent principalement sur les alternatives à la ville étalée et aux mécanismes d'aménagement à mettre en place pour freiner l'étalement urbain, car ce dernier est perçu comme étant à l'origine de pertes dans les domaines économique, social, mais aussi environnemental avec des dégradations de la qualité de vie (Travisi *et al.*, 2010). Une part des pertes économiques provient du coût supérieur des

infrastructures et des services publics, tels que l'éducation, le traitement de l'eau et de déchets, dans un milieu épars avec de faibles fréquentations (Burchell, 1992; Persky & Wiewel, 2000). L'étalement urbain consomme aussi beaucoup de surface, artificialise des terrains qui avaient des vertus agricoles et/ou environnementales (Transport Research Board, 1998) auxquels se rajoutent les impacts négatifs dus à une mobilité dépendante de l'automobile et des énergies fossiles. Même si certains urbanistes défendent une idée libérale du développement urbain qui conduit à l'étalement, les modèles de ville compacte et de ville polycentrique sont au centre des débats, et certaines instances européennes préconisent la compacification des zones urbaines (Conseil de l'Europe *et al.*, 2009; European Environmental Agency *et al.*, 2006). Les politiques locales françaises encouragent également la compacification par le biais des documents de planification tels que les Schémas de Cohérence Territoriaux (SCoT) ou les Plans Locaux d'Urbanisme (PLU) (Nantes Saint-Nazaire Pôle Métropolitain, 2016).

En mettant certaines politiques et réglementations en place, le modèle de la ville compacte vise à redensifier les villes grâce notamment à un meilleur remplissage urbain et une rénovation de quartiers. Cette densification aurait pour effet de réduire les distances de déplacement et l'utilisation de la voiture au sein de l'agglomération. Une forme urbaine plus dense rend les transports en commun plus efficaces grâce à une meilleure couverture démographique et une faible différence de vitesse avec la voiture (Camagni *et al.*, 2002). Cette volonté de réguler l'évolution de la forme urbaine a aussi pour but de freiner les « *boucles vicieuses* » qui poussent à la périurbanisation, pour les transformer en « *boucles vertueuses* » favorables à la densification. En effet, plus l'utilisation de la voiture est importante, moins les transports en commun sont utilisés affectant les possibilités de travailler sur leur développement et réduisant ainsi leur qualité de service, favorisant ainsi en retour l'usage de la voiture. De même, l'augmentation de l'utilisation de la voiture, qui favorise la liberté de déplacement et le choix de résidence, va encourager la périurbanisation. Or les zones périurbaines sont moins bien desservies en transports en commun, peu efficaces sur ces territoires, ce qui favorise, là encore, la voiture. La densification des villes va permettre, à l'inverse, d'augmenter la fréquentation et la qualité des transports en commun nécessaires à l'abandon de la voiture (Acharya & Morichi, 2007; Appert, 2004). Cependant, cette densification ne serait possible que jusqu'à un certain niveau, au-delà duquel le « *town cramming* » (bourrage urbain) pourrait nuire au développement urbain et renforcer la périurbanisation (Camagni *et al.*, 2002).

Gordon et Richardson, favorables au modèle de ville étalée et diffuse, montrent d'ailleurs que les mesures de régulation visant à densifier les villes sont souvent inefficaces face aux

forces de dispersion qui alimentent l'étalement urbain. En effet, aujourd'hui, la vie en périphérie avec un jardin et une maison individuelle est appréciée de la majorité de la population, représentant un idéal social. De plus, la périurbanisation n'est pas que résidentielle. Le centre-ville perd des emplois au profit de la banlieue et de la périphérie notamment dans le cas des activités de stockage, de distribution et de « back-office ». Cet étalement conjoint des résidences et des activités pourrait a priori réduire le temps de déplacement. De plus, les coûts de transport et de communication étant relativement faibles, les coûts supplémentaires de transport et de communication dus à l'étalement urbain ne suffisent pas à contraindre la périurbanisation et les mesures de régulation faites sur les coûts deviennent moins efficaces (Gordon & Richardson, 1997). Les infrastructures routières construites jouant un rôle très structurant pour la ville et sa mobilité, la présence généralisée de routes sur l'ensemble du territoire est vectrice d'étalement urbain. Cet héritage structurel souligne à la fois la forte inertie des villes actuelles qui ont des difficultés à contrer les tendances, mais aussi le faible intérêt pratique des études décrivant des systèmes nés ex-nihilo qui sont très éloignés de la réalité (Antoni *et al.*, 2015; Giannopoulos & Curdes, 1992; Le Néchet, 2010).

Les formes urbaines polycentriques sont caractérisées par la présence de plusieurs pôles d'attractivité reliés entre eux par un réseau de transport rapide et efficace. Il existe plusieurs types de formes urbaines polycentriques. Par exemple en France, la métropole lilloise (Lille, Roubaix, Tourcoing, Villeneuve-d'Ascq) est une aire urbaine polycentrique avec quatre centres relativement équivalents, alors que la métropole d'Aix-Marseille est duo-centrique. En revanche, l'aire urbaine de Lyon est monocentrique, car elle ne dispose pas d'un deuxième pôle majeur (Aguilera & Mignot, 2007). La présence de plusieurs nœuds d'urbanisation du modèle polycentrique est une alternative à la ville compacte, évitant de surdensifier un seul centre qui serait sujet à des problèmes de congestion avec des coûts fonciers élevés. Cependant, le caractère polycentrique n'est pas nécessairement gage de mobilité plus courte ou de report modal. En effet Le Néchet (2010) montre sur plusieurs villes d'Europe que la consommation énergétique augmente lorsque l'aire urbaine est polycentrique. Cependant, ce résultat défavorable au polycentrisme n'est pas généralisable, d'autres études présentent des résultats plus mitigés (Schwanen *et al.*, 2004).

Paramètres locaux :

Pour la forme urbaine globale, la densité, la mixité et le degré de polycentrisme représentent les trois dimensions (densité, diversité (mixité) et design) proposées par Cervero & Kockelman (1997) pour une mobilité soutenable. Les autres dimensions de la forme urbaine sont plus rarement représentées à l'échelle régionale, au contraire des échelles plus locales où elles jouent de manière sensible sur la mobilité quotidienne. Le courant d'aménagement « *New Urbanism* » privilégie l'approche plus locale afin de créer des quartiers attractifs avec une mobilité durable moins dépendante de l'automobile (Crane, 1995).

Au niveau des quartiers, voire des bâtiments, les dimensions de densité, de mixité et de design sont encore présentes, mais le design occupe à cette échelle une place importante avec un large panel de paramètres : largeur de voirie, de trottoir, arborescence, densité et taille des blocs d'immeuble, présence de cul-de-sac, nombre d'intersections… Le courant *New Urbanism* focalise son approche au niveau de l'individu et redéfinit une hiérarchie au sein des différents modes de transports avec une préférence pour les modes actifs, les transports en commun et enfin seulement les modes individuels motorisés. Ainsi, un intérêt particulier est porté au tracé des voies piétonnes et cyclables afin de rendre les déplacements de ces modes plus faciles et concurrentiels avec les déplacements automobiles.

La notion d'accessibilité aux aménités ainsi qu'aux modes de transports collectifs est centrale à l'échelle locale et est directement reprise par les penseurs du *Transit Oriented Development* (TOD), qui s'intéressent à l'aménagement centré autour des gares et des nœuds de transport en commun. Les quartiers adjacents aux gares deviennent des lieux de vie avec divers services et activités accessibles en mode doux, favorisant ainsi localement les modes doux et, pour les longues distances, les transports en commun (Calthorpe, 1993). Ce type d'aménagement et de planification urbaine s'oppose par ses aspects locaux, multifonctionnelles et concertés entre aménagement et transport à l'aménagement de la ville automobile où les voies de circulation découpent des secteurs « franchisés » monofonctionnels (exemples des lotissements, des technopôles, des parcs de loisirs…) (Dushina *et al.*, 2015). Dans ce modèle automobile, la distance et les coupures, induites par le réseau viaire, sont des freins aux relations sociales qui appellent au « retour à la rue » et à « l'urbanisme de tracé » en opposition à la « rue-corridor » et à « l'urbanisme de secteur » (Charmes, 2006; Mangin, 2004). En fonction des choix d'aménagement et de tracés réalisés, différents types de quartiers se dessinent, avec par exemple des quartiers orientés piétons ou transports en commun qui génèrent moins de

déplacements et de distances en voitures ou des quartiers traditionnels orientés voiture avec la présence de culs-de-sac (Newman & Kenworthy, 1999).

La gestion dans les quartiers des systèmes de transports est également un facteur important pour l'aménagement local. Ici aussi, une hiérarchie entre les modes est établie avec pour objectif d'apaiser la circulation routière. La logique traditionnelle de fluidification des flux automobiles, avec les vagues vertes par exemple, fait place, dans les quartiers orientés piétons ou transports en commun, à des mesures contraignantes, rallongeant le temps de transport en voiture, avec les zones 30 ou la priorité piétonne et des transports publics aux intersections. La disponibilité de stationnement est aussi un aspect important de la gestion locale de la demande de déplacement automobile, car les politiques récentes de réduction du nombre de places de stationnement par surface de résidence ou d'entreprise découragent la possession et l'utilisation de la voiture. L'influence du prix du stationnement influe beaucoup la mobilité, principalement en diminuant les taux de possession de véhicules (Banister, 2008).

L'analyse de la mobilité pendulaire représente la majeure partie des études sur les interactions entre territoire et mobilité des dernières années pour des raisons de disponibilité de données (recensements de la population et des entreprises) et parce qu'elle représente la part la plus importante de déplacements mesurés en distance. Cependant, avec l'augmentation du nombre d'activités, la mobilité pendulaire tend à se diluer de plus en plus parmi toutes les autres mobilités (Schwanen *et al.*, 2004). Mais l'étude statistique de tous ces types de déplacements devient vite complexe, car beaucoup de déplacements sont combinés entre eux pour créer des chaines avec plusieurs motifs. Par exemple, Lee et al. (2005) ont estimé qu'aux États Unis qu'environ 37 % des déplacements sont rattachés à une chaine de déplacements et mettent en avant la difficulté à interpréter les mobilités par motifs. Contrairement aux déplacements pour le travail qui ont lieu principalement pendant les jours ouvrés, beaucoup de déplacements impliquant un autre motif sortent du périmètre d'étude de la mobilité quotidienne, mais s'insèrent dans le périmètre de la mobilité de week-end et de vacances avec des logiques et des temporalités différentes. Des effets compensatoires entre mobilité quotidienne et de week-end surviennent, comme « *l'effet barbecue* » où les habitants du périurbain, qui se déplacent sur de plus grandes distances en semaine que les urbains centraux, limiteraient leurs déplacements en week-end pour profiter de leur habitation et des alentours (Orfeuil & Soleyret, 2002).

***

De la riche littérature sur la thématique des interactions entre mobilité et forme urbaine, il ressort une coconstruction entre les deux plutôt qu'une simple relation de causalité. De plus, en fonction de l'échelle à laquelle la mobilité est analysée, les paramètres de forme urbaine influents et à considérer changent. Ainsi, l'analyse de la mobilité au sein d'un quartier est fortement influencée par des paramètres locaux comme le design ou l'accessibilité, alors que l'analyse de l'aire urbaine dans son ensemble montre une plus forte dépendance de la mobilité à des paramètres globaux tels que la densité ou le degré de polycentrisme (Milakis *et al.*, 2015). La recherche d'une mobilité soutenable est donc le résultat d'une complémentarité entre actions locales et actions globales sur la forme urbaine.

2.2.4. Les autres déterminants de la mobilité

Si nous considérons avec Bonnafous et Puel (1983) que le système urbain dans lequel s'insère la mobilité quotidienne de personnes est composé de trois grands sous-systèmes, alors les interactions entre le système de transport et le système d'usage du sol, qui ont été présentées dans le point précédent sur la forme urbaine, ne représentent qu'une partie d'une système urbain. Il reste à s'intéresser au rôle du système des pratiques et des relations sociales et à son influence sur la mobilité quotidienne de personnes.

En décrivant le fonctionnement de la société, avec l'organisation sociale et le déroulement des activités, ce sous-système apporte des éléments essentiels sur le fonctionnement et l'évolution du système urbain et de sa mobilité. Les rythmes urbains de la vie quotidienne, qui cadencent la mobilité quotidienne, résultent des différents mouvements de la société (Bailly & Heurgon, 2001). Ainsi, les évolutions des relations sociales, du système économique et de la consommation (de biens, d'espace et de temps) façonnent de nouveaux modes de vie, habitus et besoins de mobilité pour les différentes couches sociales, catégories socio-professionnelles et classes d'habitants. L'intégration de ce troisième sous-système urbain révèle aussi un nouveau type de pouvoir, complémentaire aux approches d'urbanisation, de régulation et d'investissement des sous-systèmes de localisation et de déplacements, liés à la représentation des besoins des habitants pris en compte notamment grâce aux diverses politiques démocratiques et représentatives (Bonnafous & Puel, 1983).

Tout comme la relation d'interdépendance entre mobilité et usage du sol, les facteurs socio-économiques influencent, et sont influencés, par la mobilité. Les différents facteurs socio-

économiques sont fortement corrélés les uns avec les autres ce qui rend les analyses complexes avec des effets cumulatifs (Stead & Marshall, 2001). Les facteurs socio-économiques, qui décrivent des modes de vie différents, peuvent s'exprimer à différents niveaux d'échelle par agrégation, allant de l'individu jusqu'à l'aire urbaine.

Au niveau d'une aire urbaine, le PIB par habitant est souvent utilisé pour comparer les villes entre elles : le niveau de richesse global influence significativement le taux de possession de véhicules, qui augmente directement la part modale et la distance parcourue en voiture. À l'échelle plus fine des individus et des ménages, le revenu est aussi significatif, mais de nombreux autres paramètres permettent d'enrichir les analyses : l'âge, la taille du ménage, le nombre d'actifs, la catégorie socioprofessionnelle. Certaines études montrent que les facteurs socio-économiques influent plus sur la mobilité quotidienne que la forme urbaine (Handy, 1996; Hanson, 1982). D'autres études sont plus mitigées en détaillant les résultats pour différents paramètres de mobilité. Ewing et Cervero (2001) montrent par exemple que la fréquence de déplacements est d'abord dépendante du facteur socio-économique alors que la distance dépendrait plus fortement de la forme urbaine. En revanche, les deux types de facteurs auraient un impact équivalent sur le choix modal.

Le système de triple dépendance entre mobilité, forme urbaine et classes socio-économiques est complexe, et chaque variation d'un élément va perturber les deux autres. Cependant, la complexité est plus importante au niveau individuel, car une variable aléatoire liée à la préférence est à rajouter dans le système. Les préférences personnelles (« self-selections »), qui reflètent les goûts et les habitudes, jouent un rôle dans le choix de mobilité, principalement le choix modal, et dans le choix de résidence (Ewing & Cervero, 2010; Naess, 2012). Une personne avec une préférence pour la marche va favoriser un quartier qui satisfera son appétence pour ce mode. Avec l'arrivée de la voiture et l'individualisation des mœurs, un « *habitus automobilis* » s'est développé dans la société, traduisant l'intégration de l'automobile dans les habitudes et le système de valeur de la société (Vrain, 2003). Cependant, la place de la voiture dans la mobilité quotidienne tend à diminuer ces dernières années notamment auprès des jeunes générations dont leur rapport à la voiture change (Vincent-Geslin *et al.*, 2017). Afin d'améliorer les comportements de mobilité, certains programmes, comme TravelSmart et IndiMark, ont expérimenté l'impact d'une campagne de persuasion sur le changement volontaire d'habitudes de déplacement comme l'abandon de l'automobile. Pour les échantillons de ménages ciblés, les outils de persuasion et d'information de ces programmes ont réussi à réduire la part modale de l'automobile entre 5 et 15 %. Grâce à une approche plus participative

et personnelle, ces programmes de changement volontaire atteignent de bons résultats pour réduire la part modale de l'automobile sans coûts d'infrastructure supplémentaires (Ampt, 2003; Brög *et al.*, 2009; Seethaler, 2004).

Conclusion de la partie 2

Ces dernières années avec les enjeux sociaux, économiques et environnementaux qu'elle représente, la mobilité est devenue un sujet d'étude pour de nombreux champs disciplinaires qui portent des regards différents en fonction de l'approche choisie (l'espace, le temps, la société, la technologie…). La mobilité quotidienne et urbaine de personnes possède aussi cette multidimensionnalité mettant en relation les individus et son territoire par le biais de liens économiques, sociaux, technologiques.

Incluse dans le système urbain, la mobilité quotidienne est ainsi en relation avec les trois sous-systèmes urbains, le système de « *localisation* » et le système des *« pratiques et relations sociales »* et le système des « *transports* » (Bonnafous & Puel, 1983). Chacun de ces sous-systèmes reposant sur des mécanismes différents, le système urbain apparait comme un système complexe régit par des interactions de natures et de temporalités très diverses. Malgré des bases théoriques et empiriques développées depuis plusieurs décennies, la modélisation et la compréhension des phénomènes urbains demeurent un champ scientifique ouvert en perpétuelle mutation qui se heurte aux différents paradoxes de la mobilité de la société actuelle (Orfeuil, 2000; Wegener, 1994; Wilson, 2014).

La délimitation du cadre urbain fait partie des contradictions de l'étude de la mobilité urbaine, car *« l'urbain est partout »* (Lévy, 2004). En effet, sous l'impulsion des phénomènes de métropolisation et d'étalement urbain, qui repoussent les limites d'interactions des zones urbaines, les frontières de l'urbain sont dynamiques et évoluent perpétuellement (Wiel, 1999). Afin de disposer d'un cadre d'analyse cohérent de la ville, l'INSEE propose des définitions d'espaces urbains, comme l'aire urbaine.

Bien que la mobilité quotidienne et urbaine de personnes repose sur un système de relations complexes, de nombreuses études se sont intéressées à la relation entre la forme urbaine et la mobilité. Il ressort de cette littérature abondante que les paramètres structurels (polycentrisme, design routier…), mais aussi fonctionnels (mixité fonctionnelle, accessibilité aux aménités…) de la forme urbaine influencent la mobilité, et cela de façon différente en fonction de l'échelle d'analyse (Cervero & Kockelman, 1997; Ewing & Cervero, 2001). De plus, les relations entre forme urbaine et mobilité se jouent dans les deux sens, comme le montre la boucle de rétroaction Figure I-10 (Wegener & Fürst, 2004).

L'implication du cadre socio-économique dans la caractérisation de la mobilité des personnes est centrale du fait du rôle déterminant que les caractéristiques socio-économiques des individus jouent sur les relations sociales et les pratiques de mobilité (Ewing & Cervero, 2001; Handy, 1996; Hanson, 1982). Tout comme la forme urbaine, le cadre socio-économique entretient un lien symétrique avec la mobilité et dessine ainsi un triangle de dépendance avec la forme urbaine, le cadre socio-économique et la mobilité. Cette triple dépendance, dont aucune des parties n'est négligeable, est le résultat du système urbain et elle montre la richesse de l'étude de la mobilité quotidienne et urbaine de personnes. L'évaluation de cet objet nécessite donc d'une part une approche systémique afin de saisir les principaux mécanismes en œuvre, mais aussi une délimitation de l'échelle d'analyse de la mobilité afin de retenir la représentation du système urbain la plus adéquate.

Synthèse et question de recherche

La revue de littérature présentée dans ce chapitre expose les interactions que la mobilité quotidienne des personnes entretient avec l'environnement et avec le système urbain. Ces deux interactions relèvent de disciplines scientifiques éloignées mobilisant des objets de recherche différents.

D'un côté, la littérature environnementale dépeint la place centrale de la mobilité et des transports pour de nombreux enjeux environnementaux avec des échelles temporelles allant de l'immédiat au long terme (plusieurs siècles) ainsi que des échelles spatiales partant du local jusqu'au global. Certains de ces enjeux sont fortement documentés avec des enjeux politiques importants notamment sur le réchauffement climatique, l'énergie et la pollution atmosphérique. Cependant, d'autres enjeux environnementaux sont à surveiller avec la mise en place de nouvelles motorisations électriques et d'agrocarburants, notamment sur les ressources métalliques ou pour l'occupation du sol.

La place stratégique qu'occupe le secteur des transports pour la protection de l'environnement, du fait de sa forte contribution et des tendances récentes, amène à plus de contrôle, de vigilance et de suivi. Les transferts d'impacts observés pour les véhicules électriques et les agrocarburants soulignent l'intérêt d'élargir le périmètre d'analyse environnementale sur les phases antérieures et postérieures à l'usage des véhicules notamment sur la fabrication et recyclage des véhicules, la production des carburants et les infrastructures de transports. Les exigences règlementaires pour ce qui concerne l'homologation des véhicules neufs, mais aussi en matière de concentration de polluants, ont contribué à la généralisation de certaines méthodes de mesures (bancs d'essai, station de qualité de l'air) et de modélisation qui permettent de meilleures représentations des mécanismes d'impacts des transports.

De l'autre côté, la littérature en aménagement urbain révèle la mobilité comme une notion polysémique et multidimensionnelle au croisement de nombreux domaines scientifiques (sociologie, économie, géographie, socio-économie des transports…). La mobilité quotidienne et urbaine de personnes ne se limite donc pas à la seule notion de déplacement et d'usage des transports, mais renvoie aux individus ainsi qu'aux territoires et aux interactions sociales et économiques qui se produisent. La mobilité quotidienne de personnes fait partie d'un système urbain regroupant les différentes interactions qui ont lieu dans le cadre urbain. Les mutations

de ces interactions modifient le cadre et les frontières de l'urbain questionnant la possibilité de délimiter spatialement un espace urbain.

Parmi les interactions urbaines, les relations entre mobilité quotidienne et formes urbaines ont été richement documentées, et révèlent une forte interdépendance. C'est-à-dire que les caractéristiques de la forme urbaine, qu'elles soient locales ou globales, influencent la mobilité quotidienne et en retour les caractéristiques de mobilité influencent la forme urbaine. La cadre socio-économique interagit aussi de façon symétrique avec la mobilité et invite ainsi à adopter une approche systémique pour traiter de la mobilité quotidienne des personnes.

Question et hypothèses de recherche

Ce premier chapitre d'état de l'art a permis de présenter les principaux mécanismes de la mobilité quotidienne de personnes qui ont lieu dans la société actuelle. Elle apparait au cœur des nombreux enjeux et débats environnementaux avec un ensemble de dispositifs de mesures et de réglementations (Partie 1). La mobilité quotidienne est aussi une composante centrale du système urbain porteuse d'enjeux sociaux et économiques liés au développement de la société urbain (Partie 2). Cette position déterminante de la mobilité a conduit les scientifiques de diverses disciplines à concevoir des méthodes d'analyse et des modèles permettant à la fois une meilleure compréhension des phénomènes environnementaux des transports ainsi qu'une meilleure connaissance du fonctionnement de la mobilité quotidienne de personnes.

Malgré le lien d'interdépendance existant entre le niveau de mobilité et le niveau d'impacts environnementaux, peu de recherches croisent les méthodes et théories des sciences de l'environnement appliquées aux transports et celles de sciences urbaines pour proposer une approche systémique des enjeux environnementaux de la mobilité quotidienne et urbaine des personnes. Ainsi, de ce constat émerge une question de recherche croisant ces deux disciples :

Comment évaluer les enjeux environnementaux de la mobilité quotidienne et urbaine des personnes en incluant à la fois les évolutions du système urbain et du cadre technologique des transports ?

L'énoncé de cette question de recherche amène à un développement méthodologique ainsi qu'à la réflexion sur la pertinence des méthodes d'un domaine appliquées à l'autre

domaine de recherche. Afin de guider cette reflexion méthodologique, deux hypothèses sont formulées, la première sur l'importance des méthodes environnementales et la deuxième sur l'intérêt des méthodes urbaines :

Hypothèse de recherche 1 : Une approche multicritère incluant le cycle de vie des transports est indispensable pour l'analyse environnementale de la mobilité quotidienne de personnes actuelle et à venir.

Hypothèse de recherche 2 : Les modifications du système urbain impactent les performances environnementales de la mobilité quotidienne de personnes au même titre que les évolutions technologiques.

Chapitre II : Démarche d'une Évaluation Environnementale Stratégique de la mobilité

Contexte :

Le premier chapitre a permis d'exposer les enjeux environnementaux de la mobilité quotidienne des personnes et l'intérêt de les envisager dans le cadre systémique des interactions de cette dernière avec le système urbain. Ce second chapitre peut maintenant poser la démarche d'évaluation qui sera menée dans cette thèse.

Après avoir présenté le cadre de l'Évaluation Environnementale Stratégique, les démarches choisies de la modélisation des interactions transport-urbanisme et de l'Analyse de Cycle de Vie seront décrites et replacées dans le cadre de l'évaluation stratégique.

Objectifs du chapitre :

- Présenter l'origine et l'intérêt de l'Évaluation Environnementale Stratégique pour appréhender les impacts environnementaux de la mobilité des personnes.
- Définir et justifier le choix de l'aire urbaine comme périmètre d'évaluation.
- Identifier les manques méthodologiques pour la réalisation d'une telle évaluation.
- Montrer l'intérêt de la modélisation transport-urbanisme pour combler ce manque ainsi que ses principales limites.
- Formuler la démarche d'Analyse en Cycle de Vie et exposer les avancés méthodologiques pertinentes pour la réalisation d'une évaluation environnementale de la mobilité quotidienne des personnes.

Plan du chapitre :

La première partie de ce chapitre présentera les différents types d'évaluations réalisées pour la mobilité en se focalisant sur l'évaluation de la planification territoriale. La démarche d'Évaluation des Impacts sur l'Environnement sera décrite pour en montrer ses limites vis-à-vis de la mobilité pour ensuite exposer la démarche d'Évaluation Environnementale Stratégique.

À la fin de cette première partie, le choix de l'aire urbaine comme échelle d'analyse sera défendu avant de présenter le manque de méthodologie quantitative pour l'évaluation de la mobilité quotidienne des personnes. Ce constat nous amènera à proposer une méthode couplant modèle transport-urbanisme et Analyse du Cycle de Vie qui sera utilisée tout au long de la thèse.

La deuxième partie présentera le fonctionnement et l'évolution des modèles d'interactions transport-urbanisme afin de fournir une représentation quantifiée du système urbain et de sa mobilité. Les principales variantes de ces modèles seront présentées pour ensuite questionner l'utilisation de cet outil pour la planification urbaine.

La dernière partie de ce chapitre exposera la méthode d'Analyse en Cycle de Vie et la façon dont elle permet de quantifier les impacts sur l'environnement d'un système. Les développements méthodologiques pertinents de l'ACV pour l'ÉES seront détaillés, notamment sur les aspects prospectifs, spatialisés et territorialisés de l'analyse.

Partie 1 : Évaluation Environnementale Stratégique de la mobilité d'une Aire Urbaine

L'évaluation environnementale de la mobilité quotidienne des personnes peut prendre différentes formes en fonction des objectifs, des cibles et des périmètres associés. Le cadre d'évaluation choisi influence grandement les choix de méthodes, d'analyses et d'outils qui seront mis en œuvre par la suite. Aujourd'hui, la mobilité quotidienne est encore principalement du ressort des politiques publiques, même si l'on constate que la ville se fabrique de moins en moins de façon descendante, via la planification urbaine, mais de plus en plus par l'aval à partir des usagers et des acteurs privés (Baraud-Serfaty, 2011). Le contexte de la planification territoriale impose un cadre d'évaluation pour la mobilité quotidienne et urbaine qui varie en fonction du niveau d'opérationnalité et de stratégie associé à cette dernière.

1.1. Différentes démarches d'évaluation environnementale de politique publique

La notion d'évaluation est grandement polysémique et on constate une absence de définition unique, même dans les domaines de la décision publique ou industrielle qui sont tournés vers l'action. Le Conseil Scientifique de l'Évaluation (1996, p.5) définit l'évaluation comme une démarche qui « essaye d'appréhender d'un point de vue principalement externe les effets et/ou les valeurs d'une action considérée ». Cette définition fait déjà la distinction entre évaluation et contrôle ou audit qui ont un rôle de vérification de la conformité d'un système en référence à des normes. Mais elle laisse la place à différentes catégories d'évaluation qui se focalisent plutôt sur les effets ou les valeurs, ou encore sur l'instrumentation de l'évaluation (Boutaud, 2005). L'évaluation est donc supposée s'inscrire pleinement dans les processus de décision. « L'évaluation doit être vue comme un instrument de dialogue favorisant l'éclairage du débat public, plus que comme le processus de calcul dont le résultat dicte la solution à adopter » (Quinet, 1998 p.30). Le degré d'intégration de cet instrument dans les processus de

décision est une dimension importante d'une évaluation qui influence la construction et l'acceptabilité de cette dernière par des preneurs de décisions (Risse, 2004). Dans ce sens, la dimension environnementale de l'évaluation n'est en rien différente des dimensions économiques ou sociales.

Pour l'urbanisme, dont une des aspirations principales consiste à fabriquer (ou re-fabriquer) l'urbain, les évaluations urbaines constituent une manne importante de connaissance pour consolider les savoirs et améliorer les concepts que les urbanistes cherchent à mettre en application sur les terrains. L'évaluation apparait ainsi comme la base de certaines sciences (Bonicco-Donato, 2018).

L'évaluation se situe aussi dans un espace de rencontre entre le « vrai » (le scientifique) et le « juste » (le politique) qui met en jeu différentes dimensions : cognitive, normative, instrumentale et démocratique. La dimension cognitive pour l'apport de connaissance, la dimension normative pour la production de jugement sur la politique, la dimension instrumentale pour la contribution à l'amélioration de la politique et la dimension démocratique pour la participation dans le débat (Boutaud, 2005). Les évaluations croisent ainsi des approches quantitatives et qualitatives en fonction de l'importance portée aux effets ou aux valeurs de l'évaluation. La vision cognitive de l'évaluation présentée dans le rapport DeLeau (« *Évaluer une politique, c'est reconnaître et mesurer ses effets propres (…)* », 1986) suggère d'avantage une approche quantitative axée sur la mesure des effets, alors que la vision normative du rapport Viveret (« *Évaluer une politique publique, c'est former un jugement sur sa valeur* », 1989) évoque davantage une approche qualitative pour la formulation d'une valeur.

D'autres classifications des évaluations existent et permettent de faire des distinctions utiles et pertinentes en fonction du moment où l'évaluation est réalisée pendant le processus de politique (ex-ante, in itinere ou ex-post), en fonction des finalités de l'évaluation (normative, explicative, comparative, analytique ou dynamique) ou en fonction du destinataire de l'évaluation (récapitulative ou endoformative). Le Tableau II-1 récapitule ces trois classifications (Ruprich-Robert & Bencivenga, 2002).

Tableau II-1 : Récapitulatif des principaux types d'évaluation

Critère de classification	**Evaluation**	
	Type	**Définition et objectif**
En fonction du **moment**	Evaluation *a priori*, *ex-ante*, prospective	Préalable à la décision Objectif : éclairer les choix, intéressante pour les instances délibératives chargées de suggérer ou d'arrêter les décisions publiques
	Evaluation concomitante, *on-going*, *in-itinere*	Réalisée au fur et à mesure de l'exécution des politiques publiques Objectif : surveiller le déroulement des actions, éviter les dérives, constater les lacunes, préconiser des ajustements et des corrections
	Evaluation *a posteriori*, *ex-post*, rétrospective	Évaluation des décisions déjà prises Objectif : en tirer les enseignements pour les prochaines politiques
En fonction des **finalités**	Évaluation normative	Analyser ce que la politique devrait être L'attention est portée sur le problème à résoudre
	Évaluation explicative	Analyser les relations entre les mesures mises en œuvre et leurs effets
	Évaluation comparative	Repérer les changements produits par la mise en œuvre de l'action sur une population ou une situation
	Évaluation analytique	Connaitre les processus à l'œuvre dans la réalisation d'une action ou la mise en œuvre d'un service
	Évaluation dynamique	Prendre appui sur les résultats de l'analyse pour modifier l'action au fur et à mesure de son déroulement et adapter l'organisation en conséquence
En fonction des **destinataires**	Évaluation récapitulative	Permettre à des personnes étrangères à l'application du programme de se forger une opinion sur la globalité du programme sans se référer uniquement à ceux qui la mettent en œuvre => aide à la décision stratégique
	Évaluation endoformative	Informer les responsables du programme afin qu'ils modifient leur conduite et améliorent leurs modes d'action => aide opérationnelle, outil de gestion

Source : Ruprich-Robert & Bencivenga, 2002

1.1.1. Les démarches d'évaluation de la mobilité

En France, l'évaluation des choix technologiques et scientifiques qui incluent les problématiques de véhicules écologiques est réalisée pour les politiques publiques à l'Office Parlementaire d'Évaluation des Choix Scientifiques et Technologiques (OPECST *et al.*, 2014). Cette instance « a pour mission d'informer le Parlement des conséquences des choix de caractère scientifique et technologique afin, notamment, d'éclairer les décisions. À cet effet, elle recueille des informations, met en œuvre des programmes d'études et procède à des évaluations » (*Art.* 6 ter. - I. *de la Loi n°83-609 du 8 juillet 1983*). Cet organe commun aux deux assemblées créé en 1983 réalise différentes évaluations dont les rapports et principaux résultats sont présentés aux parlementaires. Les évaluations réalisées sont dans la plupart des cas d'ordre explicatif et récapitulatif en amont des débats (ex-ante), avec un pouvoir d'influence et d'orientation reconnu. L'OPECST est un lieu privilégié d'interface entre les scientifiques et les politiques pour l'orientation scientifique, technologique et industrielle du pays (Birraux, 2002). Cependant, les orientations prises par les parlements en matière de choix technologiques et industriels se situent à un niveau national sans réelle considération territoriale.

Ces dernières années, les processus de planification territoriale sont devenus de plus en plus importants à la suite des différentes vagues de décentralisation du pouvoir (Ghorra-Gobin, 2015). Ainsi la combinaison de pouvoirs divers à l'échelle territoriale a fait des territoires des entités privilégiées pour résoudre les problèmes publics (ressource, équité, développement économique). Cependant, les objectifs territoriaux se sont aussi multipliés avec la généralisation du principe de développement durable, rendant l'exercice de planification complexe et avec de grandes incertitudes. De nouvelles méthodes de planification ont vu le jour afin de construire les politiques du bas vers le haut (Demazière & Desjardins, 2016).

La planification territoriale se subdivise en deux avec un aspect stratégique et un aspect opérationnel. La planification stratégique a pour objectif d'élaborer une vision commune du territoire, de guider les actions futures. La planification opérationnelle correspond à la mise en action de cette vision par la mise en œuvre de différents projets. Le premier est à la base de l'élaboration des plans et programmes territoriaux alors que le deuxième regroupe les différents projets qui s'opèrent sur le territoire. En théorie, la planification stratégique guide la planification opérationnelle, mais les projets ont une place encore très importante dans le changement territorial (Demazière & Desjardins, 2016; Pinson, 2009).

1.1.2. L'Évaluation des Impacts sur l'Environnement

En France et en Europe, les incidences environnementales des planifications stratégiques (politiques, plans et programmes (PPP)) ainsi que celles de leurs mises en œuvre opérationnelles (projets) sont soumises à évaluation environnementale (*Directive 2001/42/CE* pour les plans et programmes et *Directive 85/337/CEE* pour les projets). Ces deux obligations ont contraint les politiques publiques à créer deux méthodes d'évaluation : l'Évaluation Environnementale Stratégique (ÉES) pour les PPP et l'Évaluation des Impacts sur l'Environnement (ÉIE) pour les projets. Cette dernière a été développée la première et pose bon nombre des fondements de l'ÉES (Lerond *et al.*, 2003; Risse, 2004).

L'objectif principal de l'Évaluation des Impacts sur l'Environnement est de prévenir les incidences environnementales liées à la réalisation d'un projet. L'ÉIE est donc une évaluation ex-ante d'aide à la conception d'un projet (infrastructures, par exemple) qui inclut trois sous-objectifs (Lerond *et al.*, 2003) :

- Intégrer les préoccupations d'environnement lors de la conception d'un projet par son promoteur ;
- Éclairer l'autorité qui est amenée à autoriser la réalisation ;
- Informer le public afin de l'associer à la prise de décision.

Le deuxième point résulte directement du cadre réglementaire dans lequel l'ÉIE s'inscrit (*Article R122 du Code de l'environnement* et *Directive 85/337/CEE*) qui définit les projets soumis à ÉIE, définit le maitre d'ouvrage comme responsable de cette évaluation et précise le rôle important de l'État pour le contrôle de ces évaluations. Afin de normaliser les ÉIE soumises aux autorités de contrôle, l'État a créé de nombreux guides méthodologiques décrivant la procédure (Michel, 2001). L'ÉIE est au cœur d'un processus d'évaluation environnementale et elle doit être réalisée le plus en amont possible afin d'optimiser ses effets sur la réalisation du projet. Son processus est continu, progressif, sélectif et itératif et il est constitué de plusieurs séquences qui ne sont ni successives ni indépendantes (Michel, 2001) :

1. Cadrage de l'évaluation : définition de la zone d'étude et de ces enjeux environnementaux majeurs, identification des principaux effets du projet afin d'orienter les méthodes d'études à mettre en place.

2. Identification et analyse des différentes options : comparaison des différentes variantes qui ont émergé à partir de méthodes telles que l'analyse coûts-avantages, l'analyse coûts-efficacité ou l'analyse multicritère.
3. Analyse de l'état initial : description fine de l'état et de la vulnérabilité du site choisi pour les différents thèmes environnementaux retenus.
4. Évaluation des effets du projet sur l'environnement : séquence centrale qui évalue les effets globaux du projet, qu'ils soient directs ou indirects, afin de juger de son acceptabilité.
5. Suppression, réduction et compensation des effets dommageables : après suppression au maximum des effets, recherche de solution de réduction puis engagements de mesures compensatoires afin de pallier les pertes environnementales.
6. Participation du public : organisation de débats et d'enquête publique afin d'informer et de faire participer l'ensemble des acteurs à la conception et aux décisions publiques.
7. Suivi des effets après la réalisation : vérification des engagements pris dans l'étude et des prévisions réalisées.

Le rapport soumis avant la réalisation doit comprendre l'ensemble des éléments précédents.

Depuis sa mise en œuvre en France en 1976, l'ÉIE a bénéficié de nombreux retours d'expériences, elle a ainsi beaucoup évolué et elle est devenue un outil essentiel pour la réalisation des projets d'infrastructures, permettant de meilleurs choix de solution et la prise en compte d'enjeux environnementaux de plus en plus importants. Cependant, l'ÉIE possède trois grandes limites concernant l'analyse des effets, l'efficacité du processus de planification et la concertation du public (Partidario & Sheate, 2013). Premièrement, du fait de son périmètre d'étude restreint à un seul projet, l'ÉIE néglige certains effets cumulatifs ou synergiques du territoire qui font suite aux développements de plusieurs projets. Les prévisions et l'efficacité d'un projet peuvent ainsi se retrouver obsolètes, engageant la responsabilité des maitres d'ouvrages. Deuxièmement, l'ÉIE étant rattachée à un projet, elle intervient à un stade avancé de la planification territoriale, ce qui limite le panel de solutions envisageables. Il s'agit plus souvent de choisir parmi des variantes (*options alternatives*) que parmi des alternatives (*alternative options*) (Sheate *et al.*, 2003). Troisièmement, l'ÉIE et la mise en œuvre des projets interviennent en aval des grandes orientations prises précédemment, limitant les débats lors des différentes phases de concertation (Lerond *et al.*, 2003). De plus, l'ÉIE s'intéresse plus aux impacts environnementaux locaux (sur les milieux impactés), au travers des choix de

technologies ou de localisations, alors que les enjeux environnementaux planétaires restent secondaires, malgré une attention grandissante suite aux diverses conventions internationales (notamment sur le changement climatique ou la biodiversité) (André *et al.*, 2010).

La planification territoriale ne peut se baser uniquement sur l'ÉIE qui se situe trop en aval et manque de vision générale sur le territoire. L'Évaluation Environnementale Stratégique (ÉES) a été conçue pour avoir une portée géographique plus importante et englober des alternatives de natures diverses répondant à des enjeux globaux. L'ÉIE et l'ÉES sont complémentaires. L'ÉES ne peut pas remplacer l'ÉIE même si son périmètre englobe cette dernière. La coordination entre ces deux processus, appelée « arrimage », est un vrai enjeu de planification, car une ÉES bien réalisée peut éviter que la réalisation de projets soit compromise, tout en facilitant et réduisant le coût des ÉIE qui en découlent (Risse, 2004).

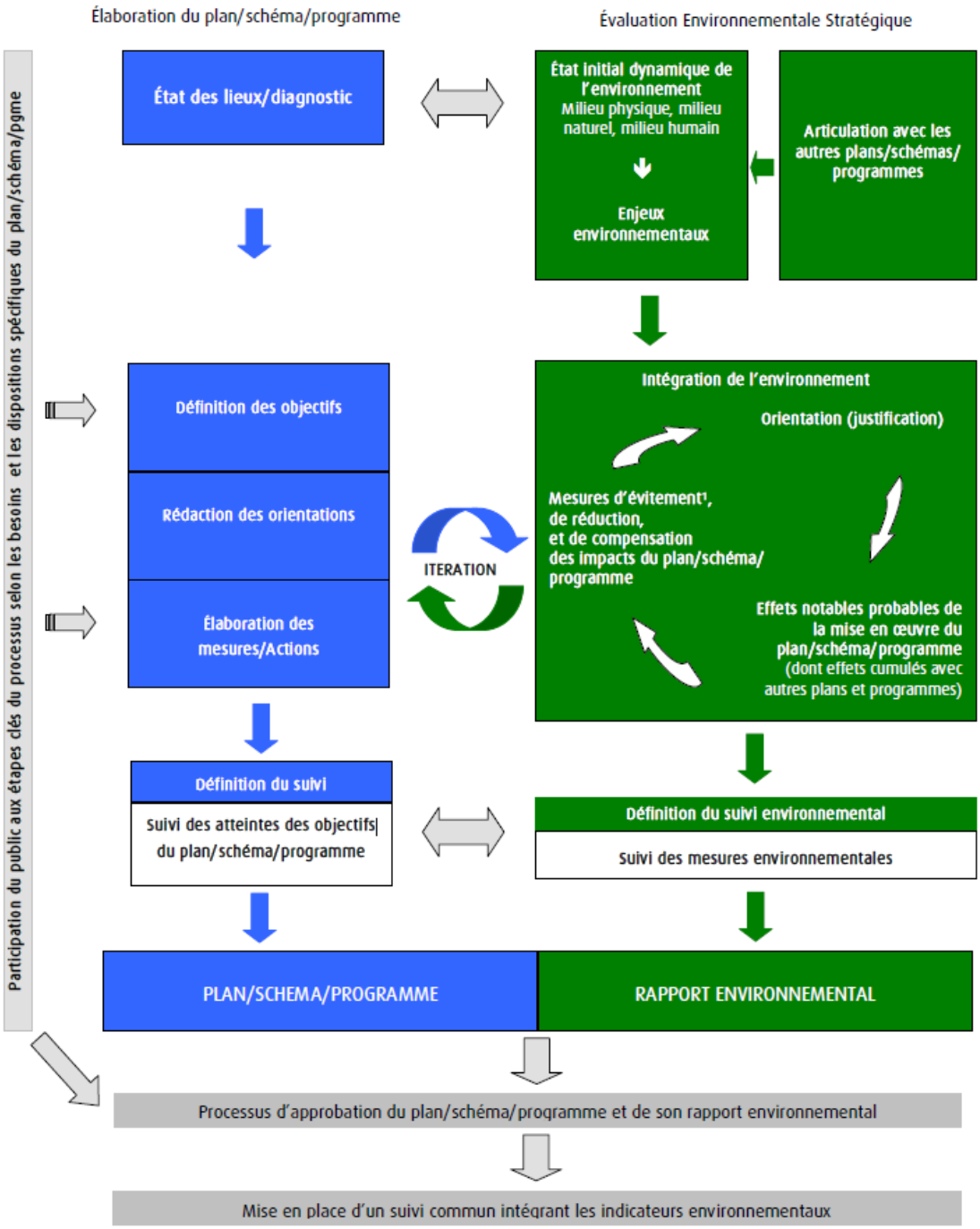
1.2. L'Évaluation Environnementale Stratégique (ÉES)

L'ÉES a pour objectif d'envisager les effets significatifs probables d'une politique, d'un plan ou d'un programme (PPP) sur l'environnent, afin d'influencer le processus de planification avant l'adoption de cette politique, de ce plan ou de ce programme (Lerond *et al.*, 2003). La grande proximité de l'ÉES avec le monde politique rend sa définition confuse, qualifiée à la fois d'outil, de processus, de procédure ou d'instrument politiques (Sadler & Dalal-Clayton, 2012; Thérivel & Minas, 2002).

L'ÉES et l'ÉIE présentent de nombreuses similitudes, dues notamment à leurs rôles dans les processus de planification qui visent à évaluer les incidences environnementales d'une décision. Arrivée bien après l'ÉIE, l'ÉES se calque sur les méthodologies déjà existantes en matière d'évaluation et reprend le cadre réglementaire développé pour les projets (*article R121 du code de l'environnement, Directive 2001/42/CE*). L'ÉES apparait comme une procédure en plusieurs étapes qui interagit avec le processus de planification pour finir avec la soumission d'un rapport pour les autorités environnementales (Figure II-1). Les grandes étapes de l'ÉIE sont conservées, avec une phase de diagnostic pour évaluer l'état initial, une phase itérative d'analyse des différents choix stratégiques, une phase d'analyse des effets *in fine* de la stratégie retenue et une phase de mise en place du suivi des mesures proposées. Les mécanismes de

concertation sont aussi présents pour l'ÉES afin d'informer et d'intégrer l'ensemble des acteurs du territoire à la prise de décision conformément à la convention d'Aarhus sur la démocratie environnementale (CGDD & Cerema, 2015; Michel & Monier, 2001).

Figure II-1 : Schéma d'articulation entre l'élaboration du plan/schéma/programme et l'évaluation environnementale stratégique



Source : CGDD & Cerema, 2015

L'ÉES est une évaluation ex-ante dont la mise en place doit être pensée le plus en amont possible afin de pouvoir jouer un rôle proactif dans le processus de décision. Sa réalisation trop tardive, voire ad hoc, limite grandement son impact sur la prise de décision passant souvent à côté de nombreuses opportunités. La réalisation d'un rapport, bien qu'obligatoire, est moins importante pour l'ÉES que le processus décisionnel qu'elle met en place avec la succession de choix et décisions et les relations qu'elle entretient, voire qu'elle suscite, entre les acteurs impliqués (Sheate *et al.*, 2003).

Le degré d'intégration du processus d'ÉES avec le processus de planification est un deuxième paramètre important d'efficacité de l'évaluation. L'ÉES peut apporter des éclairages ainsi que des suggestions impactantes pour la planification. En retour, le processus de planification influence directement l'ÉES par les données de planifications utilisées pour estimer les incidences environnementales envisagées par la politique (André *et al.*, 2010; Michel & Monier, 2001; Partidario & Sheate, 2013).

L'aspect itératif de l'ÉES est important pour permettre une meilleure intégration de l'ÉES dans le processus de planification. Les choix de planification modifient le processus d'évaluation et en retour les résultats d'évaluation peuvent contribuer au renforcement des décisions prises. De plus, l'approche itérative permet de revoir au fur et à mesure le cadre d'évaluation (données initiales, système de valeurs), ce qui l'oppose aux approches constructivistes (Waaub, 2012). Cependant, l'approche itérative peut être compliquée à construire, car elle nécessite une bonne communication pour intégrer les différents allers-retours (CGDD & Cerema, 2015; Waaub, 2012).

L'évaluation des PPP, qui planifient le territoire pour les prochaines années, place l'horizon d'analyse de l'ÉES à moyen et long terme. L'analyse à court terme liée à l'exécution des PPP est réalisée au sein des ÉIE. L'ÉES s'inscrit donc directement dans les exercices de prospective tels que décrits par Berger ou Godet. En effet, Gaston Berger définit la prospective comme « un regard sur l'avenir destiné à éclairer l'action présente » (Berger, 1959). Michel Godet souligne aussi l'aspect stratégique de la prospective, qui oriente l'action présente (planification), repère les faits porteurs d'avenir et mobilise les ressources humaines, intellectuelles et techniques vers une finalité partagée (Godet, 2007a). Les choix de planification et les scénarios considérés dans l'ÉES ont pour objectif de décrire les différents futurs possibles afin de dépasser certaines tendances lourdes pour ne finalement garder que les orientations qui apparaissent souhaitables pour les preneurs de décisions. Malgré le fort intérêt

cognitif de la démarche prospective, les fortes incertitudes qui sont liées se heurtent au formalisme de la procédure d'ÉES (Risse, 2004).

Le niveau stratégique auquel l'ÉES est supposée interagir nécessite de repenser les outils par rapport à ceux développés dans le cadre d'une ÉIE, notamment pour accentuer les approches qualitatives et participatives et améliorer la communication entre les différentes parties prenantes tout au long du processus de planification (Marsauche, 2009). Les outils techniques et quantitatifs utilisés dans le cadre d'une ÉIE sont inadaptés à l'échelle des PPP du fait du niveau de détails nécessaires en entrée et en sortie, qui ne correspond pas à la fois à la disponibilité des données et au niveau de connaissances des preneurs de décision (Partidario & Sheate, 2013). De plus, les enjeux environnementaux ne sont pas les mêmes pour les PPP qui adoptent une vision plus globale, mettant en avant les enjeux de changement climatique, de biodiversité ou de ressource. De même, les impacts locaux sont spatialisés à des échelles moins fines (André *et al.*, 2010; Michel & Monier, 2001). Du fait de l'échelle plus large des PPP, l'ÉES est plus adaptée pour évaluer les effets cumulés en considérant souvent plusieurs secteurs d'activités sur le territoire d'action du PPP (Lerond *et al.*, 2003).

Même si les enjeux environnementaux de l'ÉES sont différents de l'ÉIE, son aspect multicritère reste central et dépendant du cadre d'évaluation défini en début de processus. La généralisation du principe de développement durable ainsi que le développement de nouvelles méthodes d'évaluation ont contribué ces dernières années à l'élargissement des thèmes environnementaux abordés dans les ÉES. Dans le cadre d'une évaluation de la durabilité des PPP, les thèmes environnementaux, sociaux et économiques sont croisés. Notamment les enjeux de santé environnementale et de justice environnementale qui sont de plus en plus intégrés dans les processus de planification territoriale (Partidario & Sheate, 2013).

À la suite des différentes phases de décentralisation du pouvoir, la planification territoriale possède aujourd'hui des capacités d'actions de plus en plus diversifiées (transport, habitat, développement économique, énergie, environnement, éducation …) dont certaines sont devenues de plus en plus liées, comme le transport et l'urbanisme (loi LOTI, SRU, Grenelle, MAPAM), imbriquant les plans et les programmes les uns dans les autres (Ghorra-Gobin, 2015). La prise en compte des plans déjà existants est une étape initiale importante de l'ÉES afin de prendre en considération les développements à venir et les contraintes formulées dans d'autres documents de planification (CGDD & Cerema, 2015; Michel & Monier, 2001). En raison de ces liens avec les autres PPP et parce que des actions de natures diverses découlent du processus de planification, l'ÉES des PPP est fortement systémique, faisant appel à des

disciplines et des méthodes variées. Les différents outils et experts utilisés dans l'ÉES permettent d'éclairer les preneurs de décisions sur les mécanismes en œuvre (Partidario & Sheate, 2013). Cependant, les objectifs et le périmètre liés à la prise de décisions ne doivent pas être perdus de vue par souci de coût et de temps.

En fonction du niveau hiérarchique (politique, plan ou programme) auquel l'ÉES est utilisé, le spectre des acteurs du territoire impliqués varie. L'aspect plus stratégique et la plus grande disponibilité d'alternatives encouragent la mise en place de débats publics lors des concertations. L'approche moins technique et plus qualitative de l'ÉES permet aussi une meilleure information du public, rendant l'ÉES et le processus de planification sous-jacent plus démocratique, conformément à la convention d'Aarhus. Cependant, la mise en place des différents outils de concertation est coûteuse et rallonge le processus de décision, surtout si le territoire considéré est important (Lerond *et al.*, 2003; Risse, 2004).

Forts de plusieurs années d'existence, de nombreux rapports d'ÉES de PPP sont aujourd'hui publiés et accessibles, permettant de juger de l'influence de l'ÉES sur le processus de planification. La première remarque concerne les processus de concertation qui sont pour certaines ÉES absents ou limités. L'analyse de 3 ÉES (cf. Encadré n°1) révèle que la concertation publique n'est pas toujours réalisée, comme dans le SCoT de Nantes Saint-Nazaire et le Schéma Régional d'Aménagement et de Développement Durable du Territoire (SRADDT) – Provence Alpes-Côte d'Azur. A contrario, le PDU de Grenoble appliqué sur un territoire plus petit a mis en place des concertations publiques qui ont abouti à l'ajout d'un scénario dans l'analyse environnementale. L'approche itérative apparait également peu utilisée dans les différents PPP étudiés, qui mettent en place peu de scénarios alternatifs, mais privilégient l'approche correctrice. En revanche, les ÉES formalisent de nombreuses recommandations pour les projets et plans qui sont encadrés par le PPP évalué. Ces constats ne sont pas que français puisqu'au Royaume-Uni, Partidario & Sheate (2013) soulignent que les solutions alternatives ou de rechange, qui ont été dégagées lors des ÉES, n'avaient pas fait l'objet d'analyses poussées, limitant les éclairages pour la prise de décision. Le degré d'intégration des ÉES au sein des processus de planification analysés est difficile à appréhender à la simple lecture des rapports. Cependant, Partidario et Sheate présentent certaines initiatives et pratiques prises qui permettent une meilleure intégration de l'ÉES avec par exemple la création d'équipes multidisciplinaires ou l'élaboration d'un lexique commun facilitant la communication (Partidario & Sheate, 2013).

Encadré n°1 : Exemples d'ÉES française :

Plan de Déplacements Urbains (PDU) de l'agglomération grenobloise (2018) :

- Superficie : 540 km², Population : 444 000 habitants

Le processus d'ÉES mise en œuvre pour le PDU de l'agglomération grenobloise repose grandement sur **des phases de concertation**. Cela commence dès **l'identification** et la **hiérarchisation** des enjeux environnementaux où les différents élus et partenaires institutionnels et associatifs du territoire ont été amenés à définir des indices de pondération pour l'ensemble des enjeux. L'état initial se base sur l'ensemble des données collectées dans d'autres études, notamment dans le cadre d'autres plans et schémas (PPA, PCAET, SCoT, PLUi etc.).

La construction de l'ensemble des actions constituant le PDU a été réalisée lors d'une **démarche itérative et participative** en réutilisant certaines concertations réalisées dans le cadre d'autres plans. La démarche commence par la présentation des objectifs et des éléments de **diagnostic** auprès des instances de concertation. Ces dernières formulent un certain nombre de **propositions** qui seront par la suite soit approfondies par des **études spécifiques**, soit **débattues** par les partenaires et élus. Les résultats des débats et des études seront ensuite repris lors des concertations suivantes. Finalement, un plan d'action est construit à partir de cette démarche. Le plan d'action retenu est ensuite évalué dans son ensemble pour formuler les différentes mesures d'évitement afférentes aux incidences notables.

Le rapport environnemental du PDU de l'agglomération grenobloise révèle une forte participation des différents acteurs dans la définition des enjeux et des actions. Une démarche itérative a été mise en œuvre pour formuler le PDU. En revanche, la formulation d'un seul plan d'action a réduit l'évaluation d'options alternatives pour le PDU.

Schéma Régional d'Aménagement et de Développement Durable du Territoire (SRADDT) Provence-Alpes-Côte d'Azur (2014) :

- Superficie : 31 400 km², Population : 5 millions d'habitants

La particularité de l'ÉES du SRADDT de la région PACA relève des **aspects très stratégiques et non-opérationnel**s de ce schéma. Afin de pallier à cette difficulté, une **forte interaction** a été mise en œuvre **entre l'évaluateur et le rédacteur du document** de planification. Pour évaluer les différentes orientations, une **analyse « littéraire » et théorique des incidences environnementales** a été mise en œuvre proposant une vision globale des enjeux environnementaux. La quantification des niveaux d'impacts est estimée par le biais de grilles relatives à l'intensité, l'étendue et la durée des impacts.

Le rapport environnemental du SRADDT de la région PACA présente **une ÉES simplifiée**, avec peu de partenaires mobilisés, pas de participation du public et une démarche peu itérative. Cependant, cette simplification semble promouvoir une certaine efficacité avec notamment une meilleure **intégration de l'évaluateur dans le processus de rédaction** du programme.

Schéma de Cohérence Territorial (SCoT) Nantes Saint-Nazaire (2016) :

- Superficie : 1 872 km², Population : 850 000 habitants

L'ÉES adoptée pour le SCoT de Nantes Saint-Nazaire se base en partie par **une approche par scénarios**. L'évaluation démarre par l'état initial du territoire qui intègre l'ensemble des éléments disponibles, notamment les données associées à des plans et schémas proches. À partir de cet état initial, différents enjeux environnementaux majeurs ont été identifiés et un certain nombre de scénarios ou alternatives thématiques ont été formulés par les partenaires et représentants des collectivités. Dans un premier temps, les enjeux environnementaux ont été soumis au Pôle Métropolitain afin de réévaluer leurs pondérations en fonction des enjeux politiques afférents, 10 enjeux environnementaux majeurs ont été définis.

À partir des enjeux environnementaux majeurs, les différents scénarios et alternatives ont pu être évalués. Chaque option analysée est associée à une des quatre thématiques principales du SCoT de Nantes Saint-Nazaire : Modèle de développement, équilibres et fonctionnement des territoires, éco-métropole et capacité d'accueil. Les incidences environnementales potentielles de chaque alternative vont permettre d'une part d'aider la prise de décision vis-à-vis de l'action à mener. D'autre part, elles permettent aussi de formuler un certain nombre de mesures d'évitement, de réduction et de compensation.

En conclusion, l'ÉES réalisée dans le cadre du SCoT de Nantes Saint-Nazaire présente quelques limites par rapport à la démarche théorique. On constate une absence d'itération entre la formulation des alternatives et leurs évaluations, de plus la participation publique n'est jamais mentionnée dans le rapport environnemental du SCoT.

Pour réaliser l'évaluation environnementale des différents politiques, plans et programmes, l'Évaluation Environnementale Stratégique est théoriquement idéale et même motrice dans le processus de planification territoriale. L'ÉES est utilisée à son maximum lorsqu'elle est fortement intégrée dans le processus de décision avec des approches itératives et participatives qui ont été définies le plus en amont du processus de planification. Cependant, en, pratique les ÉES se heurtent à trois grandes limites : les incertitudes liées aux aspects prospectifs et au processus politique ; le manque de méthodologie pour l'ÉES et de formation pour les acteurs ; et l'inefficacité et les réserves vis-à-vis des démarches participatives (André *et al.*, 2010; Partidario & Sheate, 2013). La mise en œuvre d'une ÉES peut aussi profiter de circonstances favorables ou d'opportunités pour s'intégrer dans le processus de planification (espaces remarquables, sensibilités d'acteurs majeurs …) (Marsauche, 2009).

1.3. L'aire urbaine comme échelle territoriale d'évaluation

Les processus de planification territoriale, sur lesquels les ÉES s'appliquent, concernent des territoires très divers, allant du territoire national, pour certaines politiques, au niveau communal pour les plans locaux d'urbanisme (PLU). Les différents niveaux des PPP et les territoires d'actions correspondants, sont imbriqués les uns dans les autres, résultat des différentes phases de la décentralisation des compétences étatiques qui ont eu lieu en France depuis les années 80 (Ghorra-Gobin, 2015). Cette diffusion et cette imbrication territoriales du pouvoir se sont réalisées en trois grands actes :

- Acte I : Sous la présidence de François Mitterrand, les lois Defferre (1981-1983) renforcent l'autorité exécutive des régions et des départements sur les collectivités locales. Les régions deviennent des collectivités locales avec un conseil élu. Différents blocs de compétences sont transférés de l'État vers les collectivités territoriales. Les Régions récupèrent les compétences d'aménagement du territoire et de formation professionnelle, les Départements, celles des aides sociales ainsi que les transports scolaires, les Communes obtiennent les compétences pour élaborer des documents d'urbanisme et d'occupation des sols (POS et PLU). Une réallocation financière est aussi opérée sous la forme de dotations.
- Acte II : Sous la présidence de Jacques Chirac entre 2003 et 2004, plusieurs textes sont adoptés pour continuer le processus de décentralisation. La révision constitutionnelle de 2003 destinée à « bâtir une République des proximités, unitaire et décentralisée » renforce l'autonomie financière des collectivités territoriales. Elle leur octroie le droit d'expérimentation et de recourir au referendum local. En 2004, une nouvelle vague de transferts de compétence est réalisée, notamment pour le développement économique qui revient aux Régions et la gestion de certaines routes transférées aux Départements. Les Intercommunalités, créées à la suite de la loi Chevènement de 1999, obtiennent aussi certaines compétences comme pour les logements sociaux.
- Acte III : Sous la présidence de François Hollande, trois lois modifient significativement l'organisation des collectivités territoriales. La loi de Modernisation de l'Action Publique Territoriale et d'Affirmation des Métropoles (MAPTAM, 2014)

institutionnalise et définit la Métropole réservée aux grandes agglomérations urbaines (en 2018, 21 Métropoles sont formées). Dans l'objectif de rendre l'action plus proche des citoyens ainsi que d'améliorer le positionnement international, les Métropoles se saisissent de certaines compétences dont l'élaboration des Schémas de Cohérence Territoriale (SCoT) et l'approbation des PLU. Les transports, la voirie et le stationnement reviennent aussi aux Métropoles. Les Régions et les Départements ont aussi la possibilité de déléguer certaines de leurs compétences aux Métropoles, élargissant encore le champ de compétence de ces dernières. La loi relative à la délimitation des Régions, aux élections régionales et départementales et modifiant le calendrier électoral (2015) redéfinit les limites régionales ainsi que les compétences des régions et des départements. La loi portant sur la Nouvelle Organisation Territoriale de la République (loi NOTRe, 2015) renforce le rôle des Régions pour le développement économique notamment pour la création d'emplois et les formations avec l'élaboration de deux schémas régionaux (SRDEII, SRADDET). Le rôle des Départements en termes d'égalité des territoires est aussi amélioré. La transparence de l'action publique et la démocratie locale sont également mises en avant dans cette loi.

Après ces différentes phases de décentralisation, de nouvelles institutions locales, les Métropoles, se retrouvent ainsi avec un panel de compétences de plus en plus élargi leur permettant de jouer un rôle stratégique important dans la planification territoriale. En France, le phénomène de métropolisation, corrélé avec la décentralisation du pouvoir, a grandement transformé le rôle des agglomérations urbaines dont l'influence dépasse le cadre territorial (Demazière & Desjardins, 2016; Ghorra-Gobin, 2015). Ce développement urbain a participé à la croissance économique des villes qui sont devenues moteurs du développement économique aux niveaux régional, national voir international. L'institutionnalisation des Métropoles apparait alors comme une reconnaissance du phénomène de métropolisation, permettant aux collectivités d'acquérir de nouvelles compétences et fonctions métropolitaines nécessaires à la mise en place de nouveaux services et de réseaux (réseaux de transport, réseaux de communication, services de recherche, services administratifs, sièges sociaux …) (Camagni & Gibelli, 1997; Ghorra-Gobin, 2015; Wiel, 2004).

La multiplicité des services et réseaux métropolitains soulève la question de leur coordination afin de tendre vers la « cité globale » (ville globale) (Sassen, 1996). Les défis de globalisation, de durabilité et de cohésion s'accentuent aussi dans les métropoles qui doivent développer leurs stratégies économiques internationales sans oublier les problèmes d'égalité

territoriale et de soutenabilité (Camagni & Gibelli, 1997). La mise en œuvre des Agendas 21 locaux par différentes communes et intercommunalités a permis aux Métropoles de s'approprier les enjeux de développement durable et de mettre en place certains outils d'évaluation (Boutaud, 2005).

Même si les Métropoles possèdent des limites territoriales élargies, le phénomène continu de métropolisation repousse toujours les limites d'influence et d'interaction des agglomérations urbaines. Cette extension, à ne pas confondre avec étalement, amène certains territoires urbains à se joindre dans une aire métropolitaine multipolarisée. Les définitions de l'INSEE d'aire urbaine et d'aire métropolitaine reprennent ces mécanismes d'extension et de fusion en intégrant des approches morphologique et fonctionnelle (cf.§ChapI 2.2.1). Ainsi les périmètres des aires urbaines croissent avec le temps et les aires métropolitaines englobent à fur et à mesure de nouveaux pôles urbains.

Derrière cette croissance globale des territoires métropolitains, les différents espaces qui les composent, pôles urbains, couronnes, périurbains, évoluent à des rythmes différents avec notamment une croissance démographique plus forte en dehors des pôles urbains. Cette variabilité est un enjeu pour les Métropoles qui ne peuvent pas ignorer les communes multipolarisées ou rurales situées dans leurs « hinterlands » (Enault, 2003; Latour, 2010).

La définition d'un périmètre adéquat pour évaluer l'impact de la planification sur la mobilité quotidienne et urbaine est problématique en raison des différences entre le territoire de la mobilité quotidienne sur lequel s'effectuent les déplacements, qui correspond au bassin de vie, et le territoire d'autorité politique sur lequel les compétences d'actions sont présentes, c'est-à-dire la Métropole institutionnelle. Du fait de la métropolisation et de l'étalement urbain, les bassins de vie s'étendent et la mobilité quotidienne et urbaine s'effectue sur un territoire de plus en plus grand (Wiel, 1999). L'émergence de certaines pratiques de mobilité telles que celles des longs navetteurs est un exemple marquant de l'aspect insaisissable du territoire de mobilité (Gallez & Kaufmann, 2009). L'aspect interdimensionnel de la mobilité quotidienne et de ses impacts sur l'environnement rend la définition d'un périmètre d'étude complexe, dépendant à la fois de politiques et d'actions menées localement comme nationalement dans des secteurs divers tels que l'urbanisme, le transport ou encore l'énergie et l'industrie (avec les mix énergétiques ou la conception des véhicules).

Dans le cadre de cette thèse, le périmètre choisi pour l'évaluation environnementale de la mobilité quotidienne est l'aire urbaine telle qu'elle est définie par l'INSEE. Le choix d'une telle

hypothèse directrice pour définir le périmètre d'étude se justifie par différents éléments, mais n'est pas exempt de limites.

Du fait de sa délimitation basée sur les approches morphologique et fonctionnelle, l'aire urbaine définie par l'INSEE intègre la majorité des flux de déplacements générés par une agglomération urbaine. De plus, suite à la décentralisation du pouvoir au niveau des Métropoles, l'aire urbaine inclut des compétences et des capacités de planification pour la mobilité quotidienne de personnes qui nécessitent une évaluation environnementale (Ghorra-Gobin, 2015). L'aire urbaine, dépassant le périmètre des Métropoles, intègre aussi un certain nombre de communes polarisées par le pôle urbain, enrichissant l'analyse avec des territoires variés sur les plans morphologique, fonctionnel et politique. La présence de territoires variés et de compétences multiples à l'intérieur d'une aire urbaine fait ressortir de nombreux enjeux environnementaux et de durabilité à considérer pour une évaluation environnementale tant sur l'échelle de ces enjeux (locaux-globaux) que sur les thèmes abordés (Theys & Emelianoff, 2001).

Les limites du choix de l'aire urbaine comme périmètre d'analyse pour une évaluation environnementale sont liées à l'aspect dynamique de ses frontières qui croissent continuellement soulevant des biais pour entreprendre une approche prospective et stratégique dans l'évaluation. L'absence d'une instance unique chargée de la planification sur l'ensemble du territoire d'étude soulève aussi la question de l'intégration de l'évaluation au sein d'un processus de planification. Enfin, la diversité des territoires au sein d'une aire urbaine pose différents problèmes à la réalisation d'une évaluation, du fait notamment du nombre de données à collecter et du nombre de critères à évaluer pour rendre compte de la variabilité en termes de comportements, mais aussi en matière de valeurs défendues (Bouzouina, 2008; Lacour & Puissant, 1999).

1.4. Retour sur la problématique : intégrer la dimension stratégique

La revue de littérature réalisée au Chapitre I, présentant les enjeux environnementaux des transports ainsi que la place de la mobilité urbaine au sein du système urbain, a permis de formuler une question de recherche orientant le travail de thèse.

Comment évaluer les enjeux environnementaux de la mobilité quotidienne et urbaine de personnes en incluant à la fois les évolutions du système urbain et du cadre technologique des transports ?

Cette question soulève la question des outils d'évaluation à mettre en œuvre, mais aussi le cadre de l'évaluation à utiliser pour analyser la mobilité quotidienne de personnes. De nombreuses démarches d'évaluation ont été montrées dans ce chapitre avec des objectifs différents, cependant, la mobilité quotidienne de personnes s'avère fortement liée aux politiques publiques, au travers l'élaboration de projets, de plans, de schémas directeurs ou de politiques. D'un côté, l'évaluation des projets de mobilité par l'ÉIE s'est construite et consolidée depuis les années 70. Cependant, son manque de vision globale sur son territoire et sur les projets menés en parallèle ne permet pas à cet outil de saisir l'ensemble des actions et des décisions qui construisent la mobilité quotidienne et urbaine de personnes, surtout si l'on considère son interaction avec le système urbain.

De l'autre côté, l'ÉES intègre plus largement l'évaluation environnementale de la mobilité quotidienne avec de forte relation entre aménagements du territoire et politiques de transports. Cependant, un manque de méthodes quantitatives est présent pour l'ÉES de la mobilité qui se situé à la croisée de politiques (transport, urbanisme, énergétique, développement technologiques et économiques) et des territoires (communes, EPCI, départements, région, état).

Cette thèse s'insère donc dans le cadre de l'ÉES de la mobilité quotidienne et urbaine en proposant une méthode d'évaluation environnementale quantitative pour représenter les différents enjeux stratégiques inhérents. À partir de ce besoin méthodologique pour l'ÉES de la mobilité quotidienne et urbaine et de l'ensemble des enjeux environnementaux et urbains repérés dans le chapitre précédent une problématique de recherche a été définie :

Comment représenter à un niveau stratégique la mobilité quotidienne de personnes et ses enjeux environnementaux en prenant en compte simultanément les dynamiques du système urbain et du cadre technologique des transports ?

La problématique ainsi posée interroge la disponibilité et la capacité des outils existants à représenter et évaluer la mobilité quotidienne de personnes et ses impacts sur l'environnement. Les outils repérés devront être analysés sur plusieurs critères : leur vision systémique portée sur la mobilité afin d'intégrer le système urbain et le cadre technologique, leur approche multicritère des enjeux environnementaux associés à la mobilité, et enfin leur capacité de prospective sur différentes alternatives stratégiques de mobilité, que ce soit en lien avec le système urbain ou le cadre technologique.

Dans le but d'éviter l'analyse de tous les outils existants, une seule méthode d'évaluation environnementale de la mobilité quotidienne des personnes est mise en œuvre dans cette thèse, cette méthode croise la modélisation des interactions transport-urbanisme et l'Analyse de Cycle de Vie (ACV). Ce choix constitue ainsi une hypothèse principale qui sera interrogée tout au long de cette thèse :

Hypothèse principale : Le couplage de l'ACV et d'un modèle transport-urbanisme permet de représenter les principaux mécanismes urbains et technologiques ainsi que les enjeux environnementaux de la mobilité quotidienne de personnes actuelle et à venir d'une Aire Urbaine.

Partie 2 : Modèle d'interactions transport-urbanisme

La représentation de la mobilité quotidienne est un challenge pour toute aire urbaine du fait de la complexité de ce système qui est régi par un ensemble de mécanismes difficiles à saisir et de nature diverse (économique, sociale, spatiale …). Les modèles d'interaction transport-urbanisme (ou Land-Use Transport Interaction model, LUTI) proposent une vision du système urbain et de la mobilité centrée sur l'aménagement du territoire et des infrastructures de transports, les autres aspects étant principalement considérés de façon exogène aux modèles. Cette modélisation fournit depuis plusieurs années des éléments techniques de discussions et d'évaluation pour différents projets d'aménagement et d'orientation de politiques publiques (Marshall & Banister, 2007).

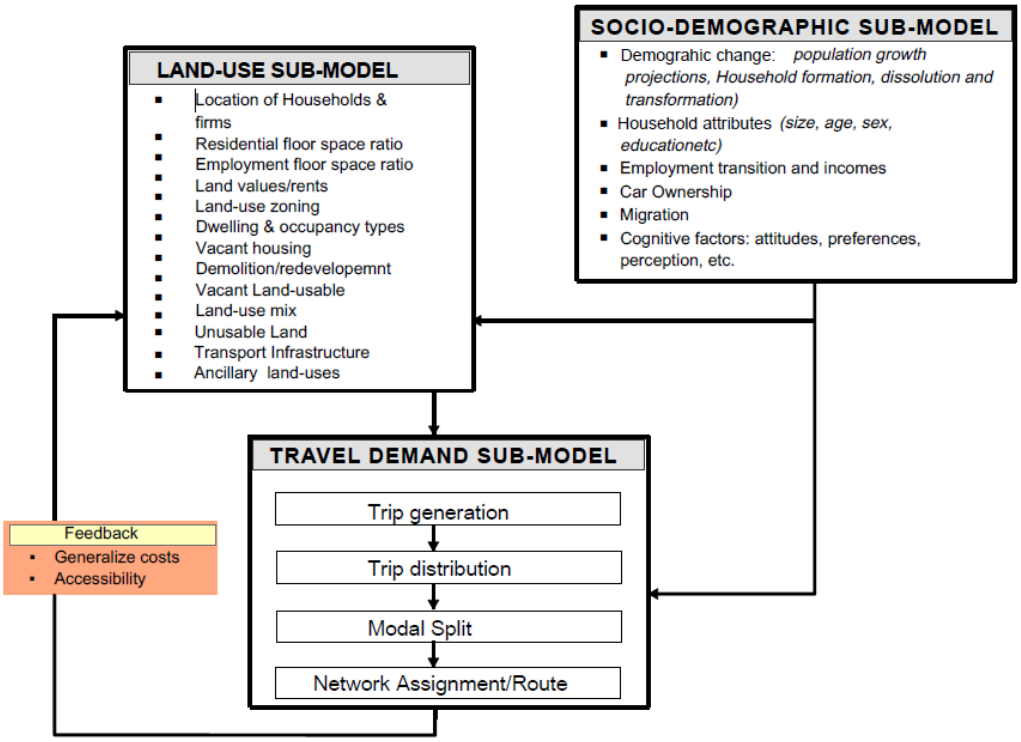
2.1. Principes des modèles transport-urbanisme

L'évaluation de la mobilité quotidienne des personnes nécessite de prendre en considération les processus qui interagissent directement avec elle. Le sous-système de la mobilité fait partie du système urbain qui englobe aussi les systèmes de l'usage du sol et des relations et des pratiques sociales (Bonnafous & Puel, 1983). Une description complète de la mobilité quotidienne et de ses relations nécessite donc de créer un modèle urbain général incluant la modélisation des transports, mais aussi la modélisation de l'usage du sol, celle des interactions spatiales ainsi que les modélisations économiques et démographiques.

Ces différents modèles représentatifs de ces parties du système urbain sont souvent développés séparément, sans interaction entre eux. Par exemple, les modèles transports seuls ne considèrent pas de changements dans l'usage du sol ni dans les pratiques et interactions spatiales. Les modèles d'interactions transport-urbanisme représentent l'intégration conjointe d'un modèle transport avec un modèle d'usage du sol (Figure I-10). L'origine des modèles urbains intégrés remonte au modèle METROPOLIS de Lowry, dans les années 60, qui

développa une approche itérative décrivant au final un état statique du système urbain ayant atteint un état d'équilibre pour les différents marchés d'économie urbaine (usage du sol, emplois, …) (Lowry, 1964). Les modèles transport-urbanisme vont réellement se développer et se répandre dans les années 90 avec le développement des outils numériques et leur généralisation aux États-Unis suite à la publication de deux textes qui encouragent à l'intégration transport-urbanisme dans la planification pour mieux prendre en compte les enjeux de qualité de l'air (Clean Air Act de 1990 et Intermodal Surface Transportation Efficiency Act de 1991) (Wegener, 1994).

Figure II-2 : Structure générale d'un modèle transport-urbanisme opérationnel



Source : Acheampong & Silva, 2015

Les interactions entre transports et l'usage du sol peuvent être représentés par la boucle de rétroaction de Wegener et Fuerst (Figure I-10). L'opérationnalisation de cette boucle rétroactive peut se représenter par la Figure II-2, avec pour points d'interaction principaux l'accessibilité et les relations spatiales liées aux localisations. La mesure de l'accessibilité repose principalement sur la notion de potentialité d'interaction développée par Hansen (1959).

D'autres théories se sont ensuite rajoutées afin d'intégrer les composantes de transports et d'usage du sol, mais aussi celles temporelles et individuelles dans la mesure de l'accessibilité. Il existe différentes approches de l'accessibilité qui peuvent être intégrées dans les modèles : *infrastructure-based accessibility* qui mesure le niveau d'accessibilité d'une infrastructure de transports (congestion, vitesse), *location-based accessibility* qui mesure la quantité d'opportunité accessible depuis une zone, *person-based accessibility* qui mesure, par exemple, le nombre d'activités atteignable en un certain temps, cette mesure est basée sur l'approche espace-temps de la géographie (Hägerstraand, 1970), *utility-based accessibility* qui mesure les bénéfices d'une organisation spatiale à partir d'approche économique. La majorité des modèles transport-urbanisme qui fonctionnent par zonages utilisent l'accessibilité spatiale (*location-based accessibility*) (Geurs & Ritsema van Eck, 2001).

La modélisation des interactions spatiales repose aujourd'hui sur de nombreuses théories économiques, sociologiques et cognitives qui représentent les relations et les flux qui sont générés. La mobilité quotidienne ne représente qu'une partie de ces flux. La nature des flux, qui circulent dans le système urbain, peut être des personnes, des marchandises, mais aussi de l'énergie ou des capitaux avec des temporalités diverses. Le modèle gravitaire, qui retranscrit la loi de la gravité universelle de Newton, calcule l'attractivité des lieux et reste aujourd'hui largement utilisé. Ce modèle repose sur l'hypothèse que le niveau d'interaction de deux lieux dépend du poids de chacun des lieux (population, emplois, opportunités …) et de la distance qui les sépare. De nombreuses théories et nombreux modèles de la micro-économie urbaine ont permis de consolider les fondements des interactions transport-urbanisme (modèle d'utilité aléatoire, modèle entropique …). D'autres modèles et théories non économiques ont aussi contribué au développement des modèles transport-urbanisme avec notamment avec l'approche espace-temps de la géographie ou certains modèles migratoires (Acheampong & Silva, 2015; Hägerstraand, 1970).

2.2. Différenciation des modèles LUTI

Le développement des modèles LUTI n'est pas régi par un cadre méthodologique normalisé, même si les bases théoriques des modèles n'ont que très peu bougé depuis leur création, laissant place à une variété importante de modèles en fonction de choix

méthodologiques et théoriques réalisés. Les modèles peuvent être classifiés en fonction des théories principales utilisées, de leurs échelles d'application, de leurs niveaux de résolution spatiale, de leur aspect dynamique ou encore du niveau d'intégration des différents sous-modèles. Plusieurs revues de littérature sur le développement et l'usage de modèles LUTI ont été réalisées présentant différentes classifications et faisant apparaitre de nouvelles approches (Acheampong & Silva, 2015; Deymier & Nicolas, 2005; Jonas, 2015; Simmonds *et al.*, 2013; Wegener, 1994; Wilson, 2010).

La première différenciation des modèles LUTI est la finalité cherchée par l'outil développé : l'optimisation ou la prévision. Les modèles d'optimisation sont difficilement applicables en planification urbaine, car ils cherchent le « design » urbain idéal. Les modèles de prévision sont plus utilisés pour la planification, car ils permettent de simuler différentes politiques d'aménagement ou de transport. Les modèles d'optimisation ne possèdent pas d'horizon temporel et sont principalement statiques. Les modèles de prévisions peuvent en revanche intégrer la dynamique d'évolution dans leurs mécanismes de modélisation (Deymier & Nicolas, 2005). En reprenant les travaux en économie sur le modèle d'équilibre général certains modélisateurs s'orientent vers des modèles de prévision statique basés sur l'hypothèse d'état d'équilibre du système urbain entre demande et offre de transport et de localisation des logements et des emplois. La modélisation dynamique de l'évolution urbaine repose quant à elle principalement sur la récursivité avec des pas d'itération, c'est-à-dire que l'état final à la fin d'une itération sert d'état initial de l'itération suivante. Cette approche récursive est appelée quasi-dynamique et elle permet d'introduire des temporalités d'évolution différentes entre les différentes composantes du système urbain (Hunt *et al.*, 2005; Wilson, 2016). Wegener et Fuerst (2004) proposent quatre temporalités pour les différents sous-systèmes qu'il utilise (immédiat, rapide, lent et très lent, cf. ChapI 2.2.2). Les évolutions les plus lentes sont les plus compliquées à modéliser.

Les différents paramètres spatiaux des modèles LUTI permettent aussi de classer les différents modèles. L'étendue géographique du système modélisé influence énormément les choix de modélisation. Dans sa revue de littérature, Jones (2016) analyse des modèles LUTI qui présentent des périmètres allant de 0.08 km² pour l'analyse d'un projet de développement, à 150 000 km² pour la baie de Chesapeake. Avec l'agrandissement du territoire simulé, plusieurs problèmes apparaissent : l'acquisition et l'uniformité des données qui peuvent se trouver sur des territoires administratifs différents ; la variabilité croissante des comportements et des espaces au sein du territoire qui vont complexifier l'ajustement des modèles. Pour les

grands territoires, les modèles utilisés dans le modèle LUTI sont simplifiés. La résolution spatiale de l'étude est le second paramètre qui influence les choix méthodologiques. En fonction de l'unité de découpage du modèle, les approches théoriques divergent, les théories de l'économie urbaine ou les approches par maximisation de l'entropie sont adaptées pour de grands découpages. Pour des découpages micro ou au niveau de l'individu, les approches par choix discrets ou basées sur l'utilité aléatoire sont plus appropriées (Deymier & Nicolas, 2005; Hunt *et al.*, 2005; Jones, 2016; Waddell, 2011).

Le recours à la micro-simulation est de plus en plus courant dans les LUTI, car elles permettent d'intégrer de l'hétérogénéité dans le système urbain et de mieux modéliser les nouveaux comportements. Cependant, la formulation et le calibrage des micro-simulations augmentent rapidement la complexité du modèle et nécessitent beaucoup de données pour refléter l'hétérogénéité du territoire (Jones, 2016). Les résultats des approches par micro-simulations basées sur des découpages spatiaux plus fins doivent être analysés avec précaution, car la variabilité stochastique tend à augmenter lorsque l'échelle est fine du fait de l'augmentation du nombre d'alternatives (Moeckel *et al.*, 2018). Le problème d'agrégation spatiale (*modifiable areal unit problem* ou MAUP) doit aussi être gardé en tête lors des analyses afin d'éviter des erreurs d'interprétation (Jones, 2016).

En fonction des objectifs de l'étude, mais aussi des capacités de modélisation, le niveau d'intégration et de détail des différents modules varie grandement d'un modèle LUTI à l'autre. Certains modèles sont considérés comme « pleinement intégrés » lorsque les processus de modélisation d'un module incluent certains processus d'autres modules. Par exemple, dans le modèle MEPLAN, la génération des déplacements est produite par un module à l'interface entre le module transport et le module d'usage du sol (Echenique *et al.*, 1990). Les modèles « connectés » fonctionnent avec des modules distincts qui se fournissent mutuellement des données. Cette approche cloisonnée permet de facilement travailler sur un module spécifique. Dans le cas de modèles « connectés », les niveaux de résolutions des modèles doivent être cohérents afin d'éviter une trop grande dichotomie entre les analyses spatiales liées à l'usage du sol et au trafic (Deymier & Nicolas, 2005).

2.3. Exemples de modèles LUTI

Parmi les nombreux modèles LUTI existants (en 1994 Wegener en énumérait déjà une vingtaine de modèles LUTI remarquables) quatre ont été principalement utilisés et appliqués pour l'aménagement du territoire, MEPLAN, TRANUS, DELTA et URBANSIM. Les différents choix méthodologiques de ces modèles sont présentés dans le Tableau II-2.

Malgré leur aspect intégré, les modèles MEPLAN et TRANUS reposent tous deux sur des mécanismes économiques représentés à un niveau large, notamment le modèle d'équilibre général. Ces modèles possèdent une résolution spatiale et temporelle faible (souvent un découpage en 50-100 zones avec un pas temporel de 5 ans (Hunt *et al.*, 2005; Jones, 2016)) , mais ils nécessitent moins de données. Le modèle DELTA, qui possède plusieurs niveaux d'analyse, intègre des mécanismes économiques plus fins appliqués à chaque niveau. Le modèle URBANSIM repose sur des mécanismes différents du fait de son découpage spatial plus fin et d'une plus fine connaissance de catégories de ménages présents. Ce modèle se différencie des trois autres par l'absence d'équilibre à chaque itération entre l'offre et la demande pour les différents marchés économiques (Hunt *et al.*, 2005; Jones, 2016; Wegener, 2004).

Tableau II-2 : Caractéristiques principales des modèles MEPLAN, TRANUS, DELTA et URBANSIM

Modèles	MEPLAN (Echenique *et al.*, 1990)	TRANUS (de la Barra *et al.*, 1984)	DELTA (Simmonds, 1999)	URBANSIM (Waddell, 2002)
Année de développement	1969	1982	1998	1998
Étendue spatiale	Ville, aire urbaine, région	Ville, aire urbaine, région	aire urbaine, région, pays	Ville, aire urbaine, région
Résolution spatiale	Grands découpages	Grands découpages	Découpages multi-niveaux (parcelles, zones, aires)	Découpages fins
Niveau d'intégration	Intégré	Intégré	Connecté (modèle transport externe)	Connecté (modèle transport externe)
Principes théoriques	Modèle entrée-sortie/ utilité aléatoire	Modèle entrée-sortie/ utilité aléatoire	Modèle entrée-sortie/modèle logit	Rente urbaine/utilité aléatoire
Aspect dynamique	Quasi-dynamique avec équilibre (pas de 5 ans)	Quasi-dynamique avec équilibre (pas de 5 ans)	Quasi-dynamique avec équilibre (pas d'un an)	Quasi-dynamique sans équilibre (pas d'un an)

Source : adapté de Deymier & Nicolas, 2005; Hunt et al., 2005; Wegener, 2004

Quel que soit le modèle LUTI considéré, l'objectif est de représenter le système urbain le plus largement possible en intégrant les différents sous-systèmes urbains existants (Wegener & Fürst, 2004). L'intégration entre transport et usage du sol est centrale et elle repose sur la modélisation de l'accessibilité et des interactions spatiales. La majorité des modèles LUTI

existants sont à usage prédictif et reposent sur des hypothèses d'équilibres économiques. L'usage d'approche quasi-dynamique permet de considérer les différents sous-modèles avec leurs propres temporalités et ainsi explorer des horizons temporels plus lointains (Moeckel *et al.*, 2018).

L'usage de modèles LUTI à des fins exploratoires reste encore marginal pour la planification, car les modèles LUTI ont des difficultés à identifier et tester les différents points de rupture. L'utilisation exploratoire, contrairement à l'approche prédictive, n'apporte pas de solution, mais plutôt de la matière à discussion et à réflexion pour les décideurs. Pour le modèle, une telle approche nécessite d'avoir suffisamment de marge de manœuvre pour simuler certains scénarios tout en restant dans le cadre de construction du modèle. Les paramètres exogènes au modèle (variables démographiques, de migration, de taxes, de vitesse de construction résidentielle) deviennent des variables de contrôles sur lesquelles il est possible de construire des scénarios. Le nombre de variables sur lequel construire les scénarios exploratoires varie d'un modèle à un autre, permettant de simuler des politiques de natures plus ou moins variées (Hunt *et al.*, 2005; Tannier *et al.*, 2016).

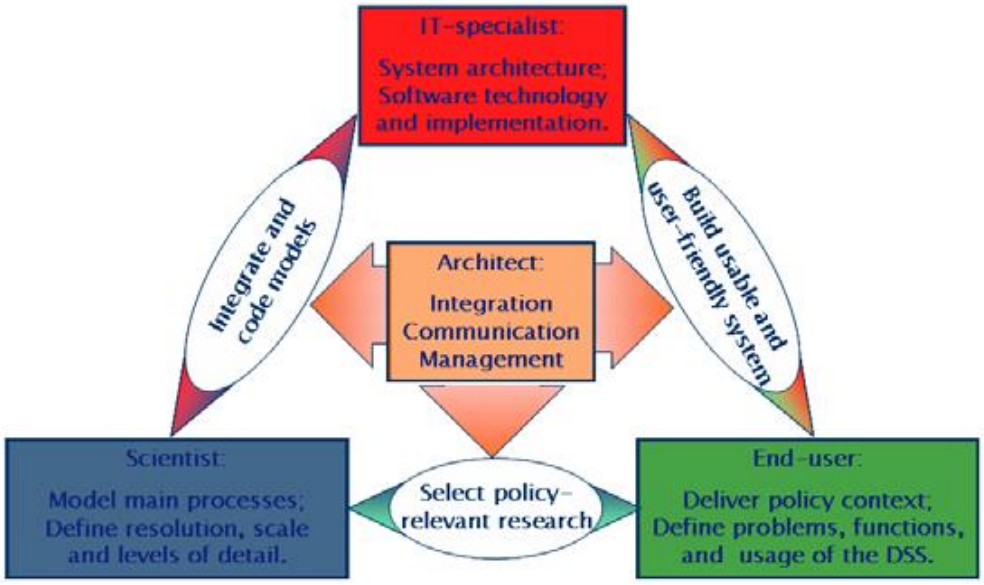
2.4. Limites des modèles LUTI

Malgré les possibilités de simulation des modèles LUTI existants, Van Wee (2015) explique que de nombreuses tendances en cours aujourd'hui ne sont pas appréhendables par les modèles LUTI actuels, mettant ainsi en évidence le besoin de nouveaux modèles urbains adaptés à ces nouveaux enjeux : les changements de comportement, notamment vis-à-vis de la voiture, le ralentissement démographique de pays occidentaux, les technologies d'information et de communication, l'électrification de la mobilité, la croissance des vélos, le vieillissement de la population, etc. La plupart des modèles construits ont pour but d'évaluer les conséquences urbaines des politiques d'investissement pour les infrastructures et le système de transports. Or, aujourd'hui, les questions politiques d'aménagement et de transport se sont complexifiées avec les problématiques environnementales, d'équité, de bien-être, de durabilité qui nécessitent des modèles LUTI adaptés avec des approches désagrégées notamment (Van Wee, 2015).

Ces dernières années, le rôle des modèles en aménagement urbain a beaucoup changé pour passer du rôle de prédiction quantitative à celui de discussion et d'information. Même si

les modèles LUTI restent peu utilisés pour l'aménagement du territoire, une dichotomie persiste entre les scientifiques, qui essayent de créer des modèles rigoureux d'aide à la décision, et les utilisateurs (aménageurs), qui cherchent un outil pertinent pour leurs usages (Saujot *et al.*, 2015; Te Brömmelstroet *et al.*, 2014). Te Brömmelstroet (2009) explique d'ailleurs que les modèles d'aide à la décision pour la planification urbaine n'arrivent pas à capter les aspects non technologiques de l'aménagement et, surtout, que la complexité de la situation réelle de planification (contexte géographique, social, économique, politique …) est trop grande pour être modélisable. Van Delden (2009) propose d'améliorer l'usage de ces modèles dans la prise de décision en mettant en avant le rôle de la communication entre l'ensemble des acteurs impliqués dans la réalisation du modèle d'aide à la décision (Figure II-3).

Figure II-3 : Processus de communication pour une meilleure intégration des modèles d'aides à la décision



Source : van Delden, 2009

L'utilisation et la construction des modèles LUTI pour orienter les politiques d'aménagement et de transport ont encore beaucoup de chemin avant de s'imposer dans les processus d'évaluation. L'enquête, réalisée par Saujot *et al.* (2015), révèle que l'intérêt des utilisateurs français de modèle LUTI est principalement stratégique et exploratoire, de préférence à l'échelle d'une aire urbaine. Avec les différentes avancées méthodologiques et

techniques de ces dernières années en matière de micro-simulation et de dynamique urbaines, certains modélisateurs tentent de s'approcher du modèle « suprême » décrit par Hunt et al. (2005), même si la construction de modèle aussi complexe soulève toujours des problèmes de collection de données, de coût et de temps. De plus, la recherche de rigueur scientifique ne doit pas occulter les mécanismes des modèles afin de les rendre compréhensibles et appropriables par les acteurs du territoire qui se méfient d'outils « boite noire » (Saujot *et al.*, 2015; Tannier *et al.*, 2016; Te Brömmelstroet *et al.*, 2014).

Conclusion de la partie 2 :

À travers les différents choix méthodologiques et théories appliqués, la modélisation transport-urbanisme s'est imposée comme un outil central pour l'évaluation de projets d'aménagement et d'infrastructures de transports depuis plusieurs années (Hunt *et al.*, 2005; Saujot *et al.*, 2015). Malgré les problématiques exposées pour leur application, les modèles LUTI restent un moyen utile de représenter la mobilité au sein du système urbain, en particulier si l'on prend en considération les opportunités qu'offre la micro-simulation (Acheampong & Silva, 2015). Les éléments présentés sur les modèles LUTI et le choix d'utiliser un modèle LUTI pour évaluer les impacts environnementaux de la mobilité quotidienne d'une aire urbaine permet d'affiner l'hypothèse de recherche 2 formulée dans le Chapitre I, « *Les modifications du système urbain impactent les performances environnementales de la mobilité quotidienne de personnes au même titre que les évolutions technologiques* ».

Hypothèse de recherche 2bis : Le rôle central du système urbain sur la mobilité quotidienne de personnes nous conduit à utiliser un modèle transport-urbanisme pour l'évaluation environnementale de celle-ci.

Cette hypothèse interrogera donc l'influence du système urbain sur les résultats environnementaux ainsi que l'utilité d'un modèle LUTI pour ce type d'évaluation.

Partie 3 : L'Analyse de Cycle de Vie (ACV)

L'évaluation environnementale de la mobilité quotidienne des personnes passe par l'analyse des technologies de transports utilisées pour cette dernière. La revue de littérature du Chapitre I a révélé à la fois un nombre important d'enjeux environnementaux très variés dans les transports ainsi que la nécessité d'étudier ces technologies sur l'ensemble de leurs cycles de vie. Parmi les outils d'évaluation environnementale disponible, l'Analyse de Cycle de Vie a la particularité de satisfaire les deux critères retenus, c'est-à-dire allier l'approche multicritère avec la vision globale du cycle de vie (Le Féon, 2014; Risch *et al.*, 2012). De plus, différents développements méthodologiques de l'ACV permettent aujourd'hui à cet outil de mieux évaluer des objets tels que la mobilité quotidienne et urbaine dans le cadre d'une ÉES.

3.1. Principes généraux de l'ACV :

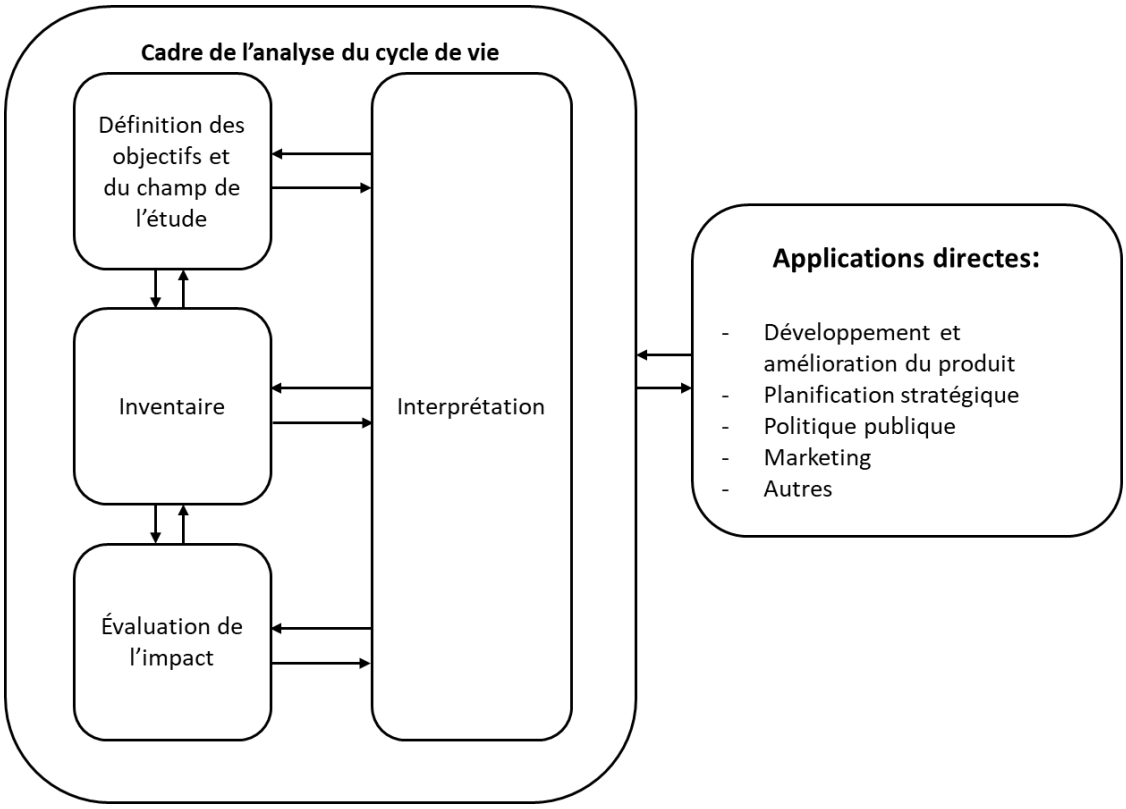
L'Analyse de Cycle de Vie (ACV) est une méthode d'évaluation des impacts environnementaux de produits, de services ou de systèmes. Basée sur la pensée en cycle de vie, l'ACV considère l'ensemble des étapes de la vie de l'objet évalué, de l'extraction des matières primaires à la fin de vie. Cette méthode de quantification des impacts environnementaux est particulièrement intéressante pour estimer les impacts environnementaux d'un produit puisqu'en prenant en compte les différentes phases du cycle de vie, elle identifie les améliorations directes d'une alternative, mais surtout les déplacements de charges polluantes qui peuvent s'opérer entre les phases et entre les différents milieux. L'ACV constitue un outil d'écoconception essentiel pour les entreprises afin de comparer des choix de conception entre elles et d'identifier les priorités d'actions. L'ACV est donc tournée vers l'action puisqu'elle fournit à la fois des éclairages sur les conséquences environnementales des alternatives d'actions et permet de faire émerger de nouvelles solutions qui n'auraient pas été imaginées par d'autres approches techniques ou économiques (Jolliet *et al.*, 2010; Rousseaux, 2005).

L'ACV a pour particularité d'être une méthode fonctionnelle en associant la performance environnementale à la fonction rendue par le produit ou le système étudié. Avec cette approche fonctionnelle, les différentes solutions étudiées sont comparées entre elles pour une unité fonctionnelle donnée. La performance et la durée de vie des systèmes évalués sont alors des facteurs déterminants de l'ACV. Par exemple, pour comparer différentes technologies d'ampoule, le niveau d'intensité lumineuse (lumens) et la durée de vie des ampoules sont des données importantes pour comparer à fonction équivalente (Jolliet *et al.*, 2010).

L'ACV est une méthode de comptabilité basée sur les bilans (écobilan), qui s'est développée dans un premier temps dans le secteur énergétique et qui s'est ouverte progressivement à l'ensemble des secteurs économiques incorporant l'ensemble des émissions polluantes. Aujourd'hui, l'ACV possède un cadre normatif international élaboré par l'Organisation International de Normalisation (ISO) qui définit les lignes directrices pour la pratique d'une ACV (série des normes ISO 14040). La première de ces normes (ISO 14040) présente les quatre phases de la réalisation d'une ACV : la définition des objectifs, l'inventaire des émissions et des extractions, l'analyse de l'impact et l'interprétation. En parallèle de ce cadre normatif, l'organisation scientifique internationale SETAC (Société de Toxicologie et de Chimie Environnementale) soutient et promeut les principaux développements méthodologiques en lien notamment avec l'ACV. La diffusion de cet outil dans le monde est soutenue par le Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE) qui avec la création de l'initiative pour le cycle de vie (Life Cycle Initiative) crée un espace institutionnel pour l'ACV. Ces trois structures soulignent l'intérêt qui existe pour l'ACV.

L'ACV est le seul outil d'évaluation environnementale normé au niveau international, il est reconnu dans différentes sphères et doit contenir un certain nombre d'éléments (Figure II-4) :

Figure II-4 : Phases d'une ACV



Source : ISO 14040:2006

3.1.1. Définition des objectifs et du champ de l'étude :

De nature peu technique, cette étape de l'ACV est pourtant déterminante pour la qualité de l'analyse réalisée. Les partenaires de l'étude explicitent les objectifs envisagés ainsi que le public concerné. Quatre grands types d'objectifs sont à mentionner : un objectif informatif, un objectif réglementaire, un objectif de développement de produits ou un objectif d'élaboration de stratégies (Benetto, 2005; Jolliet *et al.*, 2010). Une fois l'objectif fixé, le champ d'études doit être posé en explicitant un ensemble d'éléments, avec notamment :

- *La (ou les) fonction(s)* remplie(s) par le système permet la comparaison des alternatives entre elles, et elle conditionne un ensemble d'autres éléments de l'étude. Un système peut remplir plusieurs fonctions. Les fonctions secondaires qui ne constituent pas le cœur de l'exercice de comparaison ne doivent pas être trop divergentes d'une alternative à l'autre afin de garantir la comparabilité. Dans le cas

d'un système multifonctionnel, des règles d'allocation doivent être définies pour repartir les impacts environnementaux entre les fonctions. Par exemple, la fonction principale d'une ampoule est d'éclairer, mais elle peut remplir aussi les fonctions secondaires de chauffage ou de création d'ambiance.

- *L'unité fonctionnelle* est la grandeur quantifiant la fonction de référence qui permettra la comparaison des alternatives. L'ensemble des flux de référence du système qui déterminent les impacts environnementaux sont rapportés à cette unité qui doit être mesurable et additive. Pour une ampoule, l'unité fonctionnelle peut être 600 lumens pendant 6 000 heures.
- *La définition du système* et sa modélisation suivent une démarche systémique afin d'appréhender le système dans sa totalité avec sa complexité et son dynamisme. Ainsi le système est plus que la somme des parties. Il inclut l'ensemble des relations entre les éléments et avec l'environnement. La définition des frontières du système conduit à ignorer certaines interactions, et permet d'identifier les processus inclus dans l'étude. Pour une ampoule, le système peut inclure l'extraction de la matière, la fabrication, la consommation d'électricité et le recyclage.
- *Les catégories d'impacts environnementaux* analysées ainsi que les exigences de qualité des données sont à définir en début d'ACV afin d'anticiper des développements méthodologiques ou des recueils de données qui seront à réaliser ultérieurement.

Cette définition du champ d'études, qui est réalisée au début de l'étude, est amenée à évoluer en fonction d'informations qui émergent au cours de l'étude. En effet, l'ACV peut faire apparaitre une nécessité de modifier les limites du système afin d'inclure de nouveaux processus importants. Pour certains produits, les processus de packaging et de transports peuvent être inclus s'ils apparaissent importants.

3.1.2. Inventaire des émissions et des extractions :

La deuxième étape de l'ACV consiste à quantifier les flux de matière, d'énergie et de polluants qui traversent les limites du système précédemment défini. Deux approches existent pour réaliser l'inventaire, la première approche est basée sur la description de l'ensemble des

processus pour lesquels sont associés des flux physiques d'entrants et d'émissions. Cette approche nécessite la connaissance des facteurs d'émissions et d'extraction liés à chacun des processus du système. La collecte d'information sur le terrain est un moyen de connaitre ces facteurs, mais cette étape peut devenir fastidieuse si le système est étendu. L'usage de bases de données génériques est un autre moyen d'acquérir ces facteurs (Benetto, 2005; European Commission/Joint Research Centre, 2010; Jolliet *et al.*, 2010). Cependant, l'aspect générique de ces données peut nuire à la qualité de l'étude surtout si l'étude possède de fortes spécificités géographiques ou temporelles (Nitschelm *et al.*, 2016).

La deuxième approche, appelée approche input-output, repose sur les flux monétaires entre le système et les différents secteurs économiques. Par exemple, les secteurs bancaires et de l'assurance peuvent fournir des services pour le système étudié dont il faudrait quantifier les émissions et les exactions associées. La méthode input-output repose sur des bases de données qui décrivent les émissions polluantes et les extractions de ressources naturelles de chaque secteur économique rapportées aux flux monétaires induits par les différents secteurs économiques. Les deux approches pour réaliser l'inventaire d'entrants d'émissions peuvent être combinées dans une approche hybride (Benetto, 2005; Jolliet *et al.*, 2010).

Pour chaque alternative, l'ensemble des entrants et des émissions, qui peuvent avoir lieu dans des lieux et à des temps différents, sont additionnés par substances et rapportés à l'unité fonctionnelle. Cette agrégation repose sur une hypothèse majeure de l'ACV selon laquelle l'impact d'une substance est lié aux propriétés intrinsèques de celle-ci sans influence du lieu ou du moment où elle est émise (Jolliet *et al.*, 2010). Des développements méthodologiques ont été réalisés sur la spatialisation et la temporalité des impacts afin de dépasser cette hypothèse réductrice (Loiseau *et al.*, 2012; Nitschelm *et al.*, 2016). La vérification de la qualité des données présentes dans l'inventaire est importante pour estimer les incertitudes qui en découleront dans l'analyse.

3.1.3. Analyse de l'impact environnemental :

Après avoir réalisé l'inventaire des substances émises et extraites, il est nécessaire de relier ces valeurs à leur impact sur l'environnement. Pour les différentes catégories d'impacts choisies, des méthodes d'agrégation vont être utilisées pour réunir les substances qui ont un impact sur l'environnement. Certaines substances sont susceptibles d'avoir un impact dans

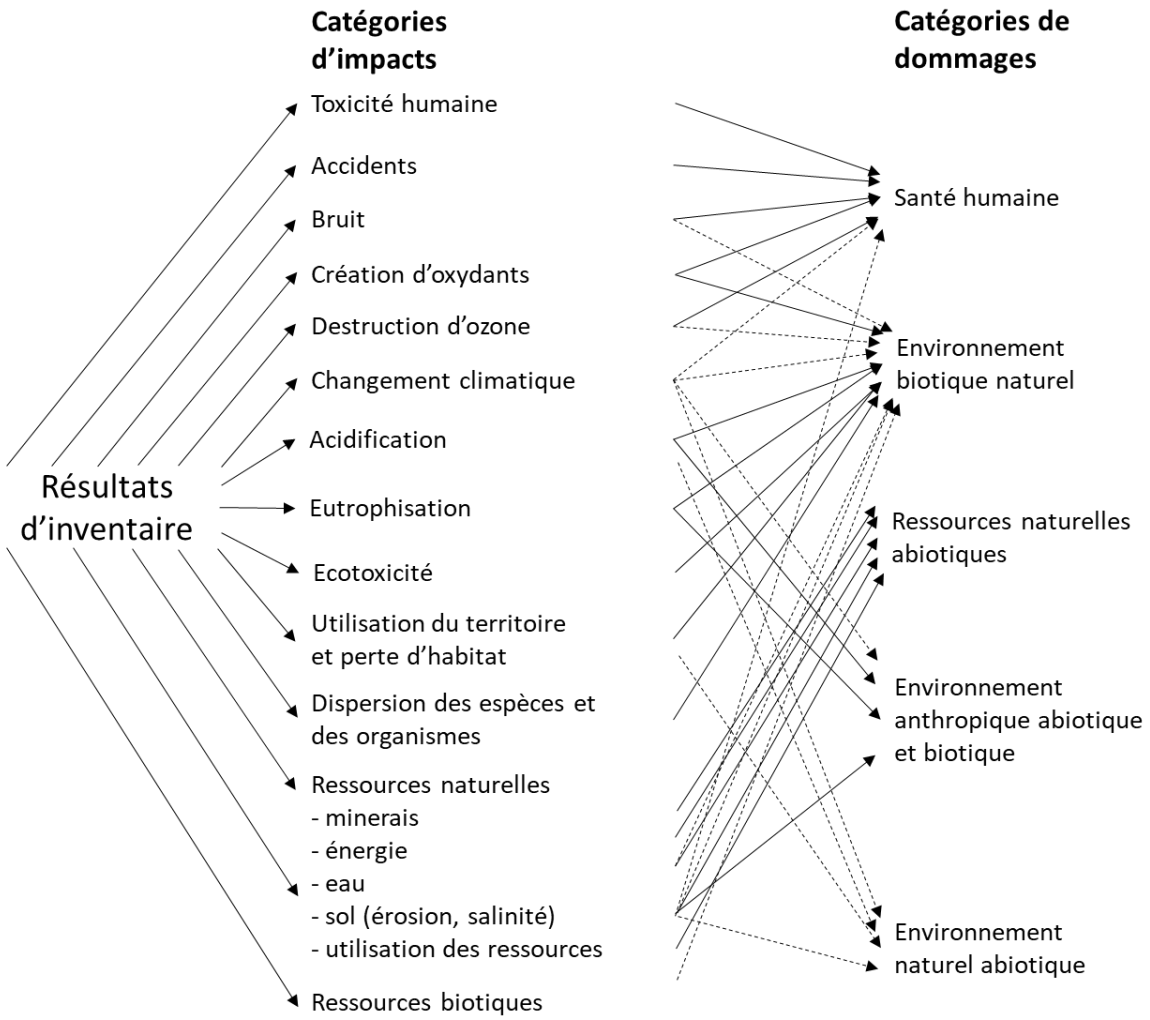
plusieurs catégories. Pour une catégorie d'impact, le score d'impact est la somme des flux de substances multipliés par le facteur de caractérisation correspondant à l'impact et à la substance (European Commission/Joint Research Centre, 2010; Jolliet *et al.*, 2010). On peut le noter :

$$S_j = \sum_i CF_{ij} * M_i$$

Avec S_j le score pour l'impact *j*, M_i la quantité de substance *i* inventoriée pour le système et CF_{ij} le facteur de caractérisation de la substance *i* pour l'impact *j*.

Il est possible, après avoir calculé les scores d'impact, d'agréger plusieurs catégories d'impacts ensemble afin d'estimer des indicateurs de dommage. La Figure II-5 présente la structure générale d'analyse pour cette étape de l'ACV. De nombreuses méthodes d'analyse d'impacts ont été développées proposant d'évaluer certains impacts et dommages avec des niveaux d'agrégation variés ainsi que des facteurs de caractérisation différents. L'application de ces méthodes d'analyse est simple, mais leur élaboration est complexe, car elle nécessite de nombreuses connaissances scientifiques pour caractériser les impacts et les dommages potentiels d'une substance sur l'environnement. Afin de choisir la méthode d'évaluation appropriée pour l'ACV, le centre commun de recherche de la Commission européenne (JRC) a réalisé et publié un guide (ILCD handbook) qui rappelle la démarche d'ACV et évalue les différentes méthodes d'analyse d'impacts pour donner des préconisations d'emploi en fonction de l'impact considéré et du niveau d'agrégation (European Commission/Joint Research Centre, 2010). Si plusieurs impacts sont considérés dans l'étude, l'analyste peut être amené à utiliser plusieurs méthodes en parallèle. Par exemple, le guide ILCD préconise l'utilisation de la méthode IPCC pour le changement climatique, USEtox pour l'écotoxicité et ReCiPe pour la formation d'ozone troposphérique (Annexe 1).

Figure II-5 : Structure générale du cadre d'analyse d'impact du cycle de vie



Source : Jolliet et al., 2010 (Les flèches pointillées représentent les informations entre catégories intermédiaires et dommages qui sont particulièrement incertaines)

À la suite des calculs de scores d'impact ou de dommage, il est possible de réaliser une normalisation permettant de rapporter les différents résultats à des valeurs de références, cette étape de normalisation n'est pas obligatoire dans le processus d'ACV, mais elle est mentionnée dans la norme ISO 14044. La normalisation permet de comparer les catégories d'impacts les uns avec les autres en fonction de leur niveau de contribution. Les valeurs de normalisation peuvent varier d'une étude à l'autre en fonction des références choisies et de la région de normalisation choisie (Monde, continents, pays …). Certaines méthodes fournissent des valeurs de normalisation qui font référence aux niveaux d'impact actuel (consommation moyenne d'un Européen pour ReCiPe, par exemple). Récemment, des publications scientifiques proposent

une méthode de normalisation dite « d'évaluation absolue de la durabilité » permettant de confronter les impacts générés par un système donné (évalué par l'ACV) avec les capacités de charges des écosystèmes. Inspirée des « limites planétaires » développées par Rockström et al., une telle méthode de normalisation estime différents seuils écologiques à ne pas dépasser pour rester dans un écosystème sûr, sans risque imprévisible de modification de l'environnement (Bjørn & Hauschild, 2015; Rockström *et al.*, 2009). Ces seuils peuvent alors être utilisés comme valeurs de normalisation en ACV. Même si cette méthode n'est pas encore implémentée dans les logiciels d'ACV, elle ouvre de nombreuses perspectives tant en termes scientifiques et en tant qu'aide à la décision (par exemple (Wolff *et al.*, 2017)).

La pondération de résultats est une autre phase optionnelle qui peut être réalisée dans l'analyse d'impacts sur l'environnement. Elle consiste à définir l'importance des différentes catégories d'impacts (ou de dommages) par le biais de valeurs sociales accordées à chacune des catégories. Par exemple, la monétarisation est une méthode de pondération qui estime les facteurs de pondération sur une base monétaire en utilisant des approches telles que la volonté de payer. L'usage de la pondération dans l'ACV est défini dans les objectifs de l'étude, mais elle reste très débattue, car elle soulève de nombreuses questions éthiques, idéologiques et politiques (par exemple : Quelle est l'importance du système écologique par rapport au système économique ?) (Finnveden, 2000; Jolliet *et al.*, 2010).

3.1.4. Interprétation :

La phase d'interprétation de l'ACV consiste à donner du sens aux résultats obtenus précédemment. Un des buts principaux de cette phase est d'identifier les points critiques du cycle de vie sur lesquels la conception du produit ou du service doit se concentrer afin de réduire les impacts sur l'environnement. En fonction du type d'analyses menées, les points critiques peuvent être des phases du cycle de vie (fabrication, transport …) ou des composants du produit. En croisant l'interprétation environnementale avec des analyses économiques ou sociales, il est possible de faire apparaitre des solutions gagnantes sur les différents plans.

L'étape d'interprétation sert aussi à déterminer la qualité des données et des résultats présentés. Pour ce faire, des études de sensibilités et des calculs d'incertitude sont menés sur les données d'entrée, les hypothèses méthodologiques ainsi que sur les modèles de représentation du système étudié. Les tests de sensibilités font ressortir les paramètres et les

hypothèses qui induisent de fortes variabilités sur les résultats finaux. Ces tests peuvent amener les évaluateurs à revoir certaines de leurs hypothèses ou à approfondir leur recueil de données. Les tests d'incertitudes estiment la propagation des erreurs et des incertitudes des données d'entrée et des modèles jusqu'aux résultats finaux. Si le niveau d'incertitude est du même ordre de grandeur que la différence entre deux scénarios, il est alors impossible de juger de la pertinence d'un scénario par rapport à l'autre (European Commission/Joint Research Centre, 2010; Jolliet *et al.*, 2010).

***

Malgré sa reconnaissance internationale, l'ACV n'est pas dépourvue de limites pratiques et conceptuelles. En raison de son niveau de détail, l'ACV nécessite une quantité de données importante dont la récolte peut être problématique et fastidieuse. De plus, les nombreux choix réalisés tout au long de l'ACV (hypothèses, méthodes d'analyse, fonction de référence …) soulèvent la question de la subjectivité de l'analyse. Afin de remédier à ce dernier point, il est essentiel d'être le plus transparent possible quant aux hypothèses posées et d'adopter une approche critique, soit lors de la phase d'interprétation, soit en ayant recours à une revue critique (Jolliet *et al.*, 2010).

D'un point de vue conceptuel, l'ACV repose sur certaines hypothèses majeures qui fragilisent l'analyse. La première hypothèse est la séparation entre la dimension environnementale de l'ACV et les dimensions économique et sociale qui n'interagissent pas entre elles. La prise en compte de la pensée en cycle de vie pour l'économie ou le social est possible avec l'Analyse des Coûts du Cycle de Vie (ACCV) et l'Analyse Sociale du Cycle de Vie (ASCV). Le regroupement de ces trois analyses existe et s'intitule l'Analyse de Durabilité du Cycle de Vie (ADCV) (Guinée *et al.*, 2011). La méthode d'ACV repose aussi sur l'hypothèse selon laquelle l'environnement dans lequel évolue le système n'évolue pas et ne modifie pas le système. Les dimensions spatiale et temporelle du système sont aussi ignorées puisque les agrégations successives ne considèrent que la nature des substances et ignorent leurs temporalités et leurs localisations. La démarche classique de l'ACV ne permet donc pas de capter des sensibilités locales ou des temporalités qui sont importantes pour des études territorialisées avec par exemple des rythmes de fonctionnement non linéaires (heures de pointe et heures creuses) (Nitschelm *et al.*, 2016).

Dans le domaine des transports, l'outil d'ACV a été depuis plusieurs années appliqué sur les différents objets qui constituent ce secteur. Différents constructeurs et institutions ont réalisé des ACV sur la fabrication et l'utilisation des véhicules, permettant d'analyse les impacts des nouvelles technologies mises en œuvre dans l'automobile (ADEME, 2013; Hawkins *et al.*, 2013; Mercedes-Benz, 2010; Renault, 2011, 2017). Les carburants font aussi l'objet de nombreuses études d'ACV, notamment avec l'arrivée de nouveaux carburants dans les véhicules et de l'obligation d'évaluation de biocarburant par ACV pour les pays européens (*Directive 2015/1513 du Parlement européen et du Conseil*) (ADEME, 2010; Bicalho, 2013; Bicer & Dincer, 2017; Eriksson & Ahlgren, 2013; Menten, 2013). Pour les infrastructures de transports, des études en ACV ont été menées afin d'étudier les influences des matériaux et des tracés sur les différentes phases et impacts environnementaux (Karlsson *et al.*, 2017; Santero, 2010). Des logiciels d'évaluation environnementale des infrastructures routières ont aussi été développés pour aider la mise en œuvre d'ACV de ce type, notamment ECORCE (Ventura *et al.*, 2010). D'autres études d'ACV appliquées aux transports ont croisé les secteurs précédents (automobile, énergie et infrastructures) afin d'analyser les impacts environnementaux de services de transport, comme la mise en œuvre d'une ligne de transport en commun (de Bortoli *et al.*, 2017), ou les impacts environnementaux de systèmes de transport global (voitures et TC) d'agglomérations (San Francisco, Chicago et New York pour Chester *et al.* (2010), Saint-Étienne, Bordeaux, Valenciennes et Toulon pour Le Feon (2014)).

Les nombreuses applications de l'ACV dans le domaine des transports montrent l'intérêt de cet outil, en dépit des différentes critiques qui ont pu être formulées. De plus, des développements méthodologiques récents ont permis de dépasser certaines de ces limites notamment sur la territorialisation et la spatialisation de l'ACV (Finnveden *et al.*, 2009; Hellweg & Mila i Canals, 2014; Loiseau *et al.*, 2018; Mirabella *et al.*, 2018). Les conséquences des marchés économiques sur le système étudié font aussi l'objet aujourd'hui de nouveaux modèles utilisés en ACV. Ces développements méthodologiques permettent à l'ACV de s'emparer de nouveaux objets d'études, notamment les plans et programmes qui sont sensibles aux caractéristiques locales de leurs territoires et qui induisent des modifications significatives de leurs environnements économique et social, par exemple pour des programmes énergétiques (Finnveden *et al.*, 2009). Pour la planification territoriale, l'ACV apparait donc comme outil analytique utilisable dans le processus d'ÉES. L'intégration d'une méthode quantitative systémique dans l'ÉES apporte de l'information supplémentaire qui de par leurs aspects objectifs aide à fixer la décision.

Cependant, l'acceptation des résultats quantitatifs par les preneurs de décisions nécessite l'appropriation de l'outil quantitatif par ces derniers. D'autant plus que l'ACV ne peut pas prendre en compte l'ensemble des enjeux environnementaux d'une ÉES, dont certains sont très locaux, et que le périmètre de l'ACV inclut des impacts qui se trouvent en dehors des périmètres d'action et de responsabilité des PPP. L'association de l'ACV avec d'autres outils d'évaluation pallie certaines limites méthodologiques de l'ACV pour répondre à l'ensemble des exigences de l'ÉES. Par exemple, l'usage d'outil participatif pour créer des alternatives pour l'ACV (Finnveden *et al.*, 2003).

Les deux parties suivantes présenteront les développements méthodologiques de l'ACV existant pouvant être appliqué pour l'ÉES pour la mobilité quotidienne d'une aire urbaine, avec notamment les aspects liés aux conséquences des PPP et les aspects spatiaux et territoriaux de ce type d'analyse.

3.2. ACV-Prospective :

La réalisation d'une ACV est régie par différentes règles présentées précédemment et incluses dans les normes ISO 14040, néanmoins différents types d'ACV apparaissent en fonction de la situation dans laquelle elles sont réalisées. Le guide ILCD du JRC détaille trois situations distinctes d'application de l'ACV qui induisent une modélisation du système et de son cycle de vie différente. Ces trois situations dépendent du contexte de décision de l'étude et du degré de changement qui résulte des différentes alternatives étudiées. Deux des trois situations, qui impliquent une prise de décision, analysent les systèmes et ses impacts sur l'environnement tels qu'ils seront si l'action est menée. La troisième situation, qui n'implique pas de décision, est purement descriptive et suit une logique comptable ou de surveillance dans laquelle le système est décrit tel qu'il est, était ou sera s'il existe un modèle prédictif. Les deux autres situations nécessitent le développement de modèles qui considère les potentielles conséquences des décisions étudiées, cette modélisation peut inclure de nouveaux processus ou matériaux (exemple des processus et des matériaux recyclés) (Ekvall *et al.*, 2016; European Commission/Joint Research Centre, 2010).

En fonction du degré de changement induit par la décision les deux situations vont différer notamment dans la modélisation du système analysée. Dans la première situation, les

changements résultant de la décision sont minimes et se limitent à l'échelle du produit ou du service considéré. Les marchés économiques et les secteurs d'activités avec lesquels interagit le produit étudié ne subissent pas de variation significative qui induirait des impacts sur l'environnement. Cette situation correspond à une ACV-attributionnelle (ACV-A) qui ne considère aucune variation des processus et des marchés qui se situent en dehors des frontières du système. L'objectif de l'ACV-A est d'allouer au système étudié la part d'impacts environnementaux dont il est responsable par rapport à un système plus grand dans lequel il est inclus.

Pour l'autre situation, les modifications liées à la décision sont trop importantes et conduisent à des changements notables dans le cycle de vie du produit ou dans les marchés avec lesquels il interfère. Cette situation correspond une ACV-conséquentielle (ACV-C) qui s'intéresse à la chaine de conséquences (directes ou indirectes) liée aux changements subis par le système étudié. Les conséquences directes représentent les effets en lien avec la fonction du système étudié. Les conséquences indirectes incluent en revanche les effets de la décision sur d'autres systèmes qui seraient impactés par des modifications du marché ou de comportements.

3.2.1. ACV-Attributionnelle :

Dans le cas d'une ACV-A, la modélisation du système repose principalement sur les règles d'allocation, afin d'attribuer au système étudié uniquement la part d'inventaire et d'impacts dont il est responsable au sein d'un système plus grand. En effet, un processus peut générer plusieurs produits dont il faut faire la différence et repartir les impacts. Par exemple, la consommation électrique d'une chaine de production doit être répartie entre les produits de cette dernière. Il existe pour cela différentes règles d'allocation qui dépendent des caractéristiques des produits (masse, volume, pouvoir énergétique, nombre, valeur économique). Finalement, le résultat obtenu représente la part d'impact lié au produit étudié au sein d'un système plus large (Jolliet *et al.*, 2010; Schneider *et al.*, 1998).

Les impacts sont rapportés à une unité fonctionnelle, éventuellement fictive, afin de permettre une comparaison entre les différentes alternatives. Les limites du système sont fixes et le contexte socio-économique et technologique est stable entre chacune des alternatives pour garantir une comparabilité. Cette stabilité du contexte général de l'étude contraint les solutions envisagées à rester dans un cadre local sans conséquence plus larges. Ainsi les interactions entre

les processus du cycle de vie et les données d'inventaires peuvent être obtenues par recueil de données sur le terrain ou en utilisant des bases de données sans modification majeure.

L'ACV-A adopte une approche statique du cycle de vie, sans évolution dans le temps. Ce cadre d'analyse stable permet à l'ACV-A de dresser des profils environnementaux détaillés des alternatives avec une description fine du système étudié. Cette finesse d'analyse permet de faire ressortir les points critiques au sein du système étudié avec les composants ou les phases du cycle de vie à l'origine de nombreux impacts ou qui introduisent de fortes variabilités. L'usage d'un cadre statique et d'une unité fonctionnelle fictive repliable dans d'autres contextes similaires permet aux analyses et aux résultats d'être réutilisables dans d'autres études similaires (European Commission/Joint Research Centre, 2010; Jolliet *et al.*, 2010).

À titre d'exemple pour l'ACV-Attributionnelle dans le domaine des transports on peut citer l'ADEME (2013) qui estime à 146 g CO_2-eq par km les émissions associées à un véhicule thermique contre 60 g CO_2-eq par km pour un véhicule électrique. Pour un objet d'étude plus étendu, Chester *et al.* (2010) estiment que les systèmes de transports des villes de San Francisco, Chicago et New York ont respectivement des émissions de GES de 250, 290 et 220 g CO_2-eq par personne.kilomètre sur l'ensemble du cycle de vie des modes de transports.

3.2.2. ACV-Conséquentielle :

La notion d'ACV-Conséquentielle résulte principalement de travaux de Weidema et al. qui soulignent l'importance de prendre en considération les variations de marchés en lien avec les produits étudiés (Weidema *et al.*, 1999). L'objectif de l'ACV-C est d'évaluer les conséquences environnementales d'un changement. Contrairement à l'ACV-A qui alloue une part d'un système stable plus grand au produit ou au service étudié, l'ACV-C modélise les variations du système global en réponse aux différentes alternatives étudiées. Ces changements du système résultent de deux types d'effets : les effets directs représentent les conséquences sur les flux et les processus directement connectés à la fonction de référence de l'étude ; les effets indirects représentent les conséquences sur d'autres systèmes non connectés à la fonction de référence qui vont modifier le système global (European Commission/Joint Research Centre, 2010). L'ACV-C nécessite donc des modèles permettant de représenter les relations entre le système étudié et les systèmes affectés, ces relations peuvent être de natures diverses (marché économique, comportement, réglementation …) (Earles *et al.*, 2013; Earles & Halog, 2011).

Les variations analysées par l'ACV-C sont à rapporter à l'unité fonctionnelle de l'étude qui, contrairement à l'ACV-A, vise à représenter l'ampleur réelle du changement réalisé. Les résultats obtenus sont donc dépendants à la fois de l'ampleur du changement étudié ainsi que du contexte socio-économique et temporel de l'étude, car les modèles d'effets indirects sont spécifiques. Cette approche permet aux résultats d'être placés dans un contexte plus grand, cependant, l'étude perd en comparabilité surtout entre études réalisées indépendamment. L'ACV-C introduit la notion de temporalité dans l'analyse avec le passage d'un état de référence à un état final au cours duquel le système a été modifié. L'ACV-C peut être utilisé de façon dynamique afin d'étudier l'évolution du système et de ces impacts dans le temps (Ekvall *et al.*, 2016; European Commission/Joint Research Centre, 2010).

La difficulté principalement de l'ACV-C est d'identifier les processus affectés par le changement analysé qui devront être modélisés. Weidema et al. proposent cinq questions pour aider à leur identification (Weidema *et al.*, 1999) :

- Quel est l'horizon temporel appliqué dans l'étude ?
- Est-ce que le changement affecte uniquement les processus liés à l'étude ou des marchés ?
- Quel est l'ordre de grandeur de la variation des marchés ?
- Quelles technologies de production peuvent répondre aux variations potentielles ?
- Y a-t-il une technologie à privilégier ?

En cherchant à répondre à ces questions, les processus affectés à intégrer dans l'étude apparaissent en fonction de leurs vitesses à répondre aux variations, de leurs types (processus technologiques ou marchés), de leurs contraintes et caractéristiques techniques et de leurs flexibilités en termes de production. Une fois identifiés, les processus et marchés affectés sont modélisés et certains développements d'ACV-C s'orientent aujourd'hui sur l'intégration de modèle économique dans l'ACV avec, par exemple, des modèles d'offre et de demande ou des modèles d'équilibre partiel ou général (Dandres *et al.*, 2011; Earles *et al.*, 2013).

Sandén et Karlström catégorisent les processus affectés en trois catégories de conséquences en fonction de leur place dans la chaine « cause-effet ». Les conséquences de premier ordre représentent les effets sur les flux physiques qui interviennent dans le cycle de vie du produit. Seuls les liens technologiques de cause-effet sont considérés. Les conséquences de second ordre correspondent aux changements de la production en réponse aux variations de marchés impactés par le changement étudié qui peuvent être modélisés par les modèles

économiques. Les conséquences de troisième ordre sont des phénomènes plus longs à émerger, résultant de changements structurels au niveau des infrastructures, des institutions ou des connaissances et dont les effets sur l'environnement peuvent largement dépasser ceux du premier et second ordre. Cependant, la modélisation de conséquences de troisième ordre est compliquée (Sandén & Karlström, 2007).

L'élargissement des frontières du système aux processus et aux marchés affectés permet d'intégrer dans le système les coproduits sans avoir à utiliser de règles d'allocation qui soulèvent des questions de subjectivité dans l'ACV-A. L'approche axée sur les changements de l'ACV-C réduit en revanche le niveau de détails porté au système étudié dont une partie n'est pas modifiée lors des modélisations des alternatives. Certaines études d'ACV-C réduisent même le système d'étude aux processus affectés, réduisant la charge de collecte de données, mais ne permettant plus d'estimer le poids relatif du système total (Earles & Halog, 2011).

Les principaux exemples d'ACV-Conséquentielle dans le transport sont en lien avec les carburants et notamment les biocarburants afin d'intégrer les phénomènes de changement d'usage des sols qui affectent les domaines de l'agriculture et de l'alimentaire (ADEME, 2010; Dandres *et al.*, 2011). Girod *et al.* (2011) ont aussi estimé certains effets rebonds de la mobilité, notamment en matière de temps gagné et d'argent économisé. Pour leur étude suisse, ils ont estimé qu'une heure et un euro de gagné dans les transports entrainent respectivement 5 kg et 1,2 kg de CO_2-eq supplémentaire du fait des déplacements, des activités ou achats qui peuvent être réalisés.

Les approches et méthodes d'ACV-A et ACV-C apportent toutes les deux un support décisionnel à des niveaux différents. L'ACV-Attributionnelle part d'un état stable pour ensuite décrire les impacts du système, alors que l'ACV-Conséquentielle regarde les impacts liés aux changements apportés par le système. Ces deux approches très contrastées permettent d'aborder un problème d'évaluation selon deux angles différents dont il ne faut pas confondre les finalités et connaitre leurs forces et leurs faiblesses méthodologiques.

Dans le cas de l'évaluation environnementale stratégique de la mobilité quotidienne des personnes, les objectifs peuvent être multiples orientant l'étude soit vers une ACV-attributionnelle ou une ACV-conséquentielle. La phase descriptive d'une ÉES, correspondant à l'état initial, privilégierait une ACV-A propice à la description fine du système. En revanche, l'évaluation des alternatives dans l'ÉES serait mieux traitée par ACV-C pour capter des effets et conséquences à plus long terme. L'utilisation de l'ACV pour l'évaluation environnementale

stratégique de la mobilité amène donc à repenser les cadres traditionnelles de l'ACV pour l'adapter à cet objet d'étude.

3.2.3. ACV-Prospective :

Afin de combler le manque de portée à long terme de l'approche ACV-A ainsi que le manque de finesse de l'ACV-C, le développement de l'ACV-Prospective permet d'évaluer le cycle de vie d'un système en détail pour un futur donné (Dandres, 2012). Cette approche repose sur la base méthodologique de l'ACV-A avec l'intégration de données prospectives qui caractérisent les processus qui constituent le système étudié. Afin d'intégrer les processus émergents et les nouvelles relations, les frontières initiales du système doivent être élargies pour englober l'ensemble des processus actuels et futurs du système. L'ACV-P de la mobilité de demain avec des carburants alternatifs nécessite d'intégrer les chaines d'approvisionnement de ces nouveaux carburants. La génération de données prospectives résulte des différentes méthodes de prospective existantes (Weidema, 2003).

- Les méthodes d'extrapolation : Basées sur l'hypothèse que l'avenir est l'extension de faits passés, les méthodes d'extrapolation reposent principalement des prolongations de tendances et des régressions.
- Les méthodes modélisatrices : À partir des connaissances passées de différents mécanismes, les modèles prédisent différents futurs en fonction de paramètres exogènes.
- Les méthodes participatives : Des panels d'experts ou d'acteurs se réunissent pour dessiner une vision du futur idéale.
- Les méthodes de scénarisation : L'avenir étant incertain, chaque scénario créé représente une vision du futur. Ces visions peuvent découler des méthodes modélisatrices ou participatives. Les scénarios exploratoires décrivent aussi différents futurs possibles en intégrant des techniques imaginatives. Les scénarios normatifs partent d'un futur voulu pour ensuite retracer les étapes nécessaires à sa réalisation (*backcasting scenario*).

Afin d'adapter la méthode de prospective, il est nécessaire de distinguer les processus primaires, pour lesquels les impacts environnementaux seront importants et les processus

secondaires, qui ont un faible bilan environnemental. Les données liées aux processus primaires seront imaginées à travers des méthodes de prospective adaptées en fonction des objectifs temporels de l'étude. Les données liées aux processus secondaires seront produites à partir de méthodes plus génériques, par extrapolation par exemple (Weidema *et al.*, 1999).

Le recours à des scénarios prospectifs permet de simuler différentes orientations technologiques, mais aussi politiques ou sociales. En fonction de l'objectif de l'ACV-P, la construction des scénarios repose sur une méthode prospective différente (extrapolation, modélisation, participation, exploration). Deux grands types de scénarios sont envisageables dans le cadre d'une ACV, les scénarios « que faire si » (*what-if scenario*) et les scénarios de rupture (*cornerstone scenario*). Les scénarios « que faire si » ou prédictifs reposent sur une bonne connaissance de la situation où il est possible de partir de données existantes et d'appliquer certaines hypothèses d'évolution. L'approche prédictive est pertinente pour l'étude quantitative d'un objet spécifique sans changements majeurs de ses mécanismes à long terme. En revanche, les scénarios de rupture reposent sur une plus faible connaissance de la situation où les alternatives sont très contrastées. L'approche exploratoire par scénarios de rupture apporte des connaissances générales sur la situation étudiée avec un horizon temporel pouvant être long. Les scénarios prédictifs sont plus opérationnels, mais moins stratégiques que les scénarios exploratoires. Le développement d'un scénario peut aussi résulter d'un processus itératif où l'évaluation du scénario contribue à la modification et la construction d'un nouveau scénario (Fukushima & Hirao, 2002; Pesonen *et al.*, 2000).

La mise en place d'un scénario avec un horizon temporel lointain a des effets dissociés dans le temps sur le cycle de vie du système étudié. Le développement d'ACV-P peut alors nécessiter la mise en place d'approches dynamiques afin d'intégrer des délais différents et parfois non linéaires pour les différents processus du système. Les impacts environnementaux du cycle de vie sont alors fonction du temps et des séries temporelles peuvent être analysées (Dandres, 2012). Une approche dynamique peut aussi être appliquée sur l'analyse d'impacts sur l'environnement en intégrant des évolutions pour les facteurs de caractérisation des impacts. Cependant, ce type d'approche est complexe et reste peu utilisé. L'utilisation de modèles dynamiques pour représenter le cycle de vie ou les impacts environnementaux est particulièrement pertinente pour les études ayant un horizon temporel lointain. La modélisation dynamique des impacts sur le réchauffement climatique s'est développée en conséquence de la très longue portée temporelle de cet impact et de la non-linéarité du phénomène qui dépend du gaz à effet de serre et du moment de l'émission (Levasseur, 2011).

Le développement méthodologique de l'ACV-Prospective, qui est à la croisée de l'approche attributionnelle et conséquentielle et des méthodes prospectives, permet d'affiner l'analyse classique de l'ACV aux problématiques de prise de décision et de prospective des PPP et de l'ÉES. Cependant, la dimension territoriale présente dans les PPP et l'ÉES n'est pas appréhendable avec les méthodes d'ACV précédemment présentées.

3.3. ACV spatialisée et territorialisée :

Une des limites de l'ACV pour l'ÉES réside dans l'agrégation spatiale des substances et de l'hypothèse de la constance spatiale de l'environnement (Jolliet *et al.*, 2010). Or l'ÉES s'applique sur un territoire spécifique où les activités et leurs impacts sur l'environnement se répartissent de façon hétérogène dans un écosystème non homogène. Deux développements méthodologiques de l'ACV intègrent ces caractéristiques spatiales avec l'ACV spatialisée et l'ACV territorialisée.

3.3.1. ACV Spatialisée :

La problématique de la spatialisation de l'ACV se pose pour l'ensemble des étapes de réalisation d'une ACV (définition des objectifs, inventaire, analyse des impacts et interprétation) (Marchand, 2013; Nitschelm *et al.*, 2016). En fonction du système étudié, la fonction de référence peut diverger d'une localisation à une autre, notamment lorsque le système est multifonctionnel comme dans le cas de méthaniseurs où différentes usines de valorisations de déchets hiérarchisent leurs fonctions principales différemment (arbitrage entre traiter des déchets, produire des fertilisants ou produire de l'énergie renouvelable). Ces choix locaux influent sur les règles d'allocation appliquées dans l'ACV (Laurent, 2015).

La réalisation d'inventaire spatialisé est un enjeu soulevé depuis plusieurs années par la communauté scientifique d'ACV, car une acquisition spatialisée de données permet de réduire les incertitudes. Le constat est identique pour la dimension temporelle. La collecte de données spatialisée peut passer par une géolocalisation des processus impliqués dans le système ou par

l'utilisation de bases de données régionales. La première option rallonge significativement le processus d'inventaire, mais réduit significativement les incertitudes surtout pour les phases de cycles de vie qui implique du transport et de la distribution (Finnveden *et al.*, 2009; Hellweg & Mila i Canals, 2014; Marchand, 2013; Nitschelm *et al.*, 2016).

Les principaux développements méthodologiques de spatialisation se sont focalisés sur l'analyse des impacts sur l'environnement en spécifiant les facteurs de caractérisation en fonction de l'environnement récepteur. En fonction de l'échelle spatiale des catégories d'impacts, le recours à la spatialisation n'est pas nécessaire, elle concerne principalement l'acidification, l'eutrophisation, la formation d'ozone troposphérique, la toxicité, l'écotoxicité ou encore l'épuisement en ressource en eau. En fonction du niveau de résolution, le nombre de paramètres décrivant l'environnement varie, à un niveau fin des paramètres précis de météorologie ou de topologie sont nécessaires (Sala *et al.*, 2015). Pour certains impacts, le recensement des écosystèmes est nécessaire pour construire de nouveaux facteurs de caractérisation. Le développement de la méthode de caractérisation IMPACT World+ spécifie un certain nombre de facteurs en fonction de caractéristiques régionales (pays, bassin versant) (Bulle *et al.*, 2014). Cependant, le croisement entre la spatialisation des processus et la spatialisation des méthodes de caractérisation reste un défi en raison des outils numériques nécessaires.

Pour la phase d'interprétation, l'usage de la cartographie pour visualiser les impacts ou les émissions est un bon moyen d'identifier les points critiques de l'étude au niveau spatial (Loiseau, 2014). En revanche, les calculs d'incertitudes et d'erreurs sont plus difficilement réalisables en prenant en compte les paramètres locaux (Bjørn *et al.*, 2016). L'usage de paramètres locaux réduit néanmoins les incertitudes en comparaison avec des paramètres génériques (Hellweg & Mila i Canals, 2014).

Le développement de l'ACV spatialisée soulève la question de la temporalité, car les caractéristiques de l'environnement varient dans le temps et les processus impliqués dans le système possèdent des rythmes de fonctionnement différents. L'exemple des heures de pointe illustre bien le rythme journalier des transports, la formation de l'ozone est par contre un phénomène saisonnier, accéléré pendant l'été.

Les développements scientifiques sur la spatialisation de l'ACV permettent de décrire plus précisément le lien entre les émissions et les impacts en considérant : la quantité de substance émise, les propriétés intrinsèques de la substance, mais aussi les caractéristiques spatiales de la source d'émission, ainsi que les caractéristiques de l'environnement de réception.

3.3.2. ACV Territorialisée :

Le deuxième volet méthodologique qui se développe depuis quelques années concerne l'élargissement du champ d'étude de l'ACV. Initialement conçu pour évaluer des produits ou des services, cet outil tend aujourd'hui à étudier des systèmes de plus en plus complexes et larges. Le territoire fait partie des objets au cœur de certains développements méthodologiques, notamment avec l'ACV territorialisée. Ce changement d'objet d'analyse nécessite des modifications méthodologiques afin de prendre en considération, notamment, la multifonctionnalité d'un territoire. La DATAR définit quatre grandes fonctions à un territoire, une fonction « résidentielle », une fonction « productrice », une fonction « récréative et touristique » et une fonction « de nature » (Datar, 2003).

L'ACV n'est pas le seul outil d'évaluation environnementale analysant les impacts d'un territoire, Loiseau dénombre dans sa recherche bibliographique neuf méthodes et outils quantitatifs abordant cet objet (Loiseau *et al.*, 2012):

- L'évaluation des risques sur l'environnement et sur la santé humaine, caractérisation d'un risque en quantifiant le danger, l'exposition et les effets sur l'environnement et la santé humaine.
- L'empreinte écologique, surface nécessaire pour les ressources consommées et la dégradation des déchets d'une population.
- L'analyse de flux de matières, bilan des différentes matières entrantes, sortantes ou accumulées dans un système.
- L'analyse de flux de substances, suivi d'une substance dans un périmètre donné à travers les différents systèmes présents.
- Les tableaux entrée-sorties de flux physiques, comptabilité des flux physiques circulant entre les différents secteurs économiques et l'environnement.
- L'analyse des réseaux écologiques, comptabilité des flux circulant entre les composants de l'écosystème (producteur, consommateur, décomposeur …) et l'environnement.
- L'émergie, quantité d'énergie solaire nécessaire directement ou indirectement pour le fonctionnement du système étudié.

- L'éxergie, quantité d'énergie utilisable dépendant de la qualité de conversion des différentes énergies du système.
- L'analyse du cycle de vie.

Parmi ces différentes méthodes quantitatives d'évaluation environnementale de territoire, aucune méthode ne répond à l'ensemble des critères qui peuvent être formulés pour ce type d'évaluation. Seule une approche hybride avec des méthodes complémentaires peut aboutir à une évaluation satisfaisante. Cependant, l'ACV présente de nombreux avantages à son application sur un territoire, notamment son aspect multicritère et sa vision en cycle de vie qui intègre les transferts de charges. Les principales limites à l'application de l'ACV à un territoire résident dans la multifonctionnalité du territoire, le nombre conséquent d'activités différentes à évaluer et le manque de précision sur les impacts liés à la biodiversité, l'usage du sol ou de l'eau (Loiseau *et al.*, 2012).

L'application d'une ACV territorialisée sur la globalité du territoire reste encore marginale, la majorité des études ACV mises en œuvre sur un territoire se focalise sur une activité ou une filière spécifique (Mirabella *et al.*, 2018; Nitschelm *et al.*, 2016). Cette restriction fonctionnelle du territoire permet d'écarter une partie de la problématique de multifonctionnalité. Loiseau et al. proposent cependant une méthode pour capter la multifonctionnalité d'un territoire rapportant les impacts environnementaux du territoire à la quantité de services rendus par ce même territoire avec 6 catégories de services, le nombre de résidences principales, le nombre de résidences secondaires, le nombre d'emplois salariés, la surface d'agricole utile, la surface de zone Natura 2000 et le pourcentage de déchets traités localement (Loiseau *et al.*, 2013).

Le territoire, défini par son caractère politico-administratif, possède une limite géographique au sein de laquelle un certain nombre d'activités et d'acteurs sont présents. Cette délimitation permet à l'ACV territorialisée de faire la différence entre ce qui est à l'intérieur du territoire (activités de premier plan) et ce qui est à l'extérieur (activités d'arrière-plan). La méthodologie de collecte de données entre les activités sur le territoire et celle hors du territoire diverge avec une approche ascendante pour les activités du territoire afin d'obtenir des données spécifiques au terrain. Les données liées aux activités situées hors du territoire, mais contribuant au fonctionnement de ce dernier, résultent principalement d'une approche descendante en appliquant des données génériques, d'échelles supérieures, en appliquant des facteurs d'approximations (Azapagic *et al.*, 2007; Loiseau, 2014). Pour les émissions de substances polluantes, la même différenciation est faite entre les émissions directes qui ont lieu sur le

territoire et les émissions indirectes qui ont lieu en dehors. Pour les émissions directes, une description plus fine du contexte environnemental permet d'affiner les facteurs de caractérisations pour quantifier les impacts environnementaux (Potting & Hauschild, 2006).

L'application d'une ACV pour la mobilité quotidienne d'un territoire se confronte à une partie des problématiques de l'ACV territorialisée. La multiplicité des fonctions et des services remplis par la mobilité quotidienne reste présente (rôle économique, rôle social). De plus, des données spécifiques au territoire seront à collecter pour étudier la mobilité quotidienne correspondante.

Conclusion de la partie 3 :

Le choix de l'ACV comme méthode d'évaluation environnementale de la mobilité quotidienne des personnes fournit un cadre robuste et standardisé pour l'évaluation. Le niveau de détail élevé sur les différents processus technologiques associés à la mobilité fait de l'ACV un outil efficace pour repérer les points clés pour les différents enjeux environnementaux évalués. Cependant, appliquer une ACV à un système aussi large et complexe soulève plusieurs points de blocage :

- La quantité de données nécessaires importante pour analyser un système aussi vaste que la mobilité quotidienne des habitants d'une aire urbaine.
- La capacité de l'ACV à évaluer les conséquences directes et indirectes d'une décision en termes de mobilité à des horizons de temps variables.
- Le degré de spécificité territoriale à implémenter dans l'ACV pour capter les principales caractéristiques du territoire sur lequel s'effectue la mobilité.
- La spatialisation de certaines données et certains impacts de l'ACV dans le but de réduire la variabilité associée à certains impacts environnementaux.

Les développements méthodologiques réalisés sur l'ACV-Attributionnelle, l'ACV-Conséquentielle, l'usage de scénarios en ACV, l'ACV spatialisée et l'ACV territorialisée sont des pistes pour dépasser ces points de blocage, cependant, l'application complète de toutes ces propositions méthodologiques à la mobilité quotidienne des habitants d'une aire urbaine reste théorique.

Le choix d'utiliser une ACV pour évaluer les impacts environnementaux de la mobilité quotidienne d'une aire urbaine permet d'affiner l'hypothèse de recherche 1 formulée dans le Chapitre I, « *Une approche multicritère incluant le cycle de vie des transports est indispensable pour l'analyse environnementale de la mobilité quotidienne de personnes actuelle et à venir* ».

Hypothèse de recherche 1bis : L'utilisation de l'ACV apporte une vision multicritère et systémique nécessaire pour les enjeux actuels et futurs de la mobilité quotidienne de personnes.

Cette hypothèse interrogera donc la capacité de l'ACV mise en œuvre à représenter et évaluer les divers enjeux environnementaux associés à la mobilité actuelle et future.

Synthèse du chapitre II :

Au travers les divers éléments présentés dans ce chapitre, la démarche générale de cette thèse a été présentée pour l'évaluation environnementale de la mobilité quotidienne et urbaine des personnes. En partant des différents types d'évaluations existants pour la mobilité, le choix d'une Évaluation Environnementale Stratégique (ÉES) a été retenu. Ce cadre pour l'évaluation permet de relier la notion de mobilité avec les différents documents de planification territoriale, tout en mettant en lumière un manque de méthode quantitative pour ce type d'évaluation.

Malgré les problématiques de métropolisation et d'expansion urbaine, l'aire urbaine a été retenue comme périmètre d'analyse pertinent. Ce périmètre, défini par l'INSEE, se justifie par son caractère morphologique et fonctionnel lui permettant d'inclure la majorité des déplacements quotidiens d'une zone urbaine. De plus, une aire urbaine est composée d'espaces hétérogènes en termes de morphologies, de politiques et de caractéristiques socio-économiques enrichissant ainsi l'analyse de sa mobilité quotidienne.

Une fois le cadre et le périmètre d'évaluation définis, une méthode quantitative a été proposée couplant la modélisation d'interactions transport-urbanisme (LUTI) avec l'Analyse en Cycle de Vie (ACV). L'application de cette méthode dans le cadre d'une ÉES de la mobilité quotidienne des habitants d'une aire urbaine fournit à la fois des éléments d'analyse sur les choix méthodologiques réalisés, tout en apportant des éléments généraux sur la réalisation d'une ÉES de la mobilité.

Pour ce type d'évaluation, la modélisation LUTI présente l'intérêt de représenter la mobilité quotidienne des personnes de façon systémique en l'intégrant dans son système urbain. Le large panel de modèles LUTI existant aujourd'hui permet de définir les niveaux de résolution spatiale et temporelle ainsi que le nombre d'éléments du système urbain pris en compte. Cependant, la recherche de rigueur et d'exhaustivité de la démarche scientifiques tend à occulter les soucis de transparence et de communicabilité qui sont importants pour les décideurs.

Cette nécessité de transparence est aussi présente pour l'ACV afin de faciliter l'appropriation par les décideurs des résultats détaillés sur les enjeux et impacts environnementaux associés à l'objet analysé. Pour l'ÉES de la mobilité quotidienne de personnes, la méthode standard d'ACV comporte quelques limites, notamment pour les aspects prospectifs, spatialisés et territorialisés, appelant ainsi à adapter l'ACV

Chapitre III : La méthode SIMBAD-ACV

Contexte :

La démarche générale, précédemment décrite, montre l'intérêt du développement d'un outil quantitatif pour l'Évaluation Environnementale Stratégique de la mobilité quotidienne des personnes. La proposition méthodologique de cette thèse met en avant le couplage d'un modèle transport-urbanisme avec une Analyse de Cycle de Vie comme outil d'évaluation. Les intérêts méthodologiques et théoriques décrits au chapitre 2 seront mis en application dans ce chapitre pour l'aire urbaine de Lyon. Le cas d'application lyonnais, le modèle transport-urbanisme utilisé et le cadre de l'ACV seront décrits dans ce chapitre.

Objectifs du chapitre :

- Expliquer les interactions entre le modèle transport-urbanisme et l'ACV
- Présenter le territoire d'application lyonnais et ses spécificités
- Décrire le fonctionnement du modèle SIMBAD choisi pour représenter le système urbain.
- Montrer les éléments représentés dans le système de l'ACV et expliquer les méthodes d'évaluation adopter dans la thèse
- Mettre en avant la capacité des deux outils utilisés pour réaliser une ÉES de la mobilité quotidienne des personnes

Plan du chapitre :

La première partie de ce chapitre présentera le fonctionnement général du couplage entre le modèle transport-urbanisme et l'ACV sans spécifier d'outil précis afin d'être généraliste. Le contexte d'une Évaluation Environnementale Stratégique va guider et poser des contraintes sur les choix méthodologiques réalisés par la suite pour le modèle transport-urbanisme et l'outil d'ACV qui seront développés.

Le terrain d'application de l'aire urbaine de Lyon sera décrit dans cette première partie en apportant des éléments sur son périmètre retenu, mais aussi sur l'unicité de ce territoire avec sa morphologie urbaine et son système de transport.

La deuxième partie du chapitre donnera les éléments de fonctionnement du modèle SIMBAD, développé au LAET, qui a été retenu dans cette thèse pour représenter le système urbain et sa mobilité quotidienne. L'accent de cette partie sera mis sur la présentation de la chaine de modélisation liée aux déplacements ainsi que sur l'aspect désagrégé du modèle qui permettra l'alimentation de l'outil d'ACV.

Dans la troisième partie, le cadre de l'Analyse du Cycle de Vie sera posé en reprenant la méthode standardisée ISO 14040. Le système considéré sera dessiné avec l'ensemble de ses processus et les différentes bases de données utilisées pour fournir les éléments quantitatifs. La spécificité territoriale des données utilisées sera mise en avant avec la création de différents parcs de véhicules. Les modifications apportées sur le système pour permettre la simulation de parcs automobiles prospectifs seront présentées.

Après avoir analysé les demandes des acteurs du territoire en matière d'indicateurs environnementaux, les différentes méthodes retenues d'évaluation d'enjeux seront exposées. La méthode reprend des facteurs de caractérisation développés de façon générique, et propose aussi de coupler à cette approche globale avec, d'une part, une approche spatialisée pour rendre compte des enjeux de santé environnementale et, d'autre part, une approche désagrégée pour révéler des déterminants socio-économiques et spatiaux de performance environnementale de la mobilité quotidienne des personnes.

Partie 1 : Description générale de la méthode SIMBAD-ACV

Cette partie présente les grands principes sur lesquels repose la méthode d'évaluation environnementale de la mobilité quotidienne et urbaine des personnes et leurs implications sur la modélisation LUTI et l'ACV qui sont utilisées. Une description est ensuite faite de l'aire urbaine de Lyon qui constitue le terrain d'application de la méthode de couplage entre une modèle LUTI et une ACV.

La réalisation d'un modèle transport-urbanisme est longue et coûteuse pour une aire urbaine. De plus, développer un nouveau modèle ne fait pas partie de la position de recherche adoptée. Nous avons donc choisi de travailler sur un modèle transport-urbanisme qui existe déjà et qui est fonctionnel : le modèle SIMBAD qui s'applique à l'aire urbaine de Lyon permet, entre autres, d'inclure une variété importante de territoires, de technologies de transports et de comportements, qui seront autant d'entrées possibles pour les analyses et la prospective de la mobilité quotidienne des personnes.

1.1. Couplage entre modèle transport-urbanisme et ACV

Dans cette thèse, nous proposons l'élaboration d'un outil quantitatif d'ÉES de la mobilité quotidienne des personnes qui repose sur le couplage de deux outils. Les modèles LUTI et la méthode d'ACV ont été développés séparément l'un de l'autre par deux communautés scientifiques différentes. Les règles de couplage de ces deux outils et les exigences qui en découlent des deux côtés pour la réalisation d'un outil quantitatif d'ÉES sont donc présentées dans les paragraphes suivants.

1.1.1. Connexion entre modèle LUTI et ACV

Les modèles transport-urbanisme ont pour but de représenter le système urbain et de simuler les différentes interactions qui ont lieu entre les localisations et la mobilité quotidienne des personnes. Les objets principaux représentés dans ces modèles sont les agents et les territoires qui constituent le système urbain. De l'autre côté, l'ACV utilise principalement la description des systèmes technologiques pour estimer leurs impacts environnementaux. Il est donc nécessaire de convertir les sorties du modèle LUTI pour qu'elles correspondent aux entrées de l'ACV afin de réaliser le couplage.

La première conversion à réaliser transforme les interactions spatiales des agents du système urbain en un usage de technologies de transports. Pour cela, un niveau fin de désagrégation et de précision du système de transport est primordial afin de répartir les flux de personnes sur l'ensemble des modes et des itinéraires utilisés. Les choix méthodologiques du modèle transport sont centraux, car c'est ce dernier qui fait le lien entre le modèle d'usage du sol et les méthodes d'évaluation environnementale. Cependant, à l'échelle d'une aire urbaine, les modèles transport ne décrivent pas finement les technologies utilisées par le système de transport, ils ne rendent compte que de grandes catégories de modes de transport (voiture personnelle, transport en commun, modes doux). Il existe peu d'exemples comme celui du modèle micro-agent développé par Querini et Benetto (2015), qui inclut pour chaque agent un module de possession de voiture décrivant le véhicule possédé par le ménage en fonction de son type (essence, diesel, hybride ou électrique), son segment (citadine, polyvalente, routière, monospace…), sa consommation et son poids. Avec ce module, ils quantifient les gains environnementaux de différentes mesures incitatives sur l'acquisition de véhicules électriques.

Une des principales problématiques de la conversion du modèle LUTI à la méthode d'ACV repose donc sur la représentation du parc automobile ainsi que du parc de transport en commun.

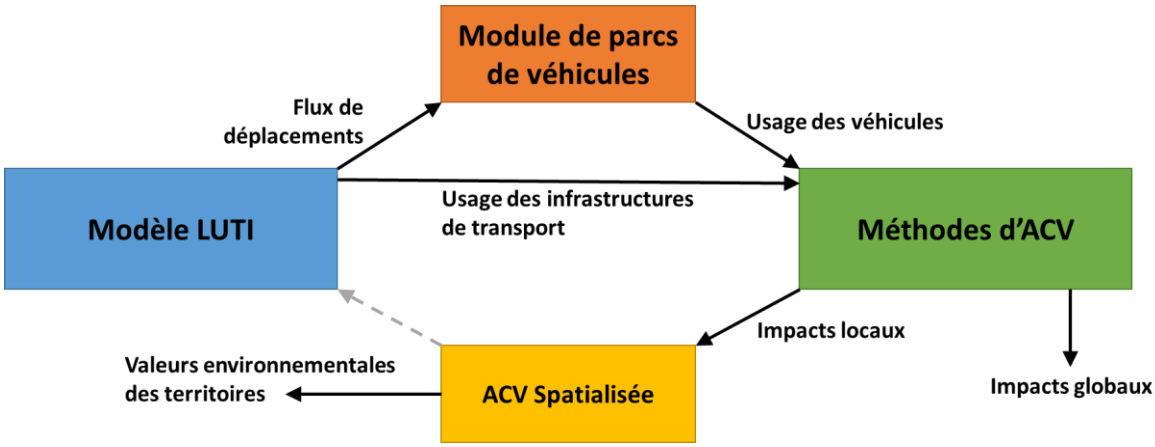
La deuxième conversion qui pourrait partir de l'ACV vers le modèle LUTI consiste en une prise en compte des conditions environnementales dans les interactions spatiales. Ce type de boucle rétroactive est mis en place dans certains modèles de microsimulation transport-urbanisme-environnement (Land-use, Transport and Environmental model LTE model). Ces modèles considèrent que le choix de localisation des agents dépend en partie de la qualité environnementale des différentes zones. Par exemple, le projet européen PROPOLIS intègre

aussi dans ses simulations urbaines ce type de boucle rétroactive en soulignant que peu d'impacts environnementaux affectent le fonctionnement urbain. Pour cela ils quantifient par cellule de 100 m x 100 m la qualité de l'air et le niveau sonore. Les choix de localisation étant impactés uniquement par la disponibilité du terrain, la contamination du sol, la qualité de l'air et le niveau sonore (Wagner & Wegener, 2007). Les choix de transport apparaissent en revanche peu contraints par l'environnement, si ce n'est par une hausse des prix des carburants (Lautso *et al.*, 2004).

La méthodologie d'analyse de l'ACV n'oblige pas à spatialiser les impacts environnementaux. Le développement de l'ACV spatialisée, qui localise les impacts environnementaux et quantifie l'environnement récepteur, pourrait permettre de fournir une partie de l'information nécessaire à l'intégration des impacts environnementaux générés par les transports dans le modèle LUTI (Nitschelm *et al.*, 2016). Cependant, on ne sait pas aujourd'hui quantifier et modéliser l'appétence des agents pour des territoires avec des performances environnementales plus ou moins bonnes à l'échelle d'une aire urbaine.

Dans le cadre de cette thèse, le couplage entre le modèle LUTI et l'ACV sera réalisé de façon linéaire sans boucle de rétroaction des impacts environnementaux vers le modèle LUTI. Ce choix permet à la fois d'utiliser un modèle LUTI déjà existant sans devoir intégrer des choix de préférences environnementaux ainsi que de limiter le développement d'une ACV spatialisée. Les données d'entrées de l'ACV proviennent donc à la fois des taux d'utilisation des infrastructures fourni par le modèle de transporte et de la conversion des flux de déplacements en usage de véhicules par un module de parcs automobiles et de transports en commun. Les résultats de l'ACV seront analysés à la fois globalement et localement, avec une approche spatialisée, afin de fournir une information sur les territoires. La Figure III-1 présente synthétiquement le principe de couplage entre le modèle LUTI et l'ACV développé dans cette thèse. Des développements supplémentaires sont à réaliser pour compléter la boucle entre modèle LUTI et méthodes d'ACV (flèche grise).

Figure III-1 : Schéma du couplage entre le modèle LUTI et l'ACV



Source : traitement auteur

1.1.2. Les exigences pour le modèle transport-urbanisme

Tous les modèles transport-urbanisme ne peuvent pas être utilisés pour l'ÉES de la mobilité quotidienne des personnes. En effet, **le périmètre doit déjà être suffisamment grand** pour inclure la majorité des flux de déplacements liés à la mobilité quotidienne des personnes, comme dans notre cas avec le périmètre de l'aire urbaine de Lyon.

Pour réaliser le couplage avec l'ACV, le **modèle transport** utilisé dans le modèle général doit être suffisamment **désagrégé** pour pouvoir clairement identifier l'usage des véhicules et des infrastructures de transport. Pour les véhicules personnels, les **taux d'occupation** des véhicules ainsi que les **conditions de circulation** (vitesses, accélérations) sont deux variables importantes pour l'analyse environnementale (André *et al.*, 2013 ; Le Féon *et al.*, 2012). Pour le transport en commun, une connaissance du **mode détaillé** est primordiale surtout pour un territoire comme celui de l'aire urbaine de Lyon qui possède des bus, des cars, des trains, des tramways, des funiculaires ainsi que des métros. La **localisation des flux** sur le réseau par le modèle transport est aussi un atout pour spatialiser une partie des impacts environnementaux.

Afin de garder une cohérence entre le niveau de désagrégation du modèle transport, le **modèle d'usage du sol** doit lui aussi être de nature **désagrégé**e afin de décrire les interactions spatiales. En plus de faire apparaitre des **déterminants de mobilité d'ordre socio-économique**

(Wilson, 2010), une modélisation au niveau des ménages permet de faire émerger des paramètres centraux pour l'évaluation environnementale telle que le **taux de motorisation**.

Pour finir, **les aspects dynamique et prospectif** d'un modèle LUTI sont essentiels pour fournir une approche stratégique à moyen et long termes sur la mobilité quotidienne. Ces deux aspects permettent d'introduire des mécanismes économiques, démographiques et résidentiels avec des temporalités et des dynamiques différentes, ainsi que d'explorer différentes orientations possibles du système urbain et de sa mobilité. Pour l'approche prospective, le modèle utilisé doit pouvoir prendre en compte des variables exogènes afin de construire des scénarios, notamment pour les variables influençant les mobilités quotidiennes et résidentielles telles que des contraintes spatiales ou de réseaux (Tannier *et al.*, 2016).

1.1.3. Les exigences pour l'ACV

De façon analogue au modèle LUTI, la **frontière du système** étudié par la méthode d'ACV doit être **suffisamment large** pour inclure l'ensemble des processus majeurs qui contribuent ou contribueront à la performance environnementale de la mobilité quotidienne de personnes. Dans le cas d'une étude prospective avec de nouvelles motorisations, une description de l'ensemble de la chaine énergétique ainsi que de la chaine de production des véhicules est à inclure dans le périmètre. Le cycle de vie des infrastructures constitue aussi un poste non négligeable d'impacts qui mérite d'être considéré (Le Féon, 2014). Cette approche prospective amène à trouver un compromis en l'élargissement des frontières du système, et l'accès à des données fiables pour estimer les impacts potentiels à des **horizons de moyen et long termes**.

L'application de la méthode d'évaluation sur **un territoire particulier**, l'aire urbaine de Lyon, contraint la méthode d'ACV à faire des hypothèses sur les spécificités locales du système. Les frontières géographiques étant définies, un niveau de détails plus important doit être accordé aux processus qui ont lieu sur le territoire tout en quantifiant la dépendance avec les régions externes et les impacts délocalisés (Mirabella *et al.*, 2018). Afin de faire des liens avec l'approche spatiale du modèle LUTI, une **analyse spatialisée** sur les processus situés sur le territoire sera proposée dans le développement méthodologique de l'ACV. Ces contraintes territoriales et de spatialisation impliquent une collecte de données plus fines pour certains processus du système (Nitschelm *et al.*, 2016).

Dans le cadre de ce travail prospectif où différentes alternatives seront testées, une **approche multicritère** permettra de mieux prendre en compte les multiples impacts environnementaux impliqués. La méthode d'évaluation d'impacts de l'ACV doit donc inclure un panel varié d'indicateurs qui doivent être choisis en fonction des principaux enjeux environnementaux des PPP auxquels sont confrontés les preneurs de décisions (Risse, 2004).

Enfin, pour l'interprétation des résultats d'ACV, **différentes clés d'attribution des impacts** seront proposées afin de rendre compte de différents enjeux. Dans le cadre de cette thèse, la répartition par processus technologiques, particulièrement utilisée dans les études d'ACV, n'est pas suffisante pour rendre compte des enjeux de mobilité qui dépendantes de déterminants individuels et territoriaux. Le couplage avec le modèle transport-urbanisme nous permettra d'affecter les impacts environnementaux à différents profils socio-économiques des ménages ainsi qu'à leurs territoires d'origine.

1.2. Un cas d'étude lyonnais

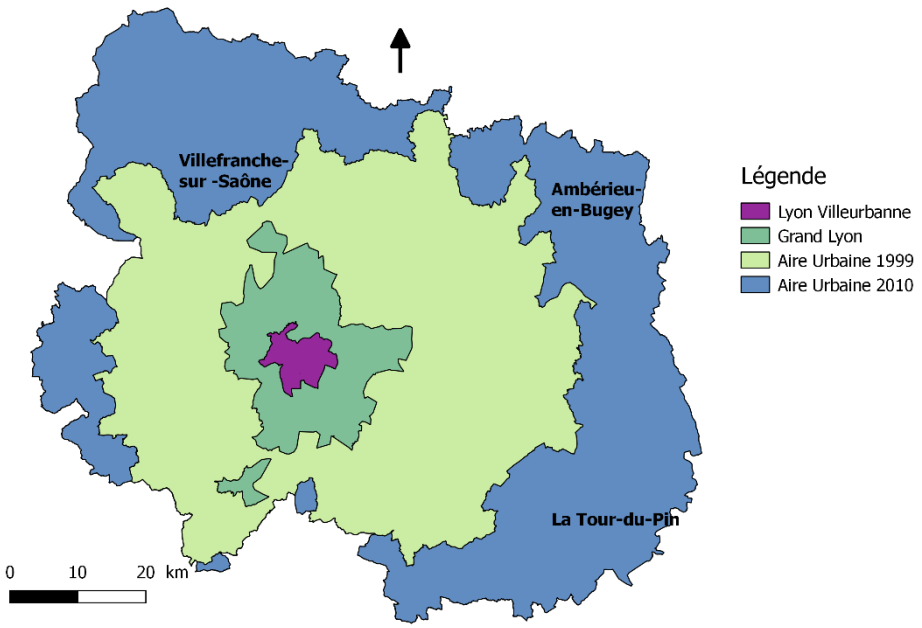
1.2.1. L'aire urbaine de Lyon de 1999

Une aire urbaine constitue un terrain adapté pour l'étude de la mobilité quotidienne en raison de sa définition qui inclut à la fois les propriétés morphologiques et fonctionnelles d'un territoire (cf. Chap I 2.2.1). Parmi l'ensemble des 159 aires urbaines recensées en France en 2010, l'aire urbaine de Lyon est la deuxième plus grande en population avec 2 265 000 personnes en 2014, après celle de Paris (12 476 000 habitants). L'aire urbaine de Marseille — Aix-en-Provence (1 734 000 habitants) complète le podium même si la ville de Marseille est plus peuplée que la ville de Lyon. En termes de surface, l'aire urbaine de Lyon arrive aussi en deuxième position avec 6 019 km², englobant plusieurs pôles secondaires tels que L'Isle-d'Abeau, Givors, Villefranche ou Ambérieu-en-Bugey (Brutel, 2011).

Cependant, le territoire d'étude de cette thèse ne correspond pas au périmètre de l'aire urbaine de Lyon de 2010 en raison du modèle transport-urbanisme SIMBAD, dont le développement a commencé en 2005, avec un périmètre correspondant à l'aire urbaine de Lyon telle que définie en 1999 (Nicolas *et al.*, 2009). La différence majeure entre ces deux découpages est la surface des aires urbaines. Celle de 1999 couvre 55 % de l'aire urbaine de 2010, soit 3306 km². En revanche, l'aire urbaine de 1999 représente 83 % de la population avec

1 890 000 habitants (Tableau III-1). La Figure III-2 représente les découpages des aires urbaines de Lyon pour 2010 et 1999 ainsi que les limites de Lyon-Villeurbanne, qui constitue le centre de l'agglomération, et le Grand Lyon, qui correspond à la Métropole. Notre travail portera donc sur le territoire de l'aire urbaine de Lyon telle que définie en 1999.

Figure III-2 : Découpages de l'aire urbaine de Lyon (2010 et 1999)



Source : traitement auteur

Tableau III-1 : Répartition de la population de l'aire urbaine de Lyon

	Population en 2014	Poids dans l'aire urbaine de 2010
Aire urbaine de Lyon telle que définie en 2010	2 265 375	100%
Aire urbaine de Lyon telle que définie en 1999	1 889 816	83,4%
Grand-Lyon	1 354 476	59,8%
Lyon-Villeurbanne	655 158	28,9%

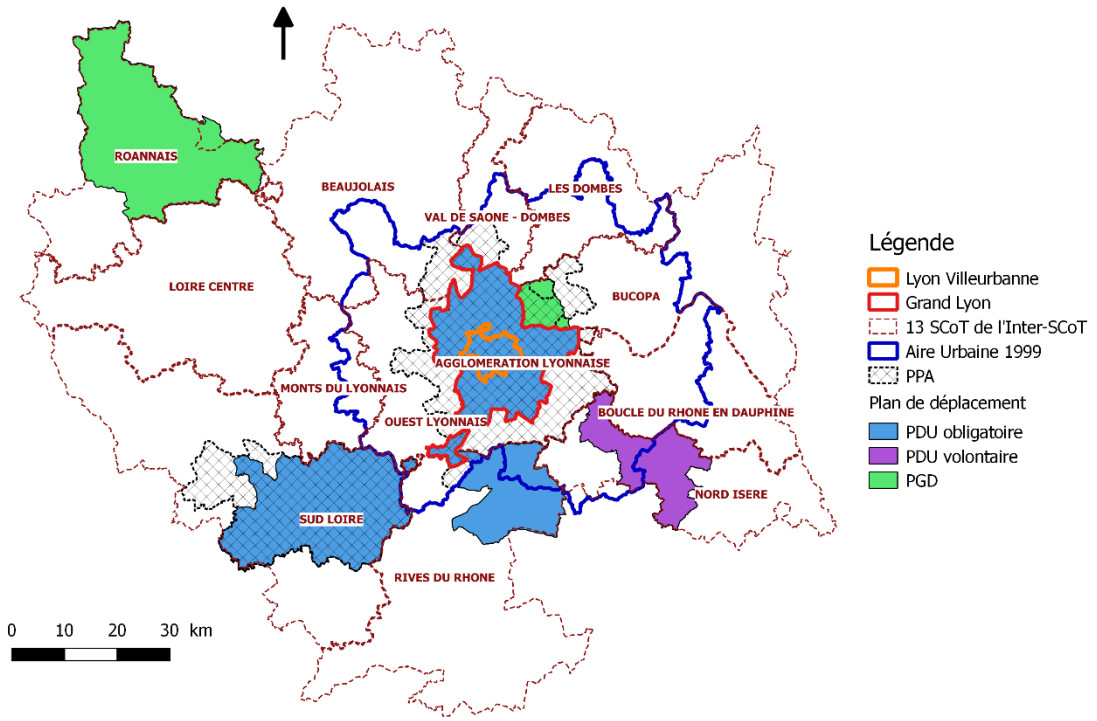
Source : INSEE

Sur ce territoire d'étude de l'aire urbaine de 1999, la croissance démographique a été forte ces dernières années avec un taux de croissance démographique moyen de +0,8 % par an entre 1990 et 2014. La croissance démographique n'a cependant pas été homogène sur le territoire. Après s'être fortement établis dans le centre et les proches banlieues dans les années 50 et 60, les ménages se sont progressivement appropriés les zones périurbaines en privilégiant les maisons individuelles. Malgré cette diffusion, certains quartiers de Lyon et de Villeurbanne sont restés attractifs ces dernières années (Agence d'urbanisme pour le développement de l'agglomération lyonnaise, 2011).

Au sein de cette aire urbaine, la composition de la population est variée et se différencie clairement de la composition moyenne de Lyon. L'analyse réalisée par Pelé (2018) décrit, pour 2014, une population plus active dans l'aire urbaine de Lyon que le reste du territoire national (53,1 % contre 49,7 %), avec par ailleurs une part plus grande de cadres et de professions intellectuelles supérieures. La population est aussi plus jeune (31,5 % contre 26,7 % pour la tranche 18-40 ans), avec une part plus faible de retraités (22,2 % contre 26,8 %). Cependant, la dynamique de vieillissement de la population est toute aussi forte sur le territoire lyonnais que dans le reste de la France.

Le territoire de l'aire urbaine de Lyon de 1999 est défini indépendamment de toute relation institutionnelle et permet une bonne représentation du bassin de vie de l'agglomération lyonnaise. Mais dans le cadre d'une évaluation stratégique, les relations et les recoupages avec des territoires institutionnels sont nécessaires pour lier l'évaluation aux documents de planification. La Figure III-3 représente le territoire d'étude (l'aire urbaine de Lyon de 1999) ainsi que différents territoires d'application de politiques d'aménagement du territoire (SCoT), de planification de la mobilité (PDU) et de protection de l'atmosphère (PPA).

Figure III-3 : Espaces d'action de documents de planification



Source : traitement auteur

L'Inter-SCoT de l'aire métropolitaine lyonnaise regroupe 13 SCoT autour de l'aire urbaine de Lyon. Celle-ci y est géographiquement centrale et pèse fortement puisqu'elle représente autour de 56 % de la population de l'Inter-SCoT en 2010 alors qu'elle ne couvre que 27 % de la surface totale (UrbaLyon & Epure, 2014). Parmi les 13 SCoT constituant l'Inter-SCoT, seulement deux sont totalement exclus du territoire d'étude (le Roannais et la Loire Centre), et, à l'inverse, deux SCoT sont entièrement inclus (l'Agglomération Lyonnaise et l'Ouest Lyonnais). Le Plan de Protection de l'Atmosphère (PPA) de l'agglomération lyonnaise est entièrement inclus dans l'aire urbaine de Lyon, il recouvre l'ensemble du SCoT homonyme ainsi que quelques communes limitrophes (DREAL Rhône-Alpes, 2014).

La Métropole de Lyon est un territoire institutionnel, entièrement inclus dans l'aire urbaine de Lyon de 1999, sur lequel s'applique un certain nombre de documents de planification. Notamment, le Plan Climat Énergie Territorial et le Plan Oxygène, qui forment ensemble le Plan Climat Air Énergie Territorial (Métropole de Lyon, 2016). Un Plan Local d'Urbanisme est aussi présent sur ce territoire.

Le territoire d'étude de l'aire urbaine de Lyon inclut différents documents de planification de la mobilité avec cinq Plans de Déplacements Urbain (PDU). Parmi ces cinq espaces de planification de la mobilité, trois d'entre eux sont liés à une obligation de mettre en place un PDU (Le Grand-Lyon, la métropole de Saint-Étienne et celle de Vienne) (Article L. 1214-3 du code des transports). La communauté de communes de L'Isle-d'Abeau, celle de Miribel et Plateau ont mis en application des politiques de planification de la mobilité volontaire soit sous la forme d'un PDU à L'Isle-d'Abeau, soit avec un Plan Global de Déplacements (PGD). Finalement, l'aire d'étude inclut l'intégralité du PDU de Lyon et du PGD de Miribel et Plateau ainsi qu'une partie des PDU de Vienne, de Saint-Étienne et de L'Isle-d'Abeau (Figure III-3).

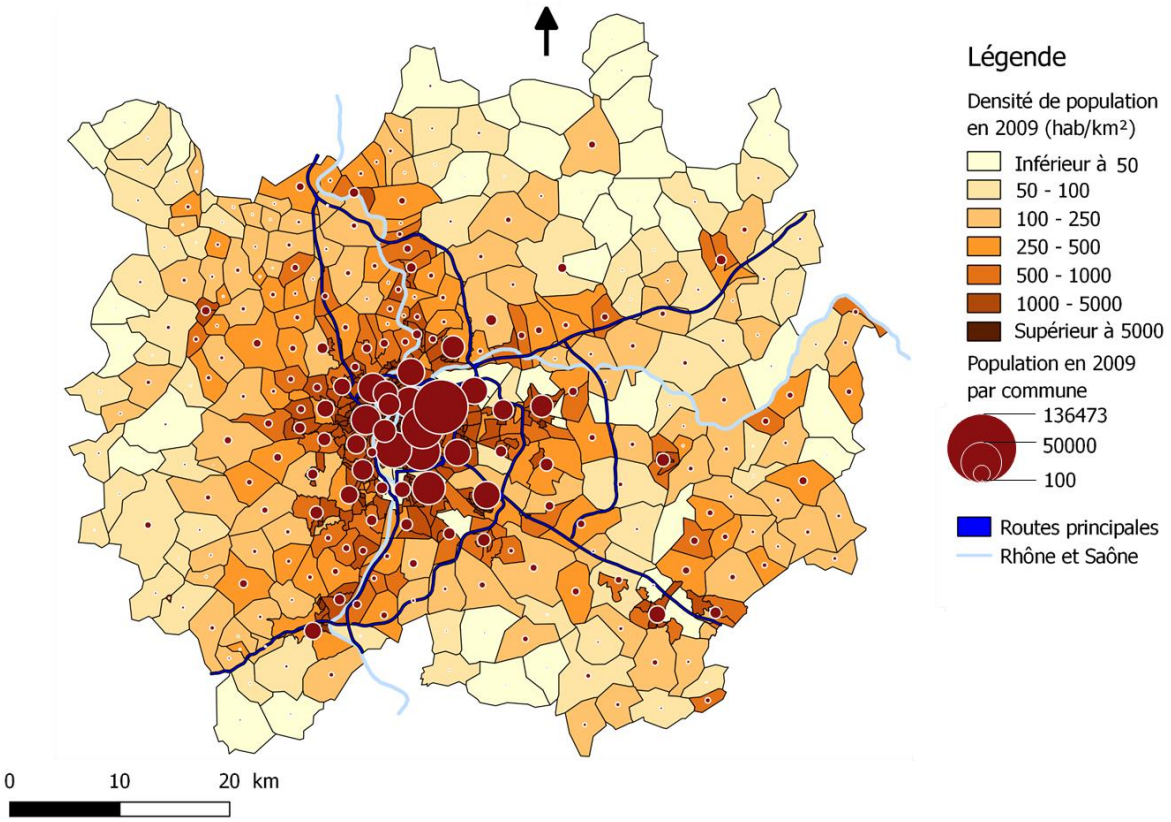
À noter aussi que le territoire de l'aire urbaine de Lyon de 1999 est inclus dans des documents de planification et de régulation plus large, comme l'échelle de la région avec la présence d'un Schéma Régional Climat Air Énergie (SRCAE), prochainement remplacé par un Schéma Régional d'Aménagement, de Développement Durable et d'Égalité des Territoires (SRADDET), ou encore la présence d'un Plan Régional Santé-Environnement (PRSE).

Ainsi, même restreinte à son périmètre de 1999, l'aire urbaine de Lyon reste un territoire d'évaluation pertinent pour évaluer les impacts environnementaux de la mobilité quotidienne de personnes tant du fait de son poids et de son dynamisme démographique que du fait de la présence de nombreux documents de planification que ce territoire englobe ou avec lesquels il interagit.

1.2.2. Une forme urbaine monocentrique

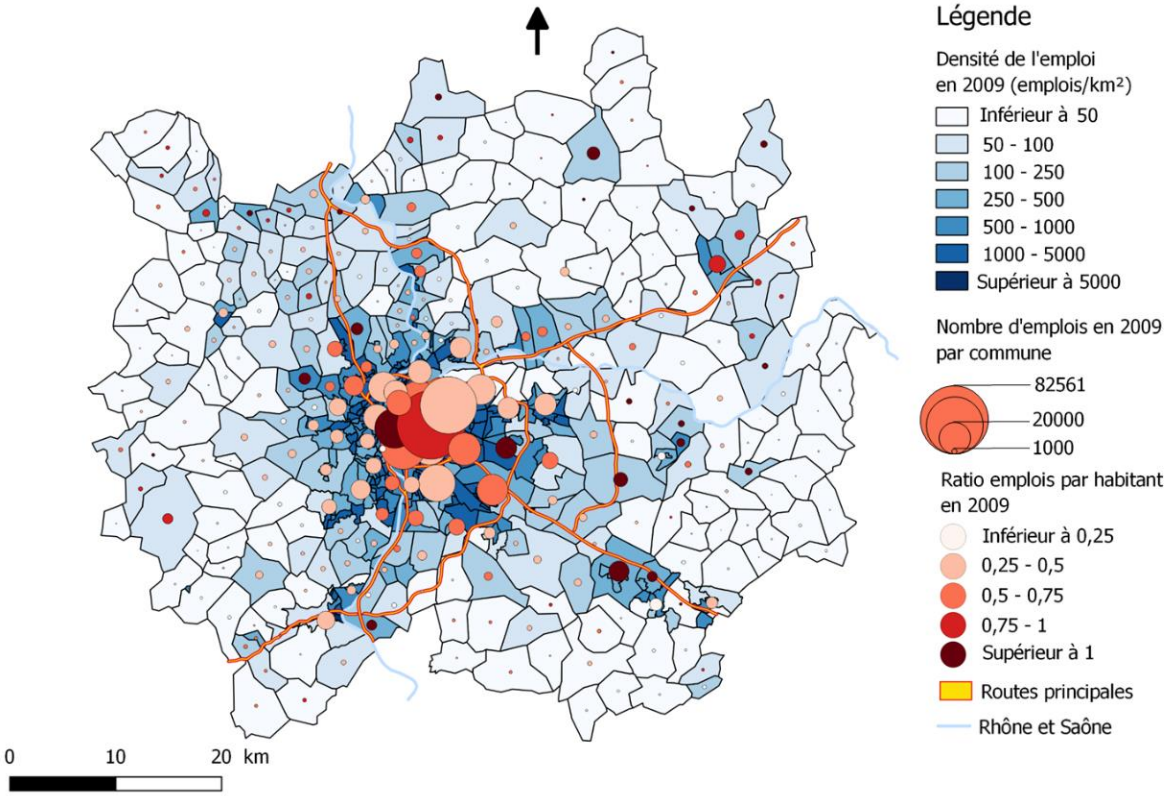
L'aire urbaine de Lyon présente une morphologie monocentrique avec son centre (Lyon-Villeurbanne) et sa Métropole qui ont un poids majeur (Tableau III-1). Malgré les épisodes de déconcentration de la population et des activités qui ont eu lieu depuis les années 70, la Figure III-4 et la Figure III-5 montrent la dominance du centre sur l'ensemble de l'aire urbaine, avec quelques pôles secondaires modestes.

Figure III-4 : Concentration de la population dans l'aire urbaine de Lyon en 2009



Source : recensement INSEE 2009, traitement auteur

Figure III-5 : Concentration de l'emploi total dans l'aire urbaine de Lyon en 2009



Source : recensement INSEE 2009, traitement auteur

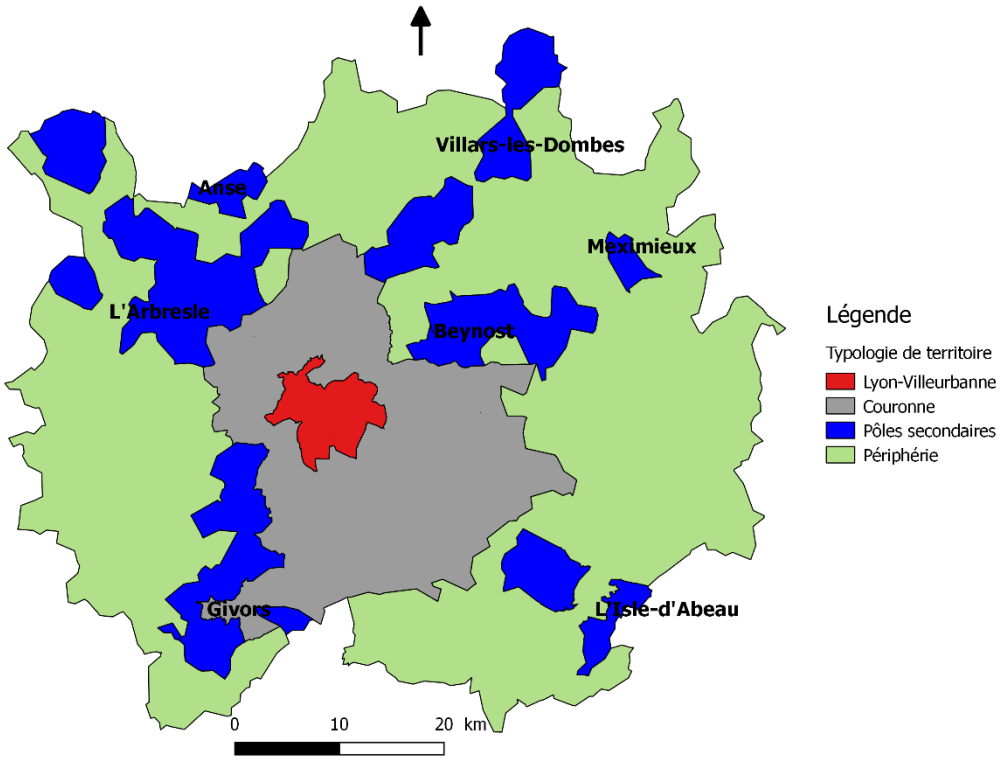
La répartition de la population dans l'aire urbaine de Lyon suit les principaux axes de transport routier. Les communes périphériques éloignées des grands axes sont peu peuplées avec des espaces naturels et agricoles importants. La répartition des activités économiques suit aussi le même schéma dans son ensemble, car on constate des divergences entre l'emploi et la population comme le révèle le ratio d'emploi sur la population (Figure III-5). Dans les communes du centre, certaines communes apparaissent très attractives avec un ratio élevé, notamment dans le 3e arrondissement de Lyon, les communes de Bron, Saint-Priest, Chassieu et Saint-Quentin-Fallavier. Lyon et Villeurbanne rassemblent 41 % des emplois en 2009 de l'aire urbaine de Lyon, le Grand-Lyon représente 74 % des emplois.

L'aire urbaine de Lyon se caractérise aussi par des différences morphologiques et sociales fortes entre l'Est et l'Ouest. La topologie du territoire est plus montagneuse à l'ouest de l'aire urbaine avec les monts du Lyonnais et du Beaujolais, alors que la partie Est est plus plate avec la plaine de l'Ain et le plateau du Bas-Dauphiné. L'Est Lyonnais possède de nombreux espaces

logistiques et usines de production industrielle contrairement à l'Ouest Lyonnais plus résidentiel et agricole (notamment viticole). La segmentation sociale entre revenus élevés à l'Ouest et revenus modestes à l'Est et en centre d'agglomération (Villeurbanne) est remarquable pour l'aire urbaine de Lyon (Aguilera & Mignot, 2007; UrbaLyon & Epure, 2014).

Cette diversité morphologique, démographique et socio-économique nous amène à proposer une typologie de territoires en quatre espaces. Le centre de l'aire urbaine est composé de Lyon et Villeurbanne. La couronne correspond au périmètre du SCoT de l'agglomération lyonnaise. Elle inclut l'ensemble du Grand-Lyon ainsi que les communautés de communes industrielles du Pays de l'Ozon et de l'Est Lyonnais. Le reste du territoire est séparé entre pôles secondaires et périphérie en fonction de leur connexion à une gare TER (Figure III-6). Cette typologie, calquée sur celle utilisée dans le modèle SIMBAD, servira à la mise en œuvre de scénarios d'occupation du sol (notamment avec une densification des pôles ferroviaires) ainsi qu'à l'analyse de certains résultats.

Figure III-6 : Découpage de l'aire urbaine en quatre types



Source : traitement auteur

1.2.3. Un réseau de transport développé et varié

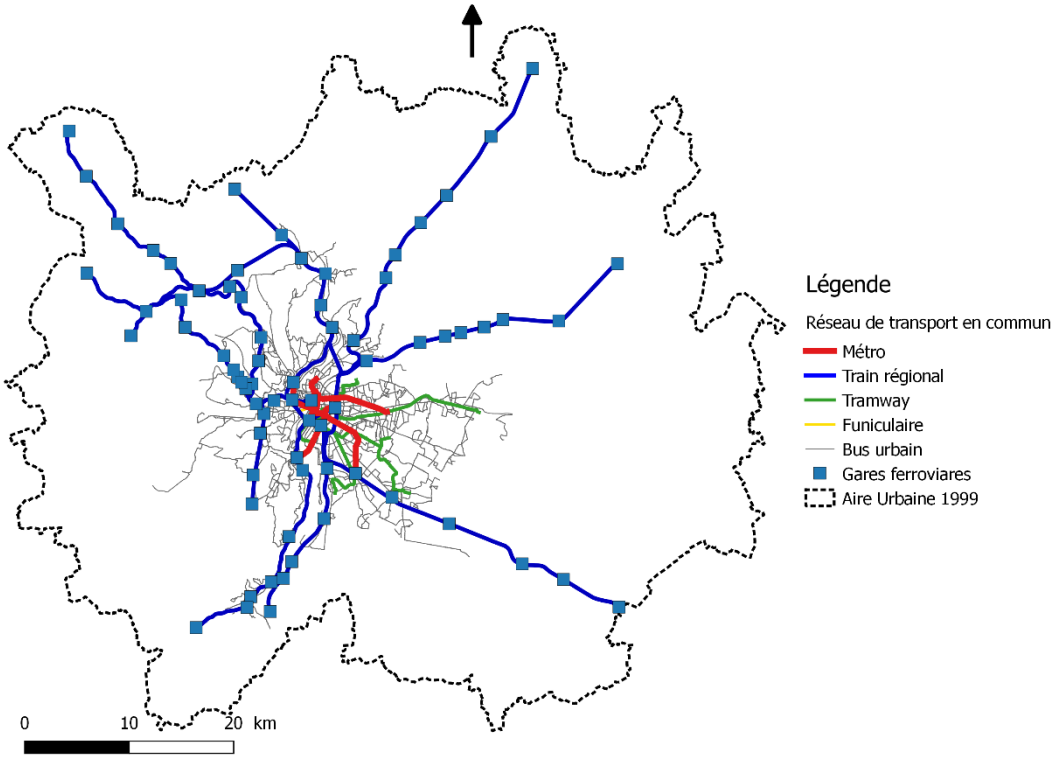
L'aire urbaine de Lyon s'est développée autour d'un réseau de transport conséquent et varié. L'offre routière est importante sur ce territoire avec environ 20 000 km de routes en linéaire et surtout la présence de grands axes routiers et autoroutiers. Le réseau routier linéaire occupe 123 km² sur l'aire urbaine de Lyon, en 2009, soit 3,7 % de la surface totale (Urban Atlas, 2012).

Le réseau de transport en commun n'est pas en reste, avec une grande diversité de lignes et de modes de transport en 2015, 4 lignes de métro, 5 de tramway et plus de 120 lignes de bus. Le réseau interurbain est également bien développé, avec 11 lignes de TER et environ 70 gares reliées au centre de l'agglomération (Figure III-7). Plusieurs lignes de cars existent aussi sur le territoire notamment sur le département du Rhône. Le SYTRAL (Syndicat Mixte des Transports pour le Rhône et l'Agglomération lyonnaise) est l'autorité organisatrice des transports (AOT) en charge de l'ensemble des réseaux de transport en commun ainsi que des cars du Rhône. Le réseau de TER est à la charge de la Région Auvergne Rhône-Alpes. D'autres autorités organisatrices des transports sont présent sur l'aire urbaine de Lyon de 1999, notamment dans l'Ain, pour communes dépendantes des communautés d'agglomération de Vienne et du Nord Isère. Il n'existe pas d'entité unique d'organisation des transports. Le Syndicat Mixte de Transports pour l'Aire Métropolitaine Lyonnaise (SMT AML) créé en 2013 par le préfet de Région se cantonne à la facilitation de l'intermodalité[19].

Sur le territoire de l'aire urbaine, les modes doux sont principalement développés dans le Grand Lyon qui a mis en place un plan modes doux 2009-2020 (Grand Lyon, 2010). Ce plan soutient la marche avec le développement de voies piétonnes et la mise en place de pédibus pour les scolaires. Le centre de Lyon est constitué d'une grande zone 30 km/h, avec plus de 200 km de voirie, localisée principalement sur la Presqu'île, favorisant la cohabitation des modes. De nombreux investissements ont été réalisés pour le développement du vélo avec 670 km de voies cyclables en 2015, et un objectif de 1 000 km en 2020 (Métropole de Lyon, 2016). La Métropole possède un service de location de vélos en libre-service, Vélo'v, en fort développement avec 348 stations et 4 000 vélos en 2015, avec pour objectifs 428 stations et 5 000 vélos en 2020 (Grand Lyon & JCDecaux, 2018).

[19] http://smtaml.fr/ (consulté le 12/07/2018)

Figure III-7 : Réseau de transport en commun de l'aire urbaine de Lyon, hors cars interurbains



Source : traitement auteur

L'aire urbaine de Lyon, et encore plus le Grand Lyon, offre une variété importante de modes de déplacements pour la mobilité quotidienne, ainsi que des tracés divers, même si les réseaux de Lyon sont principalement radiaux. Cette offre induit des niveaux d'accessibilité hétérogènes sur le territoire ainsi que des choix de mobilité multiples. Pour l'analyse environnementale, la richesse du système de transport de Lyon va nous conduire à constituer une base importante de données environnementales afin de réaliser une modélisation réaliste des processus technologiques mis en œuvre et de leurs impacts.

Partie 2 : Le modèle LUTI – SIMBAD

Le modèle SIMBAD constitue la première brique du couplage SIMBAD-ACV. Il a été développé à partir de 2005 puis régulièrement renforcé et mis à jour (Aissaoui, 2016; Cabrera, 2013; Homocianu, 2009; Nicolas *et al.*, 2009, 2013). Cette partie présente le fonctionnement du modèle et montre en quoi il répond aux exigences d'un outil d'ÉES couplé avec une méthode d'ACV.

2.1. Fonctionnement général de SIMBAD

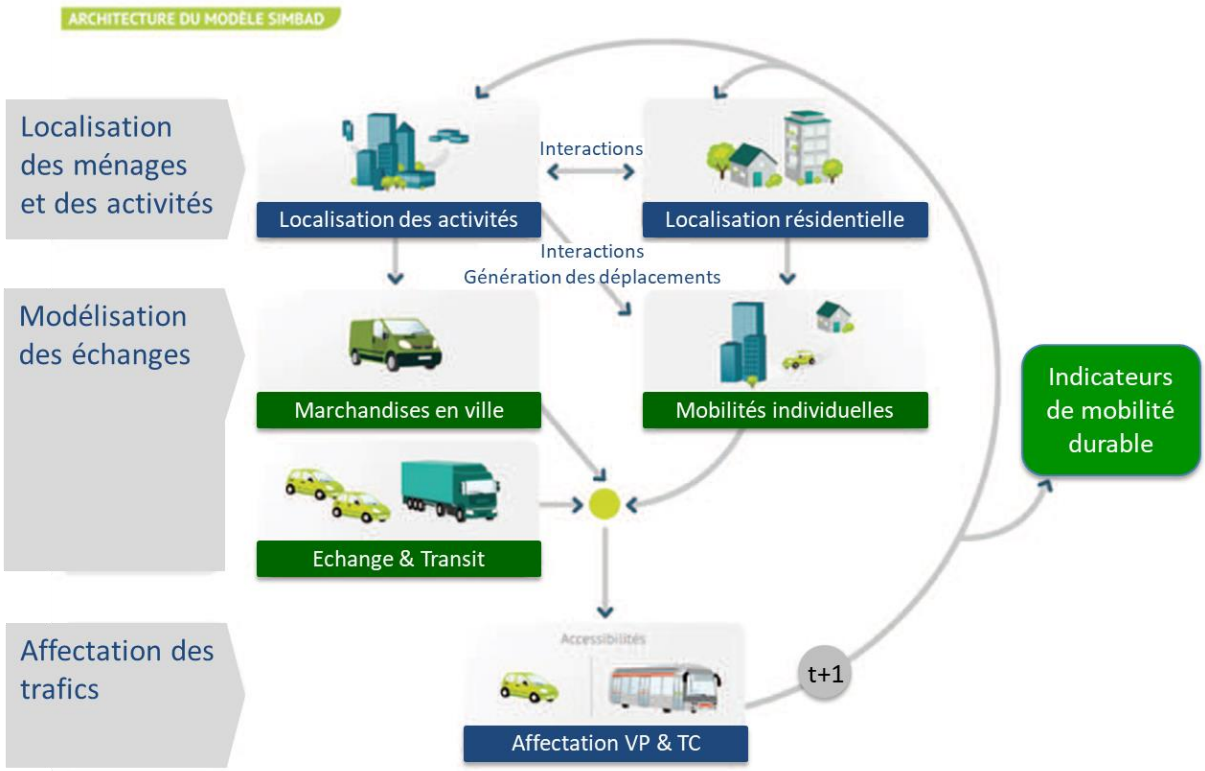
Le modèle SIMBAD a été développé au sein du Laboratoire Aménagement Économie Transport (LAET) à partir de 2005, dans le cadre d'un projet financé par le PRÉDIT 3 avec le partenariat de l'Agence d'Urbanisme de Lyon. Le modèle a été conçu sur le périmètre de l'aire urbaine de Lyon de 1999, qui était le découpage le plus adéquat au démarrage du projet pour représenter le bassin de vie de l'agglomération de Lyon. L'objectif principal de SIMBAD est de simuler différentes politiques de transport et d'urbanisme en vue de l'évaluation de leurs conséquences environnementales, économiques et sociales sur la mobilité quotidienne. En plus des coûts induits sur les trois composantes du développement durable, le modèle estime les services rendus par le système urbain modélisé sur les dimensions économique et sociale, notamment à travers la notion d'accessibilité aux différentes fonctions urbaines.

Élaboré avec un horizon de 25 ans, le modèle prospectif SIMBAD propose une approche stratégique à moyen et long termes pour des politiques contrastées influençant la mobilité quotidienne. Les choix de ces échelles spatiale et temporelle ont été faits pour contribuer aux réflexions de conception du système urbain en apportant de nouveaux éléments aux divers débats qui animent l'aménagement urbain (forme urbaine, zone apaisée…). Ils sont par contre moins adaptés pour l'évaluation de projets spécifiques à l'échelle locale. De plus, l'approche systémique d'un tel modèle fournit une meilleure compréhension des dynamiques et des relations qui s'opèrent entre les différentes composantes de la mobilité urbaine. Les dynamiques urbaines représentées dans le modèle prennent en considération les différents rythmes urbains de l'instantané (trafic) au temps long (changement d'usage du sol ou modification des réseaux structurants) (Wegener & Fürst, 2004).

Le modèle SIMBAD se présente comme une plateforme de modélisation qui rassemble différents modules, déjà existants par ailleurs ou développés au sein du LAET, qui sont connectés les uns aux autres. Le cœur du modèle étant centré sur la modélisation de la mobilité urbaine et des interactions entre transport et urbanisme, les principaux modules de SIMBAD se focalisent sur ces aspects. Les évolutions économiques et démographiques globales sont considérées comme des variables exogènes alimentées par des hypothèses externes (par exemple, le modèle Omphale de l'INSEE pour les évolutions de la population). Les différents modules importés ou développés dans SIMBAD sont adaptés pour l'aire urbaine de Lyon de 1999 et ensuite calés sur les différentes données disponibles sur ce territoire : recensements de population et d'activités, enquêtes de déplacements (notamment les EMD 1995 et 2006) (Cabrera, 2013 ; Homocianu, 2009 ; Nicolas *et al.*, 2009).

La structure générale de SIMBAD, présentée en Figure III-8, se représente sous la forme d'une boucle itérative, à l'instar de la boucle de rétroaction de Wegener et Fuerst (2004), avec trois phases distinctes : (1) la localisation des ménages et des activités ; (2) la modélisation des échanges et (3) l'affectation des trafics. Les résultats de cette dernière étape permettent à la fois de construire les différents indicateurs de développement durable associés à la mobilité urbaine, ainsi que d'alimenter les modules de localisation et de modélisation des échanges avec des données de trafic et d'accessibilité. Pour un usage prospectif, chaque itération représente un pas d'une année pour atteindre l'horizon 2030 (Nicolas *et al.*, 2009, 2013).

Figure III-8 : Schéma de fonctionnement du modèle SIMBAD



Source : Nicolas et al., 2013

2.1.1. Localisation des ménages et des activités

Pour la modélisation urbaine de SIMBAD, le choix du modèle de localisation est important. Il doit prendre en considération les différents sous-systèmes en interaction et leur temporalité tout en intégrant à chaque itération les éléments du système de transport qui influencent les choix de localisation des agents. Une approche désagrégée avec plusieurs types d'acteurs a été choisie afin de rendre compte des conséquences sociales de politiques simulées. Au vu des différents objectifs de SIMBAD, la plateforme de modélisation URBANSIM a été retenue pour localiser les différents agents sur le territoire (Deymier & Nicolas, 2005). L'approche quasi-dynamique de ce modèle permet d'intégrer les différentes temporalités des systèmes de transport et de l'usage du sol sans condition d'équilibre économique à chaque itération. L'hétérogénéité des acteurs et des comportements est prise en compte à travers la théorie d'utilité aléatoire et la modélisation de choix discrets largement mobilisée dans

URBANSIM (Waddell, 2002) permettant des descriptions du territoire à l'échelle des 777 IRIS[20] qui constituent l'aire urbaine de Lyon.

Le modèle URBANSIM est constitué de six modules nécessaires pour localiser les acteurs sur le territoire : un modèle d'accessibilité, un modèle de transition démographique et économique, un modèle de relocalisation résidentielle et économique, un modèle de localisation des ménages et des activités économiques, un modèle de développement immobilier et un modèle de prix de l'immobilier. Cette modularité est un avantage pour le modèle SIMBAD, car il est possible d'adapter le modèle de localisation aux besoins de simulation. Par exemple, les modèles d'accessibilité et de calcul de prix de l'immobilier ont pu être développés sur Lyon au niveau de chaque IRIS ; le modèle de transitions démographique et économique est quant à lui externalisé et les tables d'évolution des types de ménages et d'activités ont été dérivées de modèles prédictifs comme OMPHALE réalisé par l'INSEE pour l'évolution de la population[21]. Le modèle de développement immobilier est lui aussi externalisé, mais il constitue pour SIMBAD une entrée majeure pour les simulations et la création de scénarios de forme urbaine. En fonction du scénario de forme urbaine souhaité, l'utilisateur du modèle introduit une table de développement immobilier personnalisée.

Le modèle de relocalisation résidentielle et économique correspond à un modèle logit binomial qui estime la probabilité d'un agent déménage l'année en cours. Pour la mobilité résidentielle, la probabilité de déménager a été estimée pour différents types de ménages en fonction de l'âge du chef de ménage, du type de possession du logement (locataire ou propriétaire) et de la taille du ménage. La table de probabilités a été réalisée à partir de l'enquête Logement de 2002, avec un maximum de 48,3 % de chance de déménager pour un couple de moins de 25 ans, locataire, le minimum est de 0 % pour un ménage de 5 personnes, propriétaire dont le chef de famille à plus de 75 ans. En moyenne, le modèle de mobilité résidentielle fait déménager 13 % des ménages de l'aire urbaine par an ce qui correspond à la probabilité observée (Nicolas *et al.*, 2013). Le modèle est similaire pour les entreprises en les distinguant selon le type d'activité et la taille de l'établissement. Les probabilités de déménagement oscillent entre 0 % pour les très gros établissements (secteurs automobiles et énergie

[20] Îlots Regroupés pour l'Information Statistique, IRIS, maille de base de la diffusion de statistiques infracommunales, constitue une partition du territoire de ces communes en « quartiers » dont la population est de l'ordre de 2 000 habitants. La France compte environ 15 500 IRIS. (https://www.insee.fr/fr/metadonnees/definition/c1523, consulté le 23 juillet 2018)

[21] https://www.insee.fr/fr/metadonnees/definition/c1363, consulté le 23 juillet 2018

notamment) à 8,02 % pour les établissements de services aux entreprises ne comptant aucun employé.

La modélisation de choix de localisation des ménages et des établissements repose sur des modèles Logit multinomiaux qui dépendent à la fois des caractéristiques de l'agent à localiser ainsi que des caractéristiques des 777 IRIS susceptibles d'accueillir cet agent. Le modèle calcule la probabilité de choix pour chaque agent et pour chaque alternative. L'agent va être localisé en fonction de cette probabilité et de la disponibilité d'accueil de l'IRIS. Pour la localisation des ménages, les variables utilisées dans le modèle de choix de localisation se reposent sur le Recensement Général de la Population de 1999 (RGP 1999). Cinq variables sont conservées pour le choix de localisation : le niveau de revenu du ménage, la part de ménages de même taille dans l'IRIS, la part de ménages de même âge dans l'IRIS, le pourcentage de logement HLM dans l'IRIS et le niveau d'accessibilité à l'emploi, aux établissements secondaires et d'étude supérieure. Les variables de taille et d'âge reflètent la recherche de l'entre-soi. Puisque le comportement des ménages varie en fonction de leur revenu, des modèles différents sont estimés pour chaque classe de revenu avec la logique de parts de marché différentes, afin de tenir compte de cette variabilité (Homocianu, 2009). Les ménages sont classés en trois catégories : la première regroupe les 20 % des ménages les plus pauvres, la deuxième regroupe les 60 % médians et la dernière les 20 % les plus riches, établies à partir du revenu par unité de consommation.

Pour la localisation des activités économiques, dans la même logique de parts de marché, 19 modèles ont été retenus afin de tenir compte des comportements de choix en fonction de leurs types d'activités économiques et de leurs tailles. Pour les établissements de moins de 50 employés, 17 modèles permettent de différencier leurs types d'activités. Les deux autres modèles décrivent les choix de localisation pour les établissements avec un effectif entre 50 et 250 salariés et les établissements avec plus de 250 salariés. Six variables ont été retenues pour constituer les modèles : le niveau d'accessibilité à différentes catégories d'emploi, à l'emploi total et à la population, la densité de population, la proximité avec des emplois de service et industriels, le temps de trajet en voiture jusqu'au centre de l'agglomération, le prix de l'immobilier et la surface disponible (Nicolas *et al.*, 2009, 2013). De la même façon que pour la localisation des ménages, les établissements s'implantent dans un IRIS en fonction de la probabilité estimée par le modèle ainsi que de la disponibilité de la zone.

Comme témoigne la présentation précédente, une des variables clés des modèles de choix de localisation des ménages et des entreprises est l'accessibilité. La principale mesure utilisée

est l'accessibilité gravitaire qui représente la somme des opportunités pondérées par le temps de parcours aux opportunités, elle se calcul avec cette formule :

$$AccGrav_i = \sum_{j=1}^{777} \frac{Op_j}{tps_{ij}}$$

Avec $AccGrav_i$ = l'accessibilité gravitaire de l'IRIS i pour un type d'opportunité

Op_j = le nombre d'opportunités de l'IRIS j (par exemple le nombre d'emplois ou le nombre d'habitants)

tps_{ij} = le temps de trajet entre les IRIS i et j

Quelques accessibilités isochroniques (donnant un nombre d'opportunités accessibles pour un temps de parcours donné à partir d'un IRIS) sont également utilisées pour mesurer l'accessibilité aux réseaux de transports (nombre d'accès autoroutier et nombre de gares accessibles notamment). L'ensemble des accessibilités utilisées pour la localisation des agents sont calculées à partir des données de localisation des opportunités, obtenues à l'itération précédente, et des résultats du modèle transport. La connexion entre le modèle transport et le modèle d'usage du sol passe par ces différentes variables d'accessibilité.

2.1.2. Modélisation transport : le modèle à 4 étapes

À partir des localisations des ménages et des activités modélisées par les modules d'URBANSIM, le modèle transport va représenter les échanges qui vont se réaliser entre les acteurs avant de les affecter sur les réseaux de transport. Dans le modèle SIMBAD, le modèle transport repose sur la modélisation à quatre étapes, avec : la génération ; la distribution ; le choix modal et l'affectation. Les trois premières étapes ont été conçues directement par les équipes du LAET, la partie affectation des trafics étant réalisée par le biais d'un logiciel externe, VISUM. La modélisation des échanges a été subdivisée en trois parties représentant la mobilité de marchandises, la mobilité des résidents de l'aire urbaine de Lyon et les flux de transit et d'échanges qui rentrent ou traversent le périmètre d'étude. Chacune de ces parties fait l'objet d'une approche spécifique dans le modèle SIMBAD, seule l'affectation des trafics est commune à ces parties.

Pour les flux de transit et d'échanges, 10 macros zones externes ont été créées à partir de l'enquête cordons de 2005 et permettent de décrire les flux entrants et sortants de l'aire urbaine

de Lyon de 1999. Ces flux sont orientés vers les différentes communes de l'aire urbaine de Lyon au prorata du nombre d'habitants et d'emplois présents dans chaque commune et sont réalisés en véhicules personnels ou en poids lourds pour le transport de marchandises. Des taux de croissance annuels sont appliqués aux flux de transits et d'échanges (2 % par an pour les véhicules personnels et 1,3 % pour les poids lourds) (Nicolas *et al.*, 2009).

La mobilité des marchandises est simulée à l'aide du modèle FRETURB développé dans le cadre de l'axe « marchandises en ville » du LAET (Toilier *et al.*, 2005). Réalisé à partir de plusieurs enquêtes de mobilité de marchandises en agglomération, FRETURB permet de simuler les mouvements des véhicules de livraisons à partir de la localisation des activités et de la population sur le territoire ainsi que des distances qui séparent chacune des zones. La procédure de génération et de distribution des déplacements de véhicules de livraisons et d'enlèvements est lourde du fait du nombre de mouvements générés par l'ensemble des établissements, des boucles de livraisons réalisées et du nombre de zones de SIMBAD. Afin d'alléger cette étape, le modèle FRETURB est appliqué pour 34 macro-zones ensuite réparties en 777 IRIS ; de plus, FRETURB n'est pas appelé à chaque itération de SIMBAD, mais uniquement tous les cinq ans. Finalement, les flux de véhicules de marchandises sont pondérés par un coefficient pour correspondre à un équivalent véhicule personnel afin d'être affecté ultérieurement sur le même réseau que les voitures (1,5 pour les moins de 3,5 tonnes, 2 pour les porteurs et 2,5 pour les articulés) (Nicolas *et al.*, 2009).

Avant l'étape d'affectation du modèle transport, la modélisation de la mobilité des résidents de l'aire urbaine de Lyon réalise quatre étapes : (1) la génération ; (2) la distribution ; (3) le choix modal et (4) la répartition par véhicule et par heure.

Génération des sorties de ménages :

Pour la génération des déplacements, le modèle SIMBAD propose deux développements originaux par rapport à la démarche classique utilisée pour cette étape. La première différence réside dans le choix méthodologique d'avoir recours à la microsimulation pour estimer les pratiques de mobilité. Contrairement aux approches traditionnelles qui lient le nombre de déplacements réalisés à différentes variables socio-économiques de chaque zone par des régressions linéaires établies à partir d'une enquête de déplacements, l'approche par microsimulation permet de rapprocher la population simulée et celle de l'enquête sur un

ensemble de variables socio-économiques et de localisation afin d'attribuer le comportement d'un ménage enquêté à un ménage simulé. Cette approche permet de prendre en compte finement les caractéristiques socio-économiques des ménages et ainsi de capter les évolutions socio-démographiques telles que le vieillissement de la population ou encore la réduction de la taille des ménages. En revanche, l'échantillon de l'enquête est considéré comme constant dans le temps ce qui signifie que pour un type de ménages donné leur comportement de mobilité est constant (Nicolas *et al.*, 2009).

La deuxième particularité de SIMBAD consiste à travailler avec des sorties de ménages plutôt qu'avec des déplacements. Une sortie de ménage représente l'enchaînement d'activités et de déplacements entre le départ du domicile et le retour à la maison. Ainsi une sortie de ménage peut être constituée de plusieurs déplacements avec des motifs différents. Par exemple, l'enchaînement domicile-achat-travail-loisirs-domicile représente quatre déplacements, mais une seule sortie de domicile. L'intérêt de l'approche par déplacements réside dans la description complète de la chaine de déplacement, mais pour les étapes suivantes chaque déplacement va être traité indépendamment sans cohérence des choix modaux et ainsi perdre la notion de motif principal (Nicolas *et al.*, 2009). Avec les sorties de ménages la cohérence des modes est assurée et le motif principal est décrit en respectant la hiérarchie : travail >> école >> collège, lycée >> université >> achats/services >> autres (accompagnement, loisirs…) (Nicolas *et al.*, 2013).

L'analyse de l'EMD 2006 de Lyon permet de créer 308 types de ménages qui présentent des niveaux de mobilité différents et des effectifs suffisamment importants dans l'EMD pour réaliser un tirage aléatoire. Ces 308 types se caractérisent par 6 paramètres : la localisation du ménage (en 4 groupes d'IRIS), la taille du ménage, le nombre d'actifs dans le ménage, l'âge du chef de ménage, le taux de motorisation et le niveau de revenu. Finalement, l'approche par microsimulation permet de conserver la diversité des comportements, et ce même au sein des 308 types, tout en conservant aussi l'ensemble de caractéristiques socio-économiques des ménages (Nicolas *et al.*, 2013).

Distribution :

Pour la deuxième étape de la modélisation en quatre étapes, l'objectif est de relier les émissions et les attractions des 777 IRIS du territoire. Dans le cas de SIMBAD, les émissions correspondent aux sorties des ménages et les attractions sont les lieux de réalisation des activités

liées à la sortie. L'analyse de l'EMD 2006 montre que les distances supplémentaires dues aux activités secondaires d'une sortie sont faibles par rapport à la distance entre le domicile et le lieu de l'activité principal de la sortie (Cabrera, 2013). Ainsi il est acceptable d'agréger l'ensemble des sorties à leur motif principal et de supprimer les motifs secondaires, facilitant ainsi le reste de la modélisation puisqu'il ne restera que des aller-retour partant du domicile. Chaque sortie est donc caractérisée par le lieu du domicile du ménage émetteur et le lieu de l'activité principale de la sortie.

Pour la distribution, SIMBAD repose sur trois modèles gravitaires correspondant aux trois classes de revenus de ménages. Dans le modèle, la forme du modèle gravitaire est :

$$T_{ij} = v \,.\, e_i \,.\, a_j \,.\, e^{(-\beta \,.\, tg_{ij})}$$

Où :

T_{ij} = le nombre de sorties qui partent de l'IRIS i pour aller vers l'IRIS j

e_i = le nombre de sorties émises par la zone i

a_j = le nombre de sorties attirées par la zone j

tg_{ij} = le temps généralisé entre les deux zones i et j

v = un coefficient de proportionnalité afin d'obtenir le bon nombre de sorties

et β = le paramètre d'impédance, fonction du motif principal de la sortie et du revenu du ménage (par exemple, le temps entre deux zones est plus pénalisant pour une sortie liée à l'enseignement primaire que pour le travail).

Pour le calcul du temps généralisé unique utilisé dans la distribution des déplacements, le choix méthodologique réalisé dans le modèle consiste à préserver le temps généralisé du mode le plus rapide pour relier les deux zones. Le temps généralisé de chaque mode de transport correspond au temps de parcours auquel s'ajoute l'ensemble des pénalités. Par exemple, pour le véhicule personnel la présence d'un péage ou pour le transport collectif les temps d'attentes et de transfert. Les temps généralisés des véhicules personnels et du transport en commun sont obtenus après l'affectation sur les réseaux de transport. Le temps généralisé pour les modes actifs correspond au temps de parcours de la distance à vol d'oiseau à une vitesse de 3 km/h correspondant à la marche à pied avec une pénalité pour illustrer des déplacements non rectilignes (Cabrera, 2013 ; Nicolas *et al.*, 2009).

Choix modal :

Troisième étape du modèle à quatre étapes, le calcul du choix modal du modèle SIMBAD assigne un mode de déplacement parmi les trois modes principaux modélisés, le véhicule personnel (VP), le transport en commun (TC) et les modes doux (MD) comprenant notamment la marche à pied et le vélo. La répartition des sorties entre ces modes est réalisée au moyen de deux modèles de choix imbriqués, le premier permettant de différencier les modes motorisés (VP et TC) des modes doux pour ensuite choisir parmi les modes motorisés entre VP et TC.

Le premier modèle de choix repose sur des proportions fixes de part modale des modes doux en fonction de la distance à vol d'oiseau, du motif de déplacement et du niveau de densité des IRIS de domicile et d'activité. Les IRIS sont catégorisés entre urbain et non-urbain à partir de leur niveau de densité d'emplois et de population cumulée (seuil de densité de 7 500 emplois et habitants par km²).

Le deuxième modèle de choix est un modèle logit binomial qui répartit les sorties en modes motorisés entre VP et TC en fonction du niveau de revenu du ménage et du motif de déplacement. Les parts modales des déplacements liés à l'enseignement primaire ou secondaire sont constantes pour le TC par rapport aux modes motorisés avec 8 % pour l'enseignement primaire et 70 % pour le secondaire. Pour les quatre autres motifs de déplacement, quatre variables significatives permettent de construire le modèle de choix : le temps généralisé en VP, le temps généralisé en TC, le taux de motorisation de la zone de domicile et la densité de la zone de destination. La dernière variable de densité traduit la difficulté et le prix du stationnement dans les zones denses (Cabrera, 2013 ; Nicolas *et al.*, 2009). Le modèle de choix entre VP et TC se formule :

$$(PM_{TC})_{ij} = \frac{1}{1+\exp(k + \tau_{TC} \,.\, tgTC_{ij} \,.\, \xi_i + \frac{\tau_{VP} \,.\, tgVP_{ij}}{\xi_i} + \delta \,.\, d_j)}$$

Avec :

$(PM_{TC})_{ij}$ = la part modale du TC au sein des modes motorisés entre les zones i et j

$tgTC_{ij}$ et $tgVP_{ij}$ = les temps généralisés entre les zones i et j en TC et en VP

ξ_i = le taux de motorisation de la zone d'origine i

d_j = la densité de la zone destination j

k, τ_{TC}, τ_{VP} et δ = les coefficients dépendants du niveau de revenu et du motif de déplacement

Le taux de motorisation de chaque zone dépend du taux de motorisation est assigné à chaque ménage lors de sa localisation. Ce taux est calculé à partir d'une matrice de probabilité croisant quatre variables, construite à partir de l'EMD de Lyon 2015. Les quatre variables retenues sont la taille du ménage, son nombre d'actifs, sa catégorie de revenu (cf. $2.1.1) et la catégorie de densité de l'IRIS de localisation (6 catégories avec pour seuils : 250, 500, 1 000, 5 000 et 10 000 hab/km²) et elles permettent d'estimer entre 0 et 2 le nombre de véhicules à disposition du ménage.

Les zones non desservies par un service de transport en commun se caractérisent par des temps généralisés en TC infinis aboutissant à une part modale nulle.

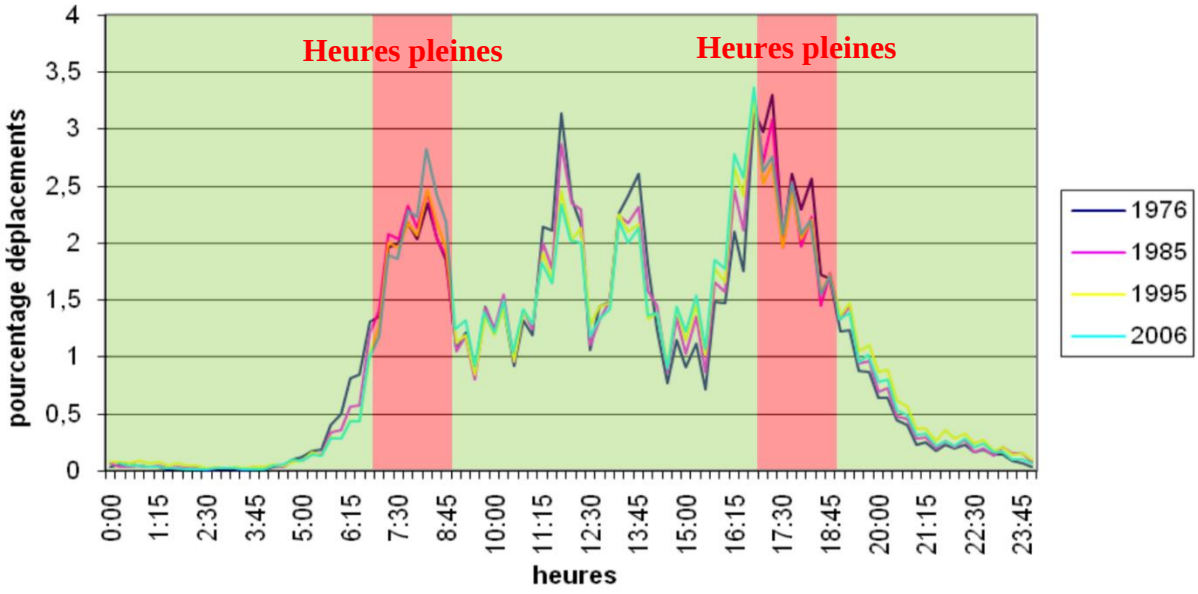
Répartition par véhicule et par heure :

Avant de pouvoir être affectées sur les réseaux de transports, les différentes sorties générées, distribuées et réparties par mode doivent encore être traitées par deux modèles nécessaires pour aboutir à des flux de véhicules par heures de la journée. Le premier modèle détermine le nombre d'occupants par véhicule afin de connaitre le nombre de véhicules personnels en circulation. Le deuxième répartit les flux de véhicules et de passagers des transports en commun en fonction des heures de la journée.

Les taux de remplissage des véhicules personnels sont considérés comme fixes dans le temps pour le modèle SIMBAD. Les taux de remplissages varient en fonction du motif de déplacement ainsi que de la localisation de l'IRIS d'origine répartie en 9 classes dépendant de la distance au centre et de leurs localisations Est/Ouest.

Pour le modèle SIMBAD, la répartition horaire est estimée à partir des analyses chronologiques des EMD de Lyon de 1976, 1985, 1995 et de 2006 (Figure III-9) notamment pour quatre heures pleines (7 h-9 h et 17 h-19 h). Ces observations réalisées pour chacun des six motifs de déplacements ont permis de poursuivre les tendances sur plusieurs années des évolutions des répartitions horaires pour tous les motifs. Les hypothèses retenues conduisent ici à une augmentation des trajets liés au travail pendant les heures pleines ainsi qu'une baisse de ceux liés aux achats. Lors de cette étape, les sorties générées par les modèles précédents sont dans un premier temps diagonalisées afin de décrire les aller-retours qui ont lieu entre les différentes zones. Elles sont ensuite réparties entre heures pleines et heures creuses en fonction de leur motif et de l'année de simulation (Nicolas *et al.*, 2009).

Figure III-9 : Répartition des déplacements au cours de la journée dans les enquêtes ménages lyonnaises

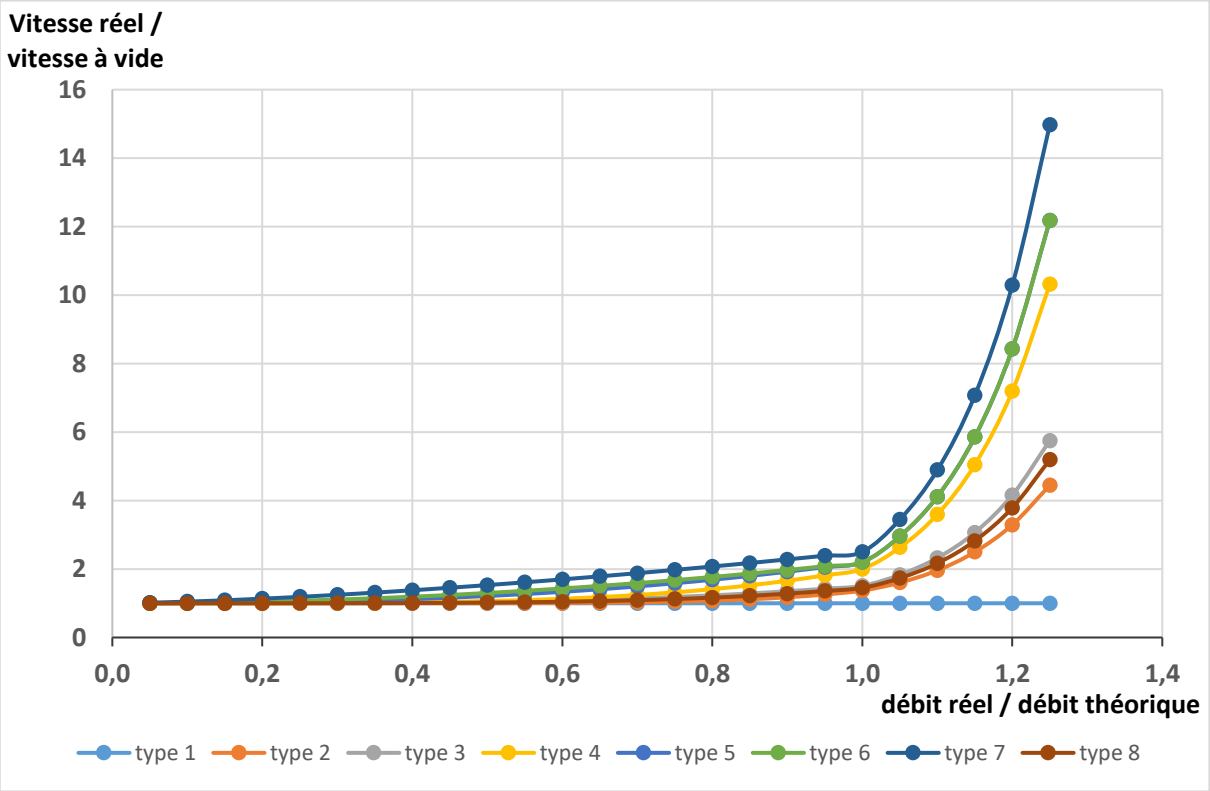


Source : Nicolas et al., 2009

Affectations des trafics :

La dernière étape du modèle de transport consiste à affecter l'ensemble de flux de déplacement sur les réseaux de transport pour une heure pleine et pour une heure creuse. Pour cela, SIMBAD utilise un logiciel de création de réseaux, de transport et d'affectation de trafic, VISUM, développé par PTV Group. Une étape importante dans le projet de SIMBAD a été de représenter les réseaux de transport de l'aire urbaine de Lyon. Pour le réseau routier, les bases Navteq et Géoroute ont été utilisées pour tracer les tronçons routiers, hiérarchiser les tronçons et les caractériser par leurs capacités et leurs vitesses. Les carrefours ont aussi été caractérisés par leurs natures. Le niveau hiérarchique des tronçons permet d'affecter une courbe débit-vitesse à chaque tronçon qui correspond à la variation de la vitesse de circulation en fonction de la charge de véhicule présent par rapport à sa capacité théorique(Figure III-10). Les bases utilisées pour le réseau de voirie datent de 2006, mais dans le cadre d'un modèle prospectif, l'ensemble des modifications et des constructions envisagées à un horizon de 25 ans ont été implémentées dans le réseau. La description du réseau de voirie comprend environ 100 000 tronçons (Nicolas *et al.*, 2009).

Figure III-10 : Courbes débit-vitesse appliquées dans SIMBAD en fonction du type de tronçons



Source : données SIMBAD, traitement auteur

Le réseau de transport en commun est construit avec le même logiciel. Cinq modes de transport en commun présents sur l'aire urbaine de Lyon (bus, métro, tram, train et funiculaire) sont représentés. Par contre, le réseau de cars interurbains n'est pas modélisé. La version du réseau de transport en commun urbain utilisée a été construite sur la base des horaires théoriques du réseau de transport de TCL de l'année 2015. Le réseau de TER est modélisé avec 11 lignes de train. L'ensemble de modes de transport en commun sont connectés les uns aux autres afin de permettre les transferts aux différents points d'arrêts. Contrairement au réseau de voirie qui est affecté par la charge de véhicules, le réseau de transport ne subit pas de dégradation d'offre en fonction de la charge de passagers. Par ailleurs, la congestion en heure de pointe est prise en compte indirectement à travers les fiches horaires fournies par le réseau de transport en commun ; par contre, cette offre est statique, et le modèle ne prend pas en compte d'éventuellement modification des vitesses commerciales.

L'ensemble des 777 IRIS et des 10 zones externes sont représentés dans le modèle VISUM par leurs centroïdes connectés aux réseaux routiers et de transport en commun par des

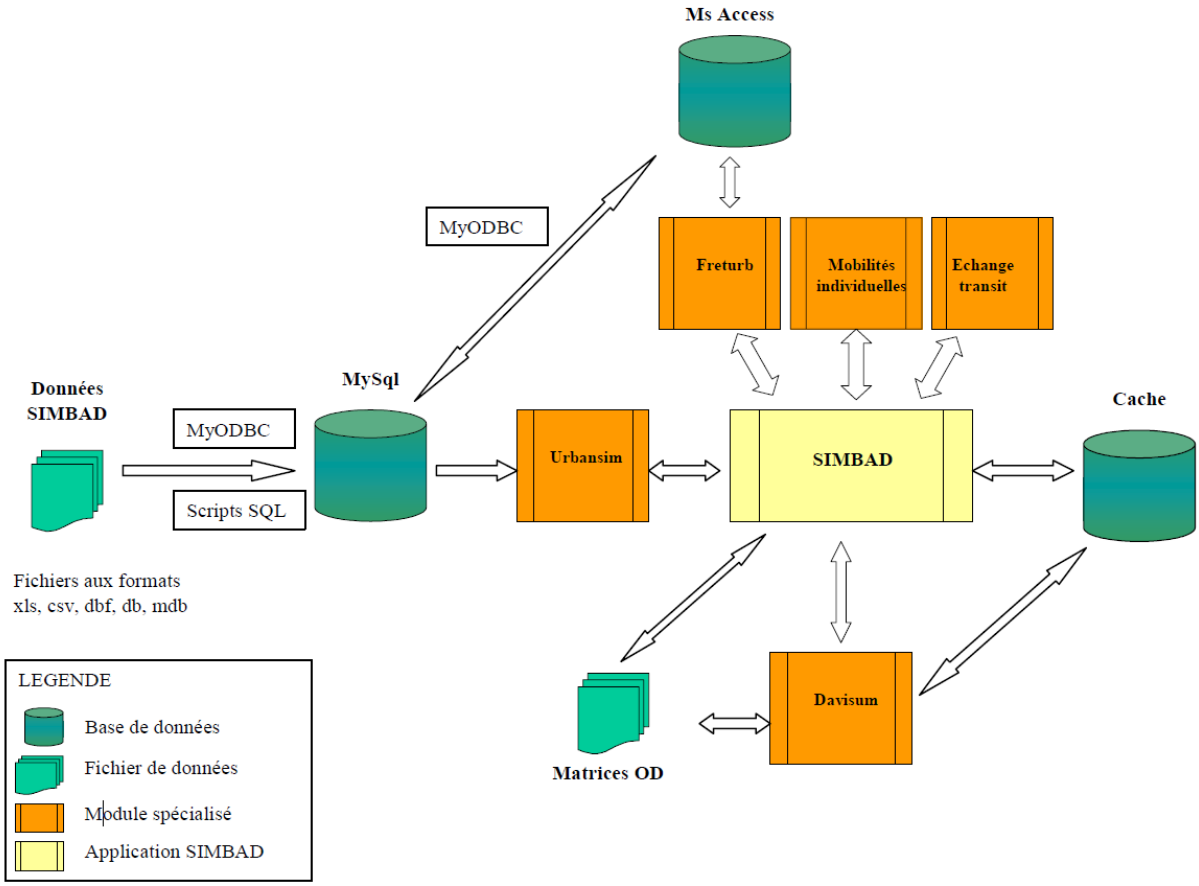
connecteurs. Les flux générés entre deux IRIS passent dans un premier temps par un connecteur avant d'emprunter les différents tronçons qui joignent les deux IRIS.

Lors d'une itération, deux affectations sont réalisées pour l'heure pleine et l'heure creuse. Les matrices origines-destinations générées lors des étapes précédentes sont importées dans le modèle VISUM pour être affectées sur les réseaux de transport. Les flux de véhicules personnels et de véhicules de marchandises sont affectés sur le même réseau routier. La procédure d'affectation va répartir ces flux sur les différents chemins possibles entre chaque IRIS en égalisant les temps de trajet et prenant en compte l'émergence de congestions sur certains axes. À la fin de cette procédure, le logiciel exporte les différents temps de parcours notamment le temps généralisé pour les VP et le TC. Ces données vont servir, lors de l'itération suivante, à créer les indicateurs d'accessibilité des différentes zones ainsi que pour les modèles de distribution et de choix modal.

Les résultats du modèle d'affectation ainsi que les différentes bases de données manipulées tout au long de la modélisation permettent de construire les différents indicateurs de mobilité durable avec ses coûts environnementaux, économiques et sociaux induits ainsi que ses services économiques et sociaux produits.

Tout au long de la mise en œuvre du modèle SIMBAD, de nombreuses bases de données, modèles, formules, logiciels sont sollicités. La Figure III-11 présente l'articulation des logiciels au sein de la plateforme de modélisation. Pour la réalisation de l'Analyse en Cycle de Vie, les données nécessaires proviennent majoritairement des sorties du modèle d'affectation qui définit l'usage des véhicules. Lors des étapes précédentes, la mobilité se matérialise par des flux et des sorties qui ne permettent pas vraiment la réalisation d'une ACV. Cependant, la majorité des modules présentés dans la plateforme SIMBAD permettent la réalisation de divers scénarios de mobilité, qu'ils s'agissent de scénarios de forme urbaine, d'évolutions économique ou démographique, de changement de comportements ou encore de réseaux de transport.

Figure III-11 : Articulation des modules et logiciels de la plateforme SIMBAD



Source : Nicolas et al., 2009

2.2. Un modèle désagrégé

Le modèle SIMBAD est conçu pour évaluer la durabilité de la mobilité quotidienne de l'aire urbaine de Lyon, notamment en reliant le niveau de mobilité aux différentes catégories de ménages pour appréhender les aspects sociaux du développement durable. En parallèle de cette description fine des agents présents sur le territoire, le modèle repose sur une description fine des mobilités notamment lors de l'affectation dans le but de construire les différents indicateurs de mobilité tels que les temps de déplacement ou le niveau d'émissions de polluants (Nicolas *et al.*, 2009).

2.2.1. Objets manipulés par le modèle

Au cours du déroulement de la procédure de modélisation, quatre objets majeurs sont mobilisés pour décrire la mobilité quotidienne et le fonctionnement du système urbain : les ménages, les établissements économiques, les zones géographiques (les IRIS) et les sorties.

Ménages :

Les ménages sont centraux dans la modélisation SIMBAD et constituent dans plusieurs modules l'objet de base permettant par exemple de déterminer les nouvelles localisations ou les nouvelles demandes de déplacements. Contrairement aux enquêtes ménages déplacements (EMD), le modèle SIMBAD ne décrit pas les individus au sein de chaque ménage. Certains modèles LUTI désagrègent les ménages au niveau des différents membres afin d'utiliser des modèles de génération de déplacements et de comportement de mobilité à l'échelle de l'individu (par exemple le modèle Mobisim (Antoni, 2012)).

Les ménages sont décrits principalement par sept variables qui représentent des classes, plutôt que des variables continues (Tableau III-2). Cette classification permet lors de la phase de génération des sorties de ménages de trouver un ménage équivalent dans l'EMD. Le modèle d'évolution démographique fournit la quantité et la répartition des ménages en fonction de la taille, de l'âge et du revenu du ménage. Les autres variables résultent des différents modules implémentés dans le modèle.

Tableau III-2 : Principaux attributs des ménages dans SIMBAD

Ménages (758 777 ménages en 2009)	
Taille du ménage	de 1 à 5
Nombre d'actif	de 0 à 2
Niveau de revenu	en 3 classes *(20 %/60 %/20 %)*
Occupation du logement	locataire ou propriétaire
Nombre de voiture	de 0 à 2
Âge du chef de ménage	en 5 classes *(30 ans/45 ans/60 ans/75 ans)*
IRIS de localisation	numéro de l'IRIS

Source : traitement auteur, à partir des bases de SIMBAD

Établissements :

La description des établissements économiques repose sur les données du répertoire SIRENE. Cependant, l'affiliation d'un établissement à une entreprise et sa date de création ne sont pas conservées. Finalement, les établissements se caractérisent uniquement par leurs types d'activité, leurs effectifs et leurs localisations géographiques (Tableau III-3). Ces informations sont suffisantes pour le modèle afin de localiser les activités ainsi que pour distribuer les déplacements de personnes et de marchandises.

Tableau III-3 : Principaux attributs des établissements dans SIMBAD

Établissements (129 138 établissements en 2009)	
Nombre d'emploi	nombre entier (zéro inclus)
Nomenclature économique utilisée	en 15 ou 36 classes[22] (basées sur la Nomenclature Économique de Synthèse (NES))
IRIS de localisation	numéro de l'IRIS

Source : traitement auteur, à partir des bases de SIMBAD

Zones IRIS :

Le découpage géographique de référence pour le modèle SIMBAD est l'IRIS dont le découpage est réalisé par l'INSEE à partir des découpages communaux. De nombreux éléments de modélisation sont spatialisés sur le territoire et affiliés à un IRIS spécifique. Les caractéristiques des IRIS sont utilisées pour déterminer les comportements de mobilité résidentielle et quotidienne. Le Tableau III-4 présente les principaux éléments descriptifs des IRIS. Les IRIS sont des objets de base pour les études spatiales et cartographiques du territoire et de la mobilité pour le modèle SIMBAD.

[22] https://www.insee.fr/fr/metadonnees/definition/c1015 (consulté le 09/07/2018)

Tableau III-4 : Principaux attributs des IRIS dans SIMBAD

IRIS (777 IRIS dans l'aire urbaine de 1999)	
Numéro de l'IRIS	numéro de l'IRIS
Surface	en km²
Population (totale, par revenu, par âge, par taille de ménage)	en habitants
Nombre d'établissements (total, par NES)	en établissements
Nombre d'emplois (total, par NES)	en emplois
Densité (population, activités)	en hab/km² ou emploi/km²
Centralité	distance (km) et temps (min) à la préfecture
Infrastructures de transport	nombre d'arrêts, d'échangeurs
Accessibilité (à l'emploi, à la population, aux infrastructures de transport)	coefficient d'accessibilité gravitaire et isochrone
Prix de l'immobilier	en euros par m²
Taux de motorisation	nombre de voitures pour 1000 habitants

Source : traitement auteur, à partir des bases de SIMBAD

Sorties :

Les échanges qui ont lieu dans l'aire urbaine se matérialisent dans un premier temps par les sorties du domicile par les membres des ménages avant d'être affectés sur les réseaux de transport. Les sorties sont décrites par huit variables principales (Tableau III-5).

Au cours de la modélisation, l'affiliation des sorties aux ménages est perdue. Seul le niveau de revenu des ménages est conservé. Cependant, il est possible de récupérer les informations sur l'origine et la destination des sorties de ménages afin d'effectuer des analyses spatialisées des déplacements.

Tableau III-5 : Principaux attributs des sorties dans SIMBAD

Sorties (environ 2 500 000 sorties de ménages par jour)	
IRIS d'origine	numéro de l'IRIS
IRIS de destination	numéro de l'IRIS
Motif principal	6 motifs : *(travail, achat-service, école-maternelle, collège-lycée, université, autres)*
Mode de déplacement	4 modes : *(mode doux, transport en commun, voiture conducteur et voiture passager)*
Classe de revenu du ménage	en trois classes (cf. ménages)
Distance	en km
Temps	en minutes
Horaire de déplacement	heure pleine ou heure creuse

Source : traitement auteur, à partir des bases de SIMBAD

Le modèle SIMBAD est prospectif et actualise à chaque itération les différentes bases de données. Cependant, leurs évolutions sont conservées afin d'analyser la dynamique des interactions modélisées et leurs impacts sur la mobilité quotidienne des personnes.

2.2.2. Un réseau de transport fin

Dans le modèle SIMBAD, le choix méthodologique a été fait de décrire finement le réseau de transport afin de préserver la grande variété de réseau disponible sur le territoire. Cependant, la majorité des analyses réalisées auparavant considère des indicateurs entre secteurs, comme les flux, les temps généralisés, les temps de parcours (Nicolas *et al.*, 2009). Dans le cadre de cette thèse, l'analyse sera plus fine en regardant l'usage du système de transport au niveau des tronçons afin d'une part d'avoir plus de détail sur la circulation des véhicules et d'autre part de spatialiser les impacts environnementaux sur les tronçons.

Dans le logiciel d'affectation de trafic VISUM, les tronçons sont décrits par de très nombreux paramètres, certains liés leur nature, d'autres à la circulation dont ils sont le vecteur. Les données de circulation sont différenciées en neuf classes en fonction du niveau de revenu des ménages et de la zone de domicile des ménages avec le centre, la couronne et le reste de l'aire urbaine (Figure III-6). Le Tableau III-6 présente les principales variables caractérisant les tronçons.

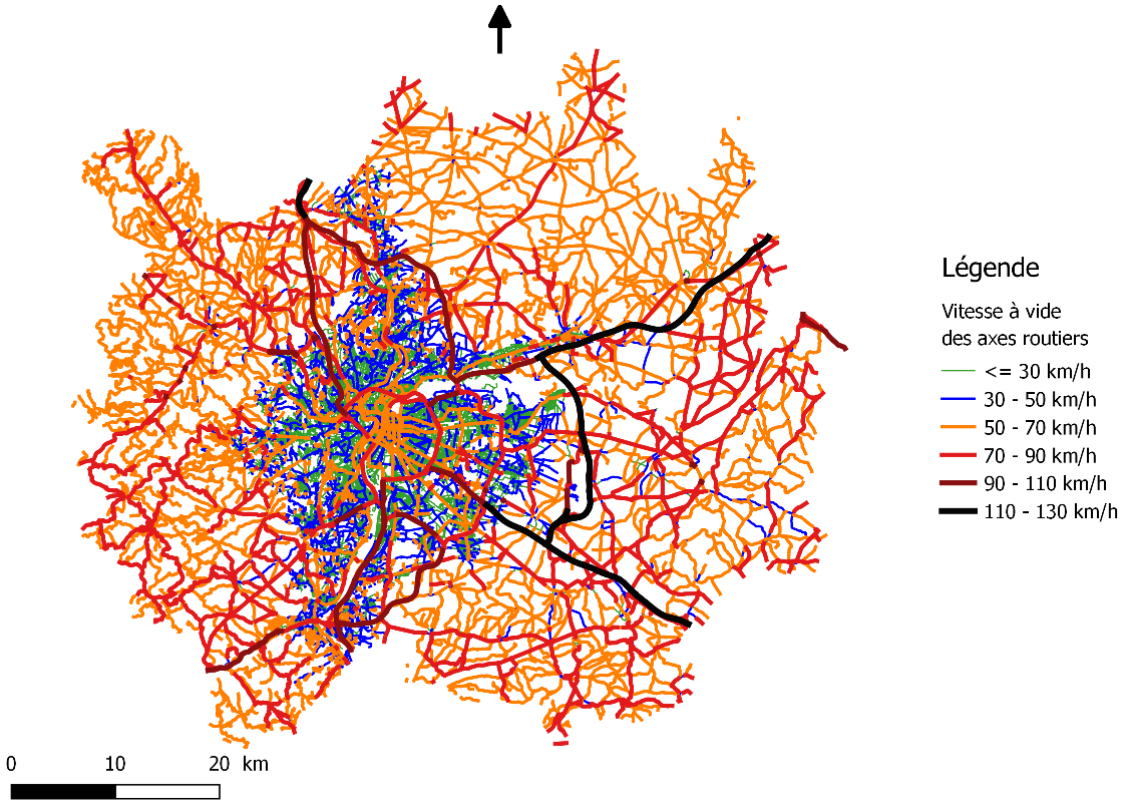
Tableau III-6 : Principaux attributs des tronçons dans SIMBAD

Réseau (144 278 tronçons)	
Longueur du tronçon	en mètres
Type de tronçon	indice de 0 à 99
Vitesse à vide	de 0 à 130 km/h
Capacité du tronçon	nombre de véhicules par heure
Courbe débit-vitesse	en 8 types (cf. Figure III-10)
Nombre de service de TC	services par heure (pour les différents modes de TC)
Charge sur le tronçon	nombre de véhicules et de passagers par heure
Vitesse en charge	en km/h

Source : traitement auteur, à partir des bases de SIMBAD

La Figure III-12 présente la couverture géographique du réseau routier modélisé dans SIMBAD ainsi que la vitesse maximale de circulation. On constate que le réseau lyonnais n'est pas homogène avec des tracés, des types d'infrastructures et des vitesses de circulation très variables sur le territoire. Le centre de l'agglomération plus urbain présente une densité d'infrastructures importante avec des vitesses à vide souvent inférieures à 50 km/h contrairement aux zones périphériques où la circulation est plus rapide. Une différence entre l'Est et l'Ouest lyonnais est à signaler avec des tracés plus sinueux à l'Ouest avec moins de voies rapides du fait d'une topologie plus montagneuse contrairement aux plaines de l'Est.

Figure III-12 : Vitesses maximales du réseau de voirie lyonnais



Source : données SIMBAD, traitement auteur

Le Tableau III-7 et le Tableau III-8 présentent la répartition en nombre et en longueur des différents tronçons de l'aire urbaine. On constate le poids important du réseau de voirie, même si le réseau de transport en commun est bien présent avec notamment un réseau de bus qui couvre approximativement le territoire du Grand Lyon (Figure III-7). La base de données contient aussi des tronçons fermés ou interdits. Ceux-ci représentent des sens interdits ou des tronçons amenés à être ouverts pour représenter des infrastructures à venir lors de la modélisation (exemple de l'Anneau des Sciences).

Tableau III-7 : Répartition des tronçons du réseau de transport par type principal

Type de tronçons	**Nb. de tronçons**	**Longueur (km)**	**Répartition (tronçons)**	**Répartition (longueur)**
Autoroute	678	571	0,5 %	2 %
Route 7 m	20 720	9 427	14 %	39 %
Route 5,7 m	10 747	1 591	7 %	7 %
Route 4,4 m	55 648	7 311	39 %	30 %
Total route	**87 793**	**18 901**	**61 %**	**78 %**
Bus	40 653	1 982	28 %	8 %
Tram	322	120	0,2 %	0,5 %
Métro	148	64	0,1 %	0,3 %
Train	180	590	0,1 %	2 %
Funiculaire	6	3	0,0 %	0,0 %
Total TC	**41 309**	**2 759**	**29 %**	**11 %**
Fermé/Interdit	15 176	2 688	11 %	11 %
Total	**144 278**	**24 348**	**100 %**	**100 %**

Source : traitement auteur, à partir des bases de SIMBAD

Tableau III-8 : Répartition des tronçons de voirie par vitesse à vide

Vitesse à vide	**Nb. de tronçons**	**Longueur (km)**	**Répartition (tronçons)**	**Répartition (longueur)**
30 km/h	51 106	6 127	58 %	32 %
50 km/h	19 434	3 184	22 %	17 %
70 km/h	12 881	6 790	15 %	36 %
90 km/h	4 003	2 408	5 %	13 %
110 km/h	294	240	0,3 %	1,3 %
130 km/h	75	152	0,1 %	0,8 %
Total route	**87 793**	**18 901**	**100 %**	**100 %**

Source : traitement auteur, à partir des bases de SIMBAD

Cette base de données de plus de 100 000 tronçons représente une des entrées principales de l'Analyse en Cycle de Vie pour appréhender l'usage du système de transport de l'aire urbaine de Lyon.

Conclusion de la partie 2 :

Le modèle SIMBAD apporte la majorité des informations nécessaires à la réalisation d'une ÉES de la mobilité quotidienne de personnes (1.2.2). Son périmètre représente l'aire urbaine de Lyon de 1999, recouvrant une grande variété d'espaces, allant de l'hypercentre lyonnais aux territoires ruraux du Beaujolais. La mise à jour du modèle pour le nouveau découpage de l'aire urbaine de Lyon 2010 représente un travail énorme qui n'était pas inclus dans le projet initial de SIMBAD et qui reste en suspens. Les différents comportements de localisation et de mobilité présents sur ce grand territoire sont modélisés par les différents modèles de choix discrets mis en œuvre dans le modèle. Son caractère désagrégé permet de lier les impacts de mobilité aux caractéristiques socio-économiques des ménages ainsi qu'aux caractéristiques des IRIS. À noter que la résolution de modélisation et d'analyse est plus fine dans le centre de l'agglomération avec des IRIS de plus petite taille comparés aux IRIS de périphérie.

Le modèle de transport appliqué à la plateforme SIMBAD apporte les principaux éléments nécessaires à la réalisation de l'évaluation environnementale. En effet, la résolution du modèle d'affectation est suffisamment fine pour permettre la localisation des flux de véhicules sur les réseaux de transport et ainsi localiser les émissions de polluants. Les informations sur les conditions de circulation et les taux d'occupation sont présentes dans le modèle tout comme les différents modes de transport en commun utilisés par les usagers. Le type de véhicules personnels utilisés par les ménages n'est pas représenté dans le modèle, seul le taux de motorisation des ménages est calculé.

Les aspects prospectifs et de simulation de SIMBAD apportent la vision stratégique nécessaire pour une ÉES avec la possibilité de réaliser différents scénarios. La modularité du modèle LUTI permet d'introduire ou de modifier un nombre important de variables pour créer des scénarios de natures différentes. Les modules externes d'évolution démographique et économique peuvent être repris pour modifier la composition de la population. Le module de développement immobilier est complètement externalisé et permet de simuler différentes formes urbaines. Pour le choix de localisation, l'introduction de scénarios est plus complexe, car ce module repose sur des modèles de choix discret. Cette remarque est identique pour la majorité des modules du modèle transport. Le choix modal pour les modes doux peut faire l'objet de scénario, car le modèle repose sur des proportions fixes. Pour l'affectation de trafic,

la modification du réseau de transport dans le logiciel VISUM permet de créer des scénarios de réseaux, notamment pour simuler des politiques globales de régularisation du trafic.

Dans l'état actuel, le modèle SIMBAD ne prend pas directement et explicitement en compte des variables environnementales pour déterminer les comportements de localisation des ménages et des entreprises ou les comportements de mobilité. Les variables testées dans ce sens lors du développement du modèle n'ont pas été concluantes. Un travail supplémentaire, qui sort du cadre de cette thèse, serait nécessaire pour réaliser un modèle transport-urbanisme-environnement (LTE model) tel que Wagner et Wegener (2007) l'appellent dans leur étude.

Il apparait bien que le modèle SIMBAD apporte les informations nécessaires à l'ACV afin de réaliser une ÉES de la mobilité quotidienne des personnes pour l'aire urbaine de Lyon. Après avoir présenté le fonctionnement de l'ACV retenue dans cette thèse, la mise en œuvre d'une ÉES, dans les chapitres suivants, permettra de vérifier la pertinence du choix du modèle transport-urbanisme et d'en tirer les limites pour ce type d'exercice.

Partie 3 : Le cadre d'ACV

À partir des données exportées de SIMBAD, une méthode basée sur l'approche de l'ACV est mise en œuvre pour quantifier les impacts environnementaux de la mobilité quotidienne de personnes. L'ACV étant un outil d'évaluation standardisé au niveau international, plusieurs éléments sont indispensables pour sa réalisation : la définition des objectifs et du champ d'études, l'inventaire, l'analyse des impacts environnementaux et l'interprétation.

3.1. Définition des objectifs et du champ d'études

Dans le cadre de cette thèse, l'objectif principal de ce travail est informatif et cognitif plutôt que d'élaboration, cet objectif est semblable à l'objectif de SIMBAD présenté comme un outil d'aide à la réflexion pour la conception de stratégies urbaines.

L'objet d'étude de cette thèse est la mobilité quotidienne de personnes dont les fonctions sont multiples puisqu'elle contribue au fonctionnement du système urbain. Une partie de cette contribution peut être analysée en quantifiant les services rendus par la mobilité notamment économiques et sociaux dans le modèle SIMBAD. Pour la réalisation de l'ACV, la fonction de référence de la mobilité quotidienne de personnes reprend la définition faite au chapitre 1 (cf. Chap I 2.1.2) : *Répondre à la demande de déplacements de personnes du système urbain de l'aire urbaine de Lyon pendant un jour ouvré moyen*. L'unité fonctionnelle associée, permettant d'exprimer les résultats, est par habitant et par jour ouvré. Avec cette unité fonctionnelle, le niveau de mobilité (le nombre de déplacements, les distances parcourues ou le taux d'occupation des véhicules) est inclus dans le résultat, contrairement à des unités telles que par déplacement, par personne.kilomètre ou par véhicule.kilomètre.

Afin d'apporter suffisamment d'éléments de réflexion dans le cadre d'une ÉES, plusieurs exigences ont été formulées pour l'ACV (cf. 1.2.3). Elles vont orienter les différents choix méthodologiques de l'ACV présentés dans cette partie par rapport aux processus technologiques considérés et au type d'évaluation d'impacts réalisée.

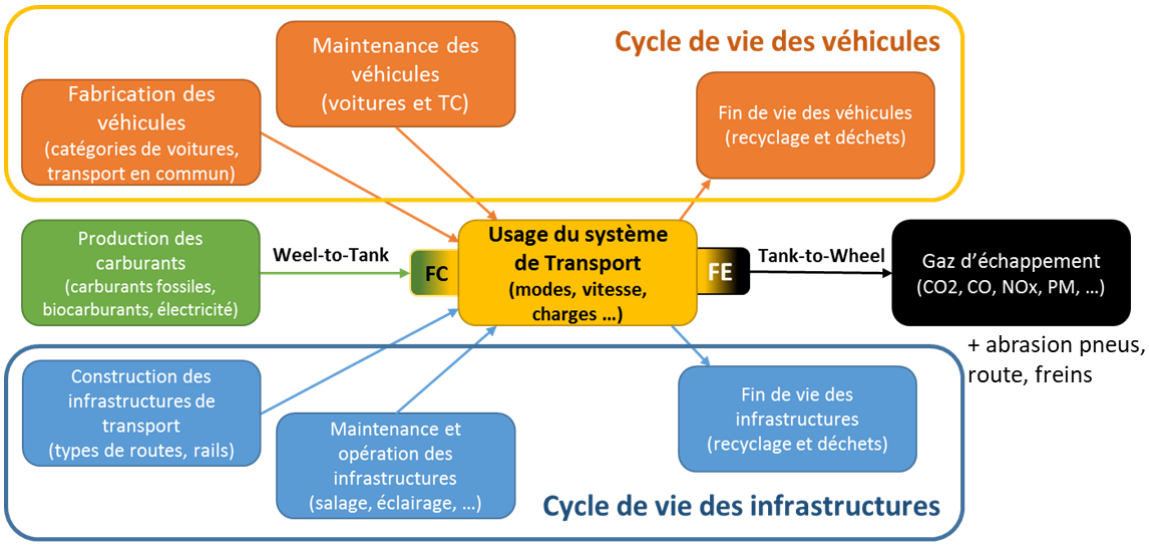
3.1.1. Description générale du système technologique

L'évaluation de la mobilité quotidienne de personnes réduit le champ d'étude aux jours ouvrés hors vacances soit pour l'année 2018 environ 227 jours, en considérant 25 jours de congé payé par an par actif. L'étude exclut 138 jours qui correspondent à des mobilités de week-end et de vacances dont les logiques de déplacements sont différentes avec des déplacements plus longs et des modes de transport potentiellement différents (avions, TGV, bateaux). L'analyse entreprise dans cette thèse se focalise principalement sur les déplacements. Les impacts environnementaux induits par le stationnement ne sont pas inclus dans le périmètre d'analyse. Les modes doux sont considérés comme non-polluants afin de simplifier l'évaluation malgré l'usage de vélos ou la construction de voies piétonnes et cyclables.

Dans le but de fournir une vision globale et détaillée des impacts liés à la mobilité quotidienne de personnes, une approche attributionnelle de l'ACV a été adoptée dans cette étude. Ce choix permettra de faire ressortir les points critiques entre les différentes composantes et phases de cycle de vie du système. Pour cela, les processus du système seront décrits par leurs flux physiques et technologiques, évitant ainsi d'avoir recours à une approche input/output, basée sur les flux monétaires.

Finalement, le système retenu pour l'ACV est constitué de quatre parties principales qui regroupent les différents processus en lien avec le cycle de vie des véhicules (fabrication, maintenance et fin de vie des véhicules), le cycle de vie des infrastructures de transport, les processus de combustion et d'émissions de gaz d'échappement et le cycle de vie des carburants. L'ensemble de ces processus sont rattachés à l'usage du système de transport exporté du modèle SIMBAD. La Figure III-13 schématise le système considéré pour l'ACV.

Figure III-13 : Schéma des éléments inclus dans le système technologique de l'ACV



Source : traitement auteur

La connexion entre les processus technologiques mobilisés dans l'ACV et l'usage du système de transport tel qu'il est décrit dans SIMBAD nécessite d'associer aux flux modélisés des hypothèses de caractéristiques technologiques notamment sur la motorisation, la taille et l'âge des véhicules (§3.1.2). Après avoir caractérisé l'usage du système de transport par des variables technologiques, les différents processus appelés dans le système doivent être décrits par les flux qu'ils mobilisent afin de réaliser l'inventaire des émissions et des extractions (§3.2). Enfin, dans le cadre d'une approche prospective certains processus sont amenés à être modifiés ou à être introduits dans le système (§3.3).

La méthode SIMBAD-ACV d'Évaluation Environnementale Stratégique proposée dans cette thèse est appliquée sur un territoire précis, l'aire urbaine de Lyon. Afin de prendre en compte les spécificités de ce territoire dans l'analyse, les données utilisées doivent être régionalisées en fonction de leur localisation. Les systèmes localisés sur le territoire, systèmes de premier plan, feront l'objet de données plus précises, tandis que le niveau de détail est variable pour les systèmes d'arrière-plan en fonction de la sensibilité des impacts à ces systèmes et de la disponibilité de la donnée (Azapagic *et al.*, 2007). Dans le cadre de la mobilité quotidienne de personnes d'une aire urbaine, les processus de combustion et d'émissions de gaz d'échappement sont des systèmes de premier plan alors que les cycles de vie des véhicules et des carburants sont des systèmes d'arrière-plan dont la spécificité française ou régionale est

importante notamment sur le type de véhicules utilisés ou le mix énergétique consommé. Les processus du cycle de vie des infrastructures se répartissent entre processus de premier plan et processus d'arrière-plan avec une partie localisée sur les différents axes, mais dépendante des processus d'arrière-plan tels que la fabrication des enrobés ou l'extraction de matériaux de construction.

À partir du niveau de détail fourni par le modèle SIMBAD pour l'ensemble des tronçons constituant le réseau de transport, nous proposons d'effectuer une analyse spatialisée des impacts environnementaux notamment pour les consommations de carburants et les émissions de gaz d'échappement. Cette approche désagrégée par tronçons permet de spécifier le type d'infrastructure empruntée et les impacts associés à ce type.

3.1.2. Représentation des parcs de véhicules personnels et de bus urbains

Pour associer des flux de véhicules avec des processus technologiques, il est nécessaire de connaitre le type de véhicule à associer. Pour cela, nous utilisons des parcs de véhicules : parcs automobiles pour les véhicules personnels et parcs de bus urbains pour le transport en commun. À noter que, dans ce travail, nous nous intéressons à l'usage des véhicules et non à la problématique de possession, ce qui nous amène à considérer des parcs de véhicules roulants plutôt que des parcs statiques.

Parcs automobiles :

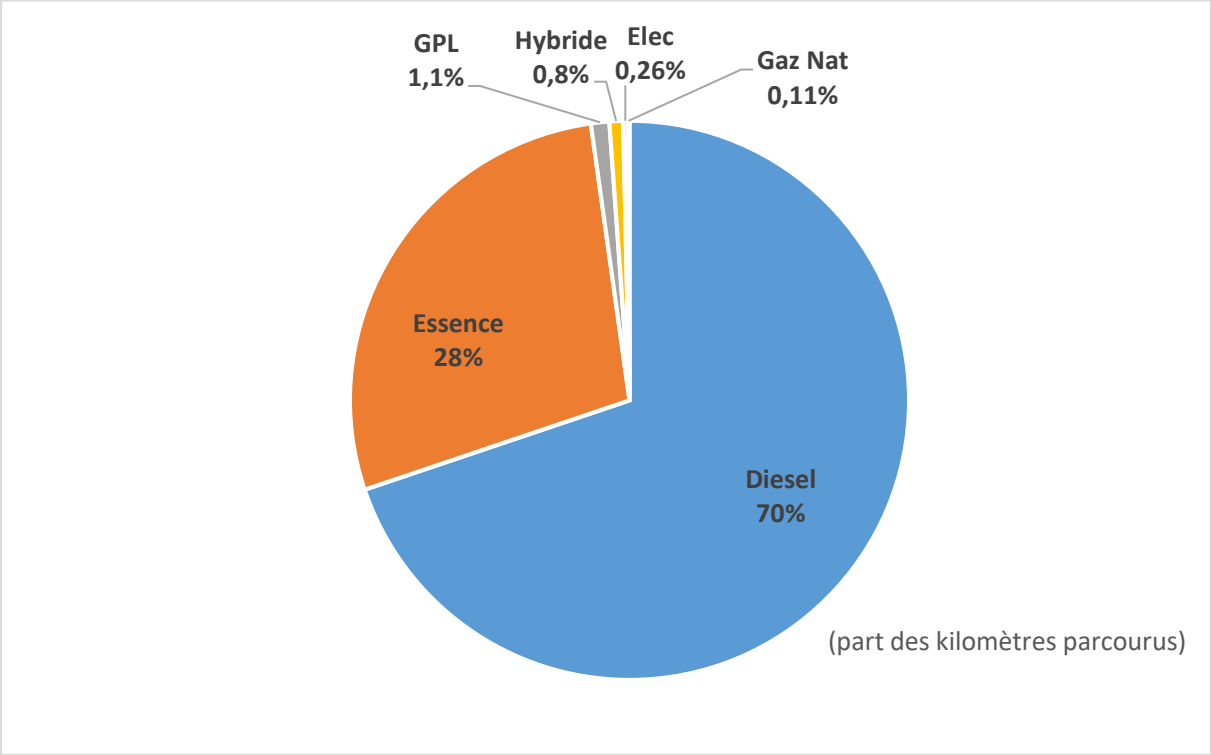
Pour les caractéristiques des véhicules personnels, il existe plusieurs sources de données caractérisant les parcs automobiles, représentés par différentes méthodes : des sources statistiques (le répertoire statistique des véhicules routiers (RSVERO) référence les immatriculations[23]) ; des enquêtes (notamment le panel Parc Auto Sofres ou l'Enquête Nationale Transport et Déplacements (ENTD) qui permettent des représentations régulières de

[23] http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/transports/r/parcs.html

l'état du parc national) ; des modèles, notamment les modèles démographiques ou les lois de survie peuvent être utilisés (Kolli, 2012). Pour cette étude, nous sommes partis de l'EMD de 2015 pour représenter le plus fidèlement possible le parc local et limiter les écarts introduits par un parc national (Grassot *et al.*, 2012). Des scénarios d'évolution différenciés du parc automobile ont ensuite été appliqués en fonction des politiques envisagées en la matière (encouragement des véhicules électriques ou gaz, ou réduction de la taille des voitures par exemple).

Pour représenter le parc automobile roulant de l'aire urbaine de Lyon, seuls les ménages de l'EMD habitant dans le périmètre de l'aire urbaine de 1999 ont été conservés. Pour la majorité des ménages motorisés, les véhicules possédés sont décrits avec le type de carburant utilisé, l'année de première immatriculation et la puissance fiscale. L'utilisation des voitures est disponible dans le descriptif des déplacements de l'EMD qui référence le ménage ainsi que le numéro du véhicule. Ces données nous ont permis de représenter le parc automobile roulant effectivement sur notre territoire en 2015, pour l'ensemble des ménages ainsi que pour les 9 classes de ménages affectées sur le réseau, qui croisent revenu et localisation. La Figure III-14 présente la répartition par type de motorisation des véhicules personnels de l'aire urbaine de Lyon, le descriptif en 9 classes est présenté en Annexe 2.

Figure III-14 : Répartition du parc automobile roulant de 2015 de l'aire urbaine de Lyon en fonction de la motorisation



Source : traitement auteur, à partir de l'EMD 2015

Le paramètre de puissance fiscale est peu utilisé pour quantifier les consommations d'énergie ou les impacts environnementaux. La puissance fiscale englobe deux paramètres, la taille de cylindrée et les rejets de CO_2. Afin de pouvoir utiliser facilement les données de parc automobile avec les données de construction des véhicules et de consommation d'énergie, la puissance fiscale a été convertie en catégories de taille en suivant les hypothèses suivantes :

Tableau III-9 : Conversion de la puissance fiscale en taille de véhicule

TAILLE	ESSENCE, GPL (Gaz de Pétrole Liquéfié) OU GAZ NATUREL	DIESEL
MINI	1 et 2 CV	1 et 2 CV
SMALL	3 à 6 CV	3 à 5 CV
MEDIUM	7 à 9 CV	6 à 8 CV
LARGE	10 CV et plus	9 CV et plus

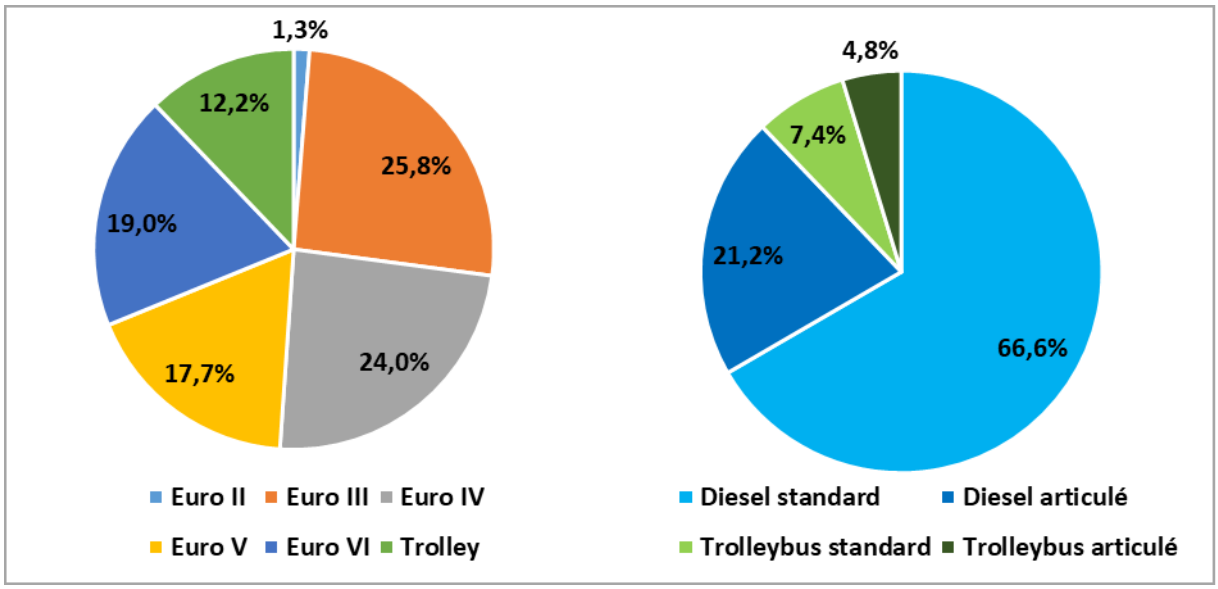
Les catégories mini, small et medium correspondent respectivement aux segments A, B et C de la classification de la Commission Européenne. La catégorie large regroupe les autres segments constitués principalement de grandes berlines, de monospaces et de SUV. Les poids des catégories mini, small, medium et large correspondent respectivement à 1 000 kg, 1 200 kg, 1 400 kg et 1 600 kg. Pour la catégorie large, une différenciation est faite pour les véhicules diesel qui regroupent plus de SUV et des monospaces dont le poids de 1 800 kg est appliqué. Avec cette classification, un véhicule moyen du parc roulant de Lyon, en 2015, pèse 1 325 kg. Cette classification par segment permet d'utiliser des bases de données telles que EcoInvent et Copert qui s'y réfèrent.

Parc de bus urbain :

Pour les bus urbains, le choix méthodologique de travailler avec un parc de bus urbain roulant moyen a été fait plutôt que de travailler à l'échelle de chaque ligne de bus afin de simplifier la méthode et le recensement de données. Le parc statique du réseau TCL a été représenté à partir du recensement par centre de dépôt de bus de 2016[24]. En croisant le recensement des bus par lignes avec la fréquence de chacune des lignes, nous reconstituons le parc roulant de bus urbains. Les bus sont décrits en fonction de leur motorisation (pour Lyon diesel ou trolleybus électriques), leur âge (exprimé par leur norme Euro) et leur taille répartie entre bus standard et bus articulé (Figure III-15).

[24] Le Parc TCL, https://tecelyon.info/sections.php?op=viewarticle&artid=21, consulté le 30 juillet 2018

Figure III-15 : Composition du parc roulant de bus du réseau TCL 2016, répartition par norme Euro et par motorisation et taille



Source : traitement auteur, à partir de la base TeceLyon[24]

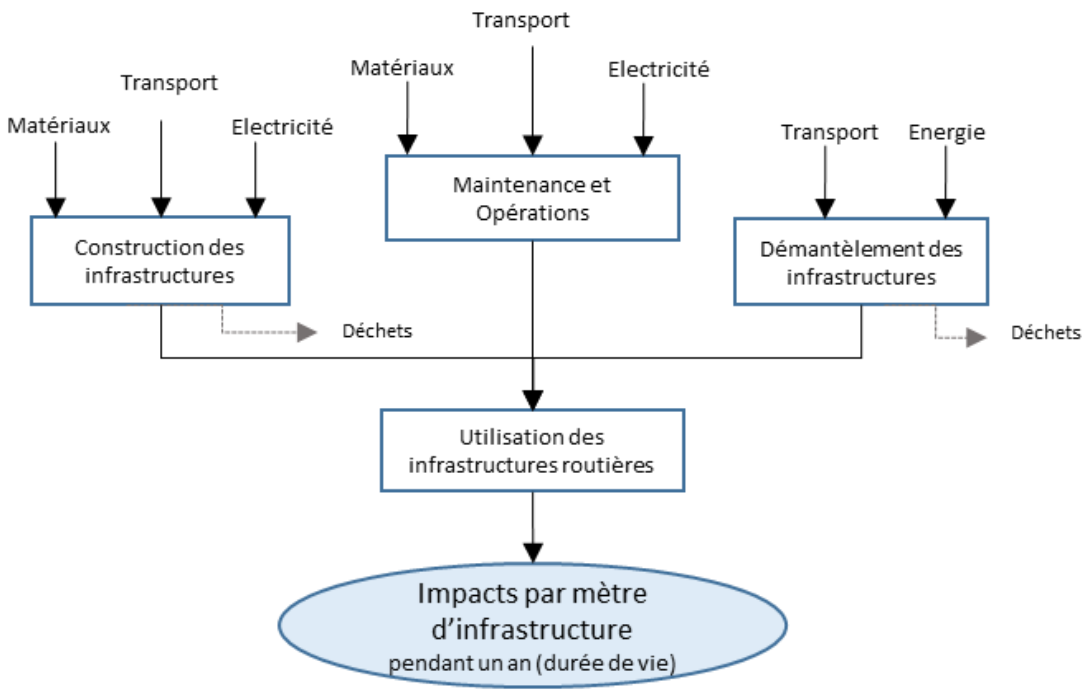
3.2. Inventaire du cycle de vie

Après avoir déterminé les parcs de véhicules nécessaires pour représenter l'utilisation des différentes technologies de transports, il est nécessaire de collecter les données permettant de quantifier les impacts liés à chacune de ces technologies. La collecte de données se répartit entre les quatre grandes phases du cycle de vie des transports décrites Figure III-13, qui mettent en œuvre des processus et des bases de données différents. Deux bases de données sont principalement utilisées dans cette thèse, Ecoinvent 3.3, développée par un consortium d'instituts suisses faisant référence aujourd'hui pour l'ACV, et Copert 5, développée par Emisia associé à l'université de Thessalonique et financée par l'Agence Environnementale Européenne (Moreno Ruiz *et al.*, 2016; Ntziachristos *et al.*, 2014). La manipulation des données d'Ecoinvent est réalisée sous OpenLCA (Winter *et al.*, 2015) alors que les données de Copert ont été traitées sous R.

3.2.1. Cycle de vie des infrastructures :

Le cycle de vie des infrastructures de transport prend en compte les processus liés à la fabrication, la maintenance, les opérations et le démantèlement des infrastructures. La maintenance et les opérations comprennent des processus tels que le désherbage, le salage, l'éclairage des voies. Pour l'ensemble des modes de transport, les impacts sont rapportés au mètre d'infrastructure par jour puisque seules les infrastructures linéaires sont considérées. Les parkings, les garages et les stations sont ignorés dans la thèse. L'aspect temporel est important, car les infrastructures sont construites pour plusieurs années et sont utilisées à la fois pour la mobilité quotidienne, mais aussi pour les mobilités de week-end et de vacances. Le partage de la voirie entre véhicules personnels et véhicules de marchandises est disponible après l'affectation du trafic dans le modèle LUTI. Pour l'ensemble des infrastructures, la durée de vie considérée est de 100 ans (Spielmann *et al.*, 2007). Les principaux processus et flux sont représentés dans la Figure III-16.

Figure III-16 : Schéma des processus liés au cycle de vie des infrastructures



Source : traitement auteur

Les processus liés aux infrastructures proviennent de la base de données Ecoinvent qui fournit directement les éléments pour le train, le tramway et la route. Pour le métro, un processus a été construit, car l'étude d'ACV pour le métro de Rome n'analyse pas les infrastructures. Pour une voie de métro, le choix a été fait d'additionner la construction d'une voie d'un tramway avec celle d'un tunnel, deux voies dans un tube de tunnel.

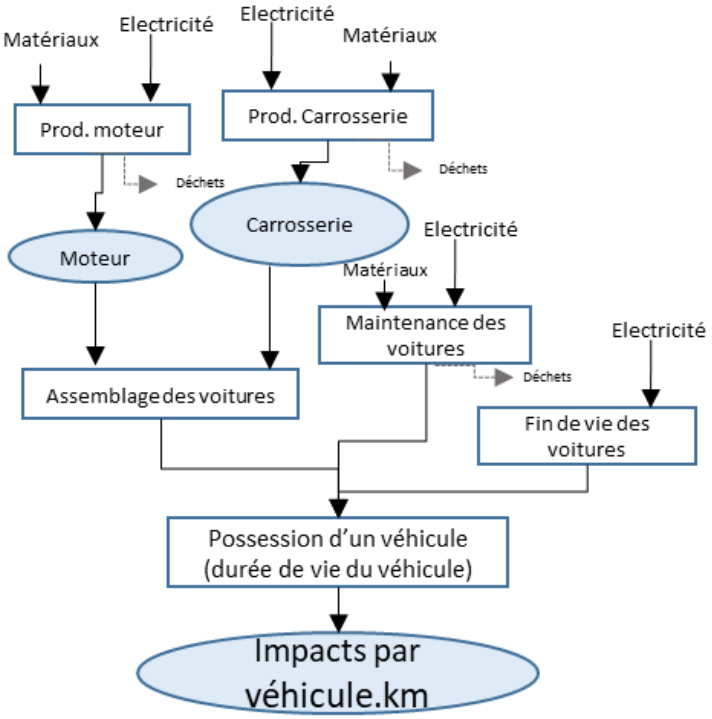
Pour la voirie, Ecoinvent ne dispose que d'un type de route qui correspond à une moyenne basée sur le réseau de voiries suisses. Cependant, les documents techniques d'Ecoinvent présentent les quatre catégories de routes qui ont permis de réaliser cette moyenne. Ces données plus fines ont été utilisées pour quantifier quatre processus de voirie au lieu d'un seul. Ces différentes voiries correspondent à une autoroute, une route de 7 mètres de large, une route de 5,7 m de large et une route de 4,4 m de large. Les impacts ont été rapportés à une voie, car ils représentaient initialement des routes à double sens ou des doubles voies. Le type de voie associé change en fonction du niveau hiérarchique des tronçons de route du modèle LUTI, permettant ainsi de capter la spécificité du réseau de voirie d'une aire urbaine (Tableau III-7).

3.2.2. Cycle de vie des véhicules :

La partie s'intéressant au cycle de vie des véhicules prend en compte les différents processus liés à la fabrication, la maintenance et la fin de vie des véhicules. Les processus liés à l'usage des véhicules sont considérés dans une autre partie.

La Figure III-17 présente les principaux processus et éléments qui constituent le cycle de vie des véhicules. Afin de quantifier l'usage des véhicules modélisé dans le modèle SIMBAD, le flux de référence de cette partie est le véhicule.kilomètre obtenu en divisant l'ensemble des flux associés à un véhicule par la durée de vie du véhicule, exprimée en kilomètres. Le paramètre de durée de vie des véhicules est un élément important pour l'analyse, car l'ensemble des impacts liés aux véhicules est inversement proportionnel à ce paramètre.

Figure III-17 : Schéma des processus liés au cycle de vie des véhicules



Source : traitement auteur

Pour représenter les impacts associés à la majorité des modes de transports présents dans le modèle LUTI, nous avons utilisé la base de données Ecoinvent 3.3 qui fournit des éléments sur la fabrication, la maintenance et la fin de vie des voitures, des bus, des trains et des tramways. Le métro est traité différemment pour la collecte de données.

Pour chacun des principaux modes, voitures, bus, tramways et trains, la maintenance est considérée comme constante dans Ecoinvent et elle est décrite par un processus unique qui ne dépend pas de la durée de vie des véhicules et est exprimé par véhicule.

Dans Ecoinvent, les processus de fin de vie et de recyclage des véhicules sont directement liés aux processus de fabrication. Ainsi, la fabrication et la fin de vie sont souvent rassemblées dans un même processus.

Pour la fabrication des trains, la base de données dispose de données sur trois types de trains différents, un train grande vitesse, et deux trains de capacités très différentes (280 places et 1 400 places). Afin de considérer l'ensemble des trains du réseau TER de Lyon, dont certains sont petits (exemple du TER de l'Ouest lyonnais) et d'autres très grands (exemple de la ligne

Lyon – Saint-Étienne), le choix de prendre la moyenne des deux modèles fournis par Ecoinvent a été fait. La durée de vie du train considéré est donc de 13 000 000 km (Spielmann *et al.*, 2007).

Pour la fabrication des tramways, la base de données dispose d'un seul modèle de tramway dont les données datent de 1991. Afin de prendre en compte la modernisation et l'allongement des tramways, les données de fabrication et de maintenance ont été multipliées par un facteur 3 pour les véhicules. La durée de vie est de 2 500 000 km.

Pour la fabrication des bus diesel, la base de données dispose d'un seul modèle de bus urbain. L'ensemble des flux sont rapportés à la masse du bus afin de pouvoir estimer les impacts des bus standards et articulés qui pèsent respectivement 11,5 t et 17 t (modèles Irisbus Citelis 12 et Citelis 18[25]). La durée de vie des bus est de 1 000 000 km (Spielmann *et al.*, 2007).

Pour la fabrication des trolleybus, l'absence de données dans Ecoinvent nous a amené à construire un processus spécifique en remplaçant le moteur thermique par un moteur électrique dans le processus de bus standard. Les données pour les moteurs sont disponibles dans la base de données. Les poids à vide des trolleybus s et articulés sont respectivement de 12,8 t et 19,1 t (modèles Irisbus Cristalis ETB 12 et 18[25]). La durée de vie des trolleybus est de 1 416 666 km (Spielmann *et al.*, 2007).

Pour le métro, la base Ecoinvent ne possède pas de données. L'étude d'ACV réalisée sur le métro de Rome par Del Pero *et al.* (2015) a servi de référence pour quantifier les impacts de la fabrication, de la maintenance et de la fin de vie des métros. Les données collectées ont été adaptées pour Lyon en utilisant le poids du métro de Rome et ceux des métros de Lyon. Trois processus ont été ainsi créés pour correspondre aux trois types de métros présents sur Lyon (les métros A et B, le métro C et le métro D). Les funiculaires sont considérés comme équivalents au métro de la ligne C. La durée de vie des métros est directement liée à celle de l'étude utilisée qui considère 30 ans de durée de vie.

Pour les voitures, la base de données dispose de trois références, le véhicule à carburation essence, celui à diesel et le véhicule électrique. Pour le véhicule électrique, la production de batterie est indépendante de la fabrication du véhicule. Les flux des processus sont rapportés à la masse afin de déterminer les impacts de chacune de catégories de voitures décrites dans les parcs automobiles. La durée de vie utilisée pour les véhicules personnels est de 150 000 km (Spielmann *et al.*, 2007). Le processus de fabrication des voitures est séparé entre la partie

[25] http://www.lyon-en-lignes.org/index.php/caract-vhicules-plusloin-55, consulté le 30 juillet 2018

moteur et la carrosserie afin de permettre, dans une vision prospective, de changer une seule de ces deux parties indépendamment.

3.2.3. Utilisation des véhicules :

Pour l'utilisation des véhicules et les émissions de gaz d'échappement, la base Ecoinvent fournit des facteurs d'émissions par kilomètre parcouru. Pour le tramway et le train, les facteurs d'émissions de particules fournis par Ecoinvent sont utilisés afin de quantifier les émissions liées aux frottements des freins et du contact avec les rails et les caténaires. Pour le métro, l'absence de données dans Ecoinvent et dans l'étude de Del Pero *et al.* (2015) nous amènent à ignorer les émissions des métros qui ont lieu dans les tunnels et les stations notamment lors des arrivées des véhicules (Moreno *et al.*, 2015).

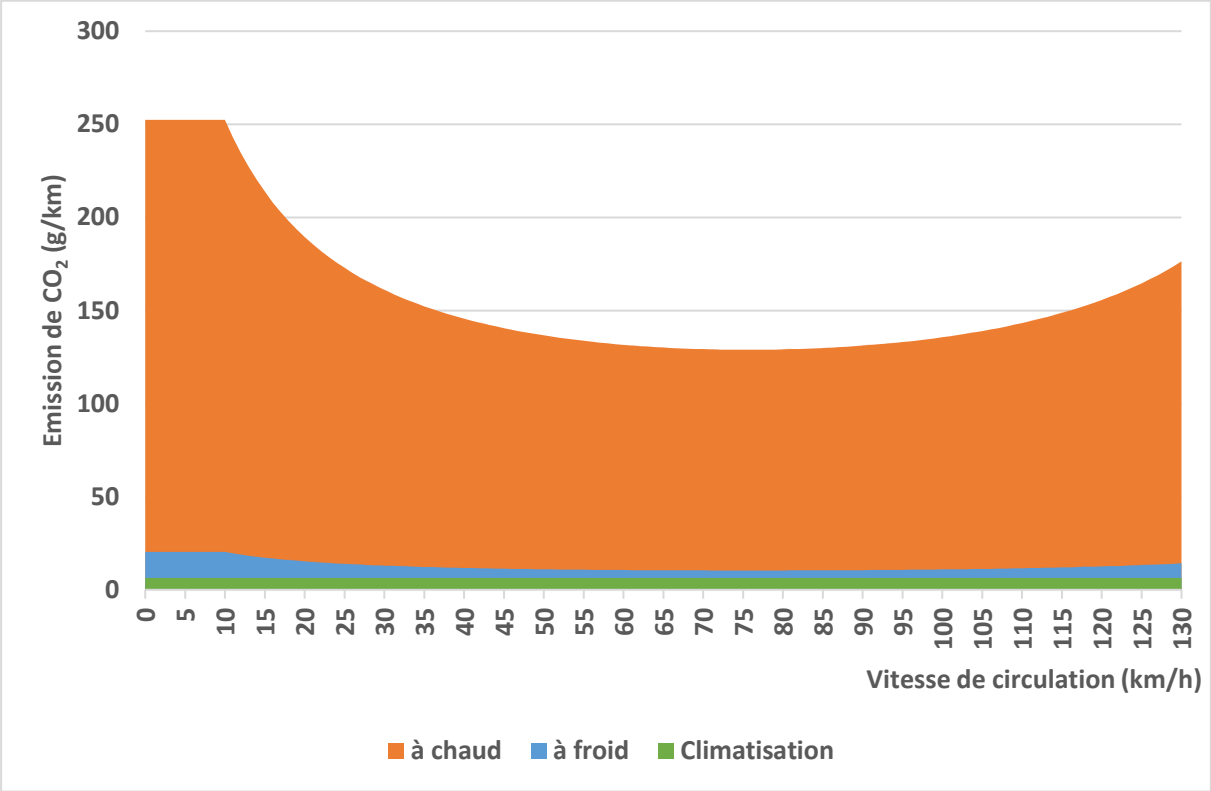
Pour les bus et les voitures, la base de données Ecoinvent n'est pas assez précise pour différencier les émissions en fonction des conditions de circulation des véhicules. La base de données Copert, fréquemment utilisée par les différents modèles évaluant les émissions de polluants associes aux transports (AASQA, par exemple), nous a donc paru plus appropriée pour fournir des facteurs d'émissions en fonction du type de véhicules et des conditions de circulation. Ainsi, Copert 5 fournit pour l'ensemble des polluants atmosphériques un facteur d'émission pour chaque type de véhicules et pour différentes conditions de circulations. Les conditions de circulation sont principalement représentées par la vitesse de circulation, mais incluent aussi des éléments sur la température extérieure, la longueur des déplacements et le nombre de déplacements réalisés en un jour. Ces derniers éléments permettent de calculer les émissions et surconsommations liées aux démarrages à froid, à la climatisation, à l'évaporation de l'essence. Ces éléments se rajoutent aux émissions et aux consommations normales, appelées émissions à chaud, ainsi qu'aux émissions de particules liées aux freins, aux pneus et à l'abrasion de la route (Ntziachristos *et al.*, 2014; Ntziachristos & Boulter, 2009). Les moyennes mensuelles des températures de Lyon ainsi que les moyennes de distances et de nombre de déplacements de l'EMD de Lyon 2015 sont utilisées pour estimer ces paramètres supplémentaires. Pour les bus, seules les émissions à chaud et les émissions de particules liées aux frottements sont considérées dans Copert 5. Le coefficient de pente peut être ajouté dans le calcul, mais le manque d'information dans le modèle SIMBAD ne permet pas d'ajouter cette

variable pour les bus. Ainsi, le calcul de consommation de carburants et d'émissions de polluants des véhicules peut se synthétiser par l'équation :

$$\text{Émissions}_{totales} = \text{Émissions}_{\text{à } chaud} * \left(1 + coef_{\text{surémissions à } froid}\right)$$
$$+ \text{Émissions}_{supplémentaires} \ \textit{(abrasions, évaporation, climatisation, huiles moteur)}$$

En récupérant les paramètres et les équations de Copert 5, il est possible de déterminer les profils d'émissions et de consommation de chacun des parcs de véhicules de l'aire urbaine de Lyon. La Figure III-18 présente le profil d'émission de CO_2 pour le parc automobile moyen de l'aire urbaine de Lyon en fonction de la vitesse de circulation.

Figure III-18 : Émission unitaire de CO2 d'un véhicule moyen du parc de Lyon 2015 en fonction de va vitesse

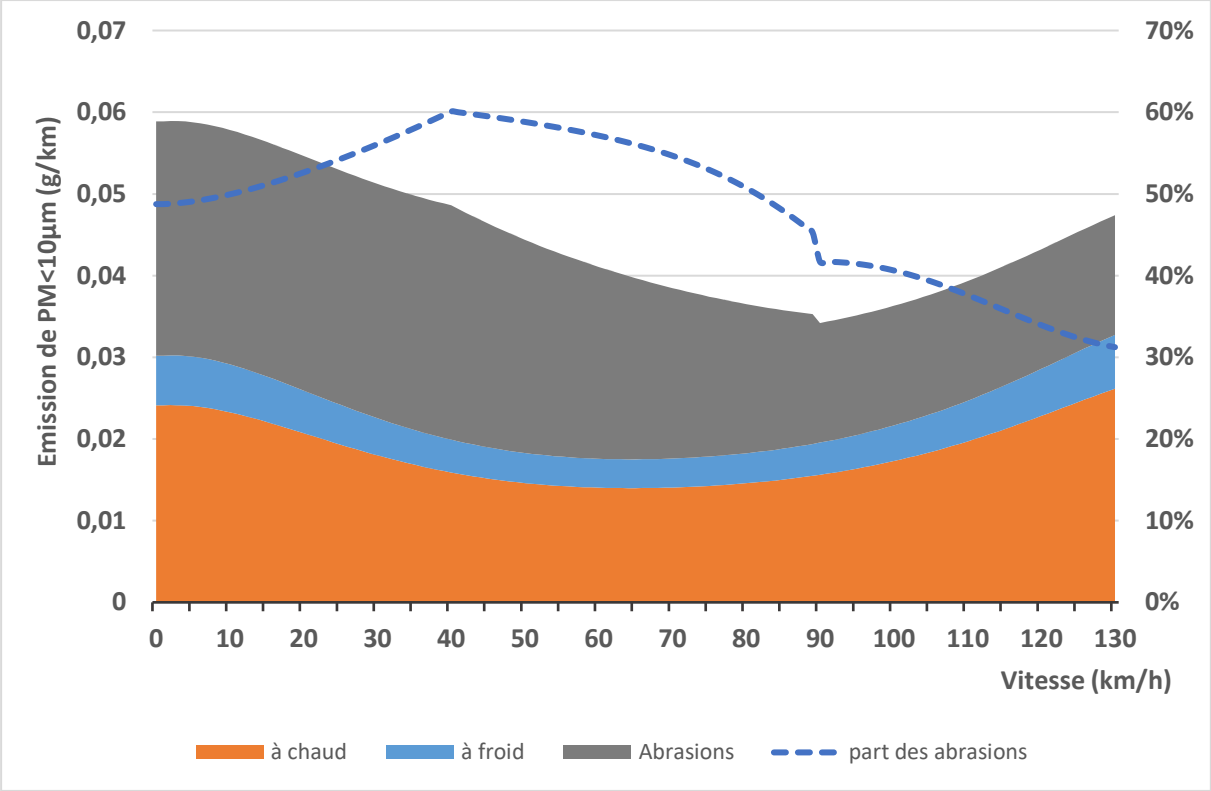


Source : Copert 5, traitement auteur

Pour les émissions de CO_2, les émissions à chaud sont majoritaires et représentent environ 90 % des émissions totales. Les émissions de CO_2 découlent directement de la consommation de carburants. Le profil des émissions de particules inférieures à 10 µm du parc automobile

moyen, présenté Figure III-19, montre en revanche l'importance d'élargir l'inventaire d'émissions au-delà des émissions à chaud notamment pour les émissions d'abrasions qui sont importantes (Ntziachristos & Boulter, 2009).

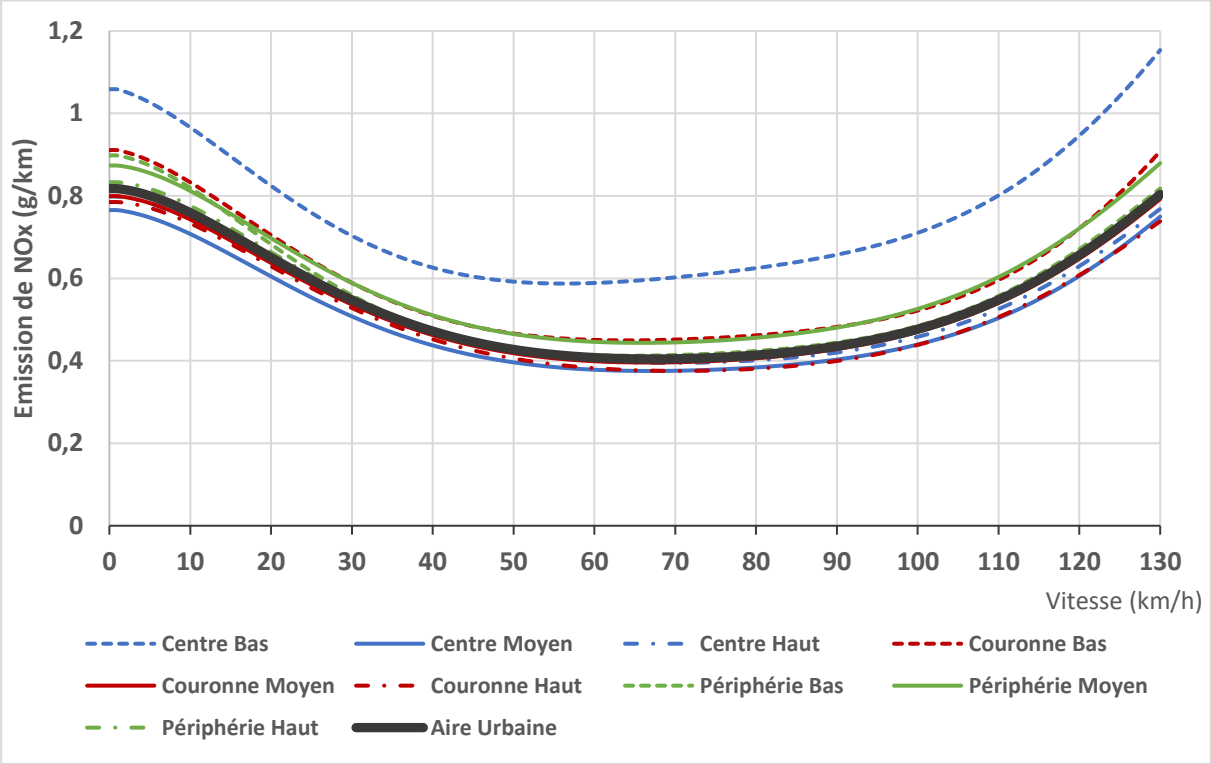
Figure III-19 : Profil d'émission de particules inférieures à 10 µm du parc automobile moyen de Lyon



Source : Copert 5, traitement auteur

L'usage de Copert permet d'intégrer les variabilités dues aux différentes vitesses de circulation observées sur le territoire lyonnais qui comporte tout à la fois des voies d'autoroutes et des petits axes de desserte locale. La Figure III-20 présente les profils d'émissions de NOx des 9 parcs automobiles créés pour les 9 classes de ménages. On observe une forte variabilité du niveau d'émission en fonction de la vitesse allant de 0,4 à 0,8 g de NOx par kilomètre pour le parc moyen ainsi que des différences non négligeables entre les différents parcs, notamment pour les ménages du centre à faible revenu.

Figure III-20 : Profils d'émissions de NOx des 9 parcs automobiles (localisation/revenu) en fonction de la vitesse de circulation



Source : Copert 5, traitement auteur

Pour les bus à carburation diesel, la méthodologie est identique avec uniquement les émissions à chaud et les émissions d'abrasions des freins, des pneus et de la route, qui sont plus importantes pour les bus. Les émissions des trolleybus électriques se limitent aux abrasions en différenciant les trolleybus articulés des trolleybus standards, comme pour les bus diesel.

3.2.4. Cycle de vie des carburants :

De façon identique aux émissions lors de l'utilisation des véhicules, Copert 5 est plus précis pour déterminer les consommations de carburants liquides en fonction des conditions de circulation. Pour les voitures et les bus diesel, les consommations de carburants sont obtenues en grammes par kilomètre. Les facteurs de consommation prennent en considération l'utilisation d'agrocarburants qui possèdent des densités énergétiques plus faibles que les

carburants fossiles. À partir des conditions de circulations, des compositions des parcs de véhicules et du type de carburants utilisés, la base de données Copert 5 fournit les consommations pour chacun des carburants en fonction de sa nature, c'est-à-dire essence, diesel, GPL, éthanol, biodiesel.

La consommation électrique kilométrique utilisée pour le tramway et le métro est de 5,87 kWh/km et correspond à la consommation électrique moyenne des transports urbains en agglomération dense (DGITM - MEDDE, 2012).

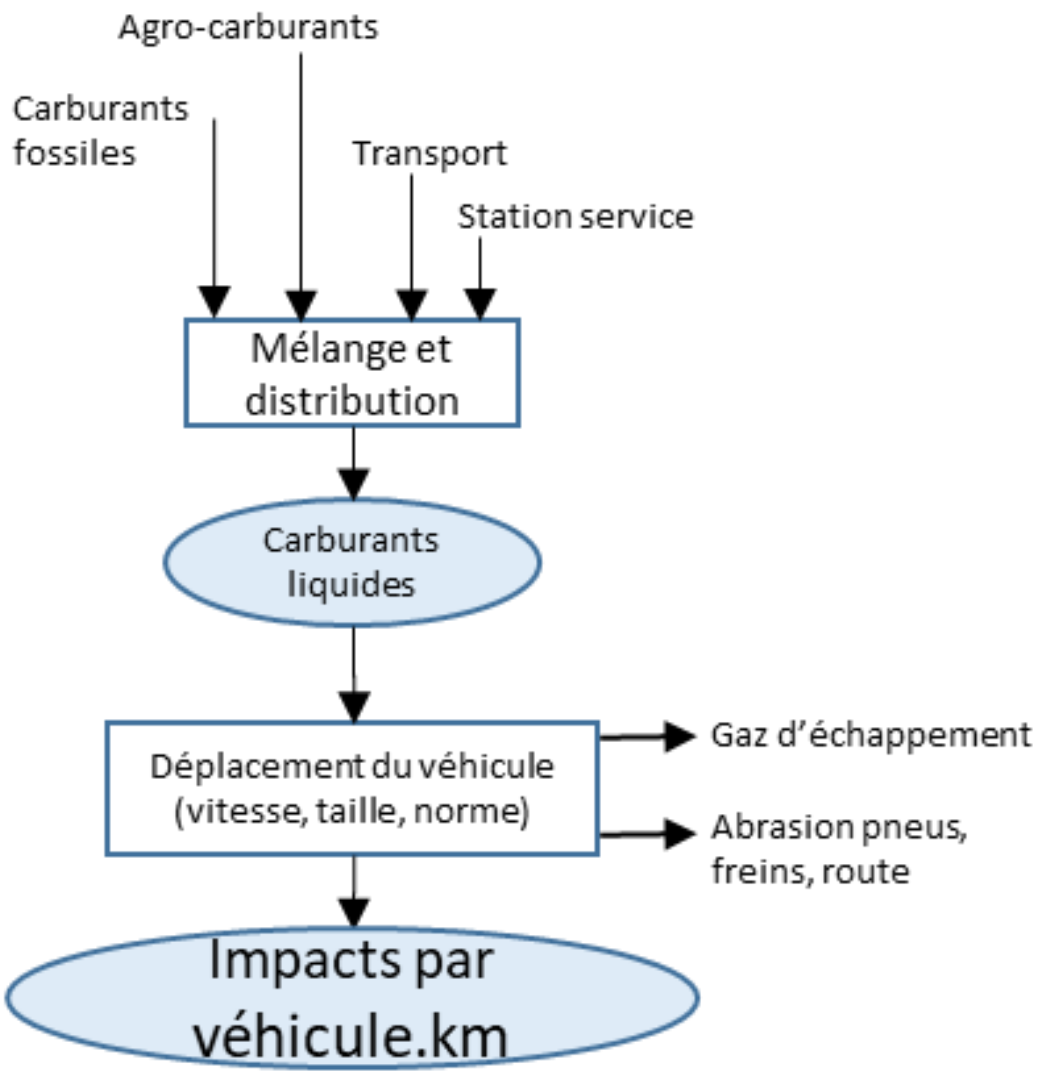
La consommation électrique du train est considérée de 12,25 kWh/km et correspond à la moyenne des deux consommations des trains présents et utilisés de Ecoinvent.

Les consommations électriques des trolleybus sont de 3,04 kWh/km et 3,8 kWh/km respectivement pour le modèle standard et articulé. Ces consommations proviennent de la base de données Ecoinvent avec pour hypothèse une augmentation de la consommation de 25 % pour le modèle articulé.

La base de données Ecoinvent a aussi été utilisée pour quantifier les impacts unitaires de chacun des carburants afin de déterminer les impacts sur l'ensemble du cycle de vie des carburants qui commence à l'extraction des ressources jusqu'à la pompe de station-service. Les flux et les impacts de chaque carburant sont exprimés par kilogramme de carburant afin de correspondre avec les calculs de consommation précédents. Les impacts liés à la consommation d'électricité sont obtenus en utilisant les données disponibles pour le parc électrique français dans la base Ecoinvent.

La Figure III-21 synthétise les différents processus et flux qui permettent de mettre en mouvement les véhicules, elle rassemble les éléments liés aux émissions et ceux de l'approvisionnement et de la consommation de carburants.

Figure III-21 : Schéma des processus et flux liés à la mise en mouvement des véhicules



Source : traitement auteur

3.2.5. Synthèse :

Les quatre groupes de processus décrits ci-dessus renvoient à des unités de référence (véhicule.kilomètre et mètre.jour) qui sont disponibles dans les fichiers d'exportation du modèle LUTI après l'affectation sur le réseau.

Pour les infrastructures, la longueur et le type de chaque tronçon permettent de déterminer les impacts environnementaux. Les impacts de chaque tronçon sont ensuite partagés en fonction

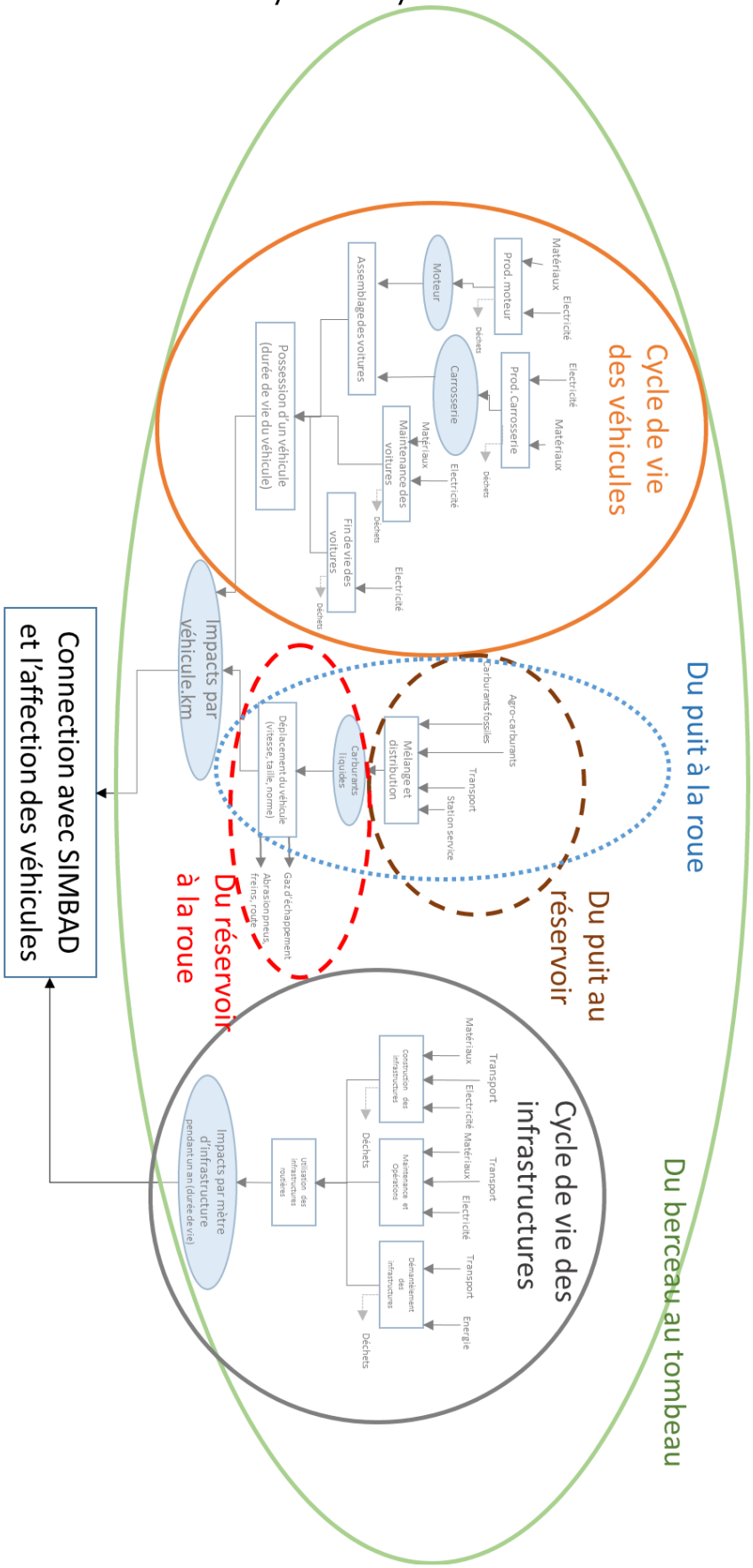
de la charge de véhicule de chaque catégorie empruntant le tronçon. Par exemple, les impacts d'une route de périphérie utilisée uniquement par des ménages de périphérie seront répartis entre les différents ménages de périphérie. Les impacts d'une route sur laquelle aucun trafic n'a été affecté par SIMBAD sont répartis au prorata du total de distance parcourue des 9 classes de ménages. La charge des véhicules de marchandises est également prise dans l'allocation des impacts.

Pour chaque tronçon, les charges de chaque catégorie de ménages sont connues ainsi que la longueur du tronçon et la vitesse de circulation. À partir de ces données, il est possible de calculer les véhicules.kilomètres parcourus par chaque catégorie (charge x distance) afin de les multiplier par les impacts unitaires liés au cycle de vie des véhicules. La mise en place pour les carburants et les gaz d'échappement est plus complexe, car la variable vitesse est à ajouter. Un programme informatique sous R a été réalisé pour effectuer cette allocation des impacts. Pour les transports en commun, les impacts calculés à chaque tronçon sont partagés en fonction de la charge de passagers des neuf catégories de ménages.

Finalement, les impacts pour chaque catégorie sont connus sur l'ensemble des tronçons, il suffit de les sommer pour les heures pleines et les heures creuses, pour obtenir le total quotidien par catégorie pour ensuite diviser ce total par la population de chaque catégorie pour exprimer les résultats en habitant par jour.

La Figure III-22 présente la vision globale des processus et des flux du système modélisé dans l'ACV ainsi que les différents périmètres d'étude. La mise en œuvre de l'ACV nécessite l'extraction de beaucoup de données des logiciels Copert 5 et OpenLCA afin de compiler l'ensemble avec les fichiers extraits de SIMBAD à l'aide de programmes réalisés sous R.

Figure III-22 : Schéma global du système technologique utilisé pour l'Analyse de Cycle de Vie



Source : traitement auteur

3.3. Hypothèses utilisées pour la prospective

L'approche paramétrique de l'ACV que nous avons présentée dans le paragraphe précédent permet, dans l'objectif prospectif de la thèse, d'évaluer différents scénarios technologiques prospectifs. L'ensemble des éléments et processus décrits dans la partie précédente peut faire l'objet d'un scénario. Le choix a été fait de se concentrer sur des scénarios de parcs de véhicules pour réaliser une ACV prospective. Trois orientations prospectives sont envisagées pour les parcs automobiles : un changement de motorisation, un changement de la taille des véhicules et un rajeunissement du parc. La même chose peut être réalisé pour le parc de bus urbain, mais les impacts environnementaux étant beaucoup plus faible cette option n'a pas été approfondie dans le cadre de ce travail.

L'allègement et le rajeunissement du parc automobile ne nécessitent pas de collecte de données supplémentaire ni de modification du système, car les variables taille et âge (traduit en norme Euro) sont déjà présentes dans Copert 5 et les impacts liés à la fabrication des véhicules dépendent du poids. L'âge des véhicules influe uniquement sur la consommation de carburant et les émissions directes de gaz d'échappement.

Pour certaines motorisations, les bases de données environnementales ne disposent pas encore d'assez de données pour quantifier les flux et les impacts. Les véhicules à hydrogène ne sont pas encore très documentés, contrairement aux véhicules électriques pour lesquels Ecoinvent dispose de données. Du fait de la disponibilité des données et de la maturité des technologies, deux orientations de la motorisation du parc automobile ont été envisagées pour l'approche prospective : l'électrification du parc avec des véhicules électriques à batterie et des véhicules hybrides non rechargeables, et le développement des véhicules à gaz naturel.

D'autres orientations prospectives pourraient ultérieurement être intégrées avec cette approche notamment le développement de carburants liquides d'origine végétale ou encore le développement de certains équipements d'aide à la conduite ou d'automatisation de la conduite. Pour les agrocarburants, l'approche prospective a été mise de côté, principalement du fait de la forte variabilité des impacts liée au type de production et à la région de production (Menten, 2013). Les impacts environnementaux liés aux équipements d'aide à la conduite et à l'automatisation sont aujourd'hui encore très peu documentés et ne permettent pas aujourd'hui de réaliser de prospective technologique.

3.3.1. Prospective associée à l'électrification du parc automobile :

L'électrification du parc automobile nécessite d'intégrer de nouveaux processus dans le système technologique que nous avons initialement représenté afin d'intégrer la production des nouveaux véhicules ainsi que leur approvisionnement en électricité. La Figure III-23 schématise en orange les flux et les processus supplémentaires qui ont été rajoutés dans le périmètre du système.

La production des véhicules est modifiée afin d'intégrer la production des moteurs électriques, les batteries et les différents éléments de connexions nécessaires. Les processus intégrés proviennent de la base de données Ecoinvent et correspondent à la production d'un véhicule électrique à batterie Lithium-ion. Lié directement à la production de batterie, le recyclage des batteries est intégré dans le système en considérant deux technologies de recyclage, un traitement pyrométallurgique et un traitement hydrométallurgique disponibles dans Ecoinvent. Un seul modèle de véhicule électrique est considéré dans cette thèse. Il pèse 1 494 kg dont 262 kg de batterie installée, correspondant au modèle représenté par Ecoinvent (Del Duce *et al.*, 2014).

À partir des éléments intégrés pour les véhicules électriques, un véhicule hybride électrique-essence a été construit. Il reprend la structure d'un véhicule essence pour lequel le poids du moteur thermique a été réduit pour rajouter un moteur électrique et 100 kg de batterie.

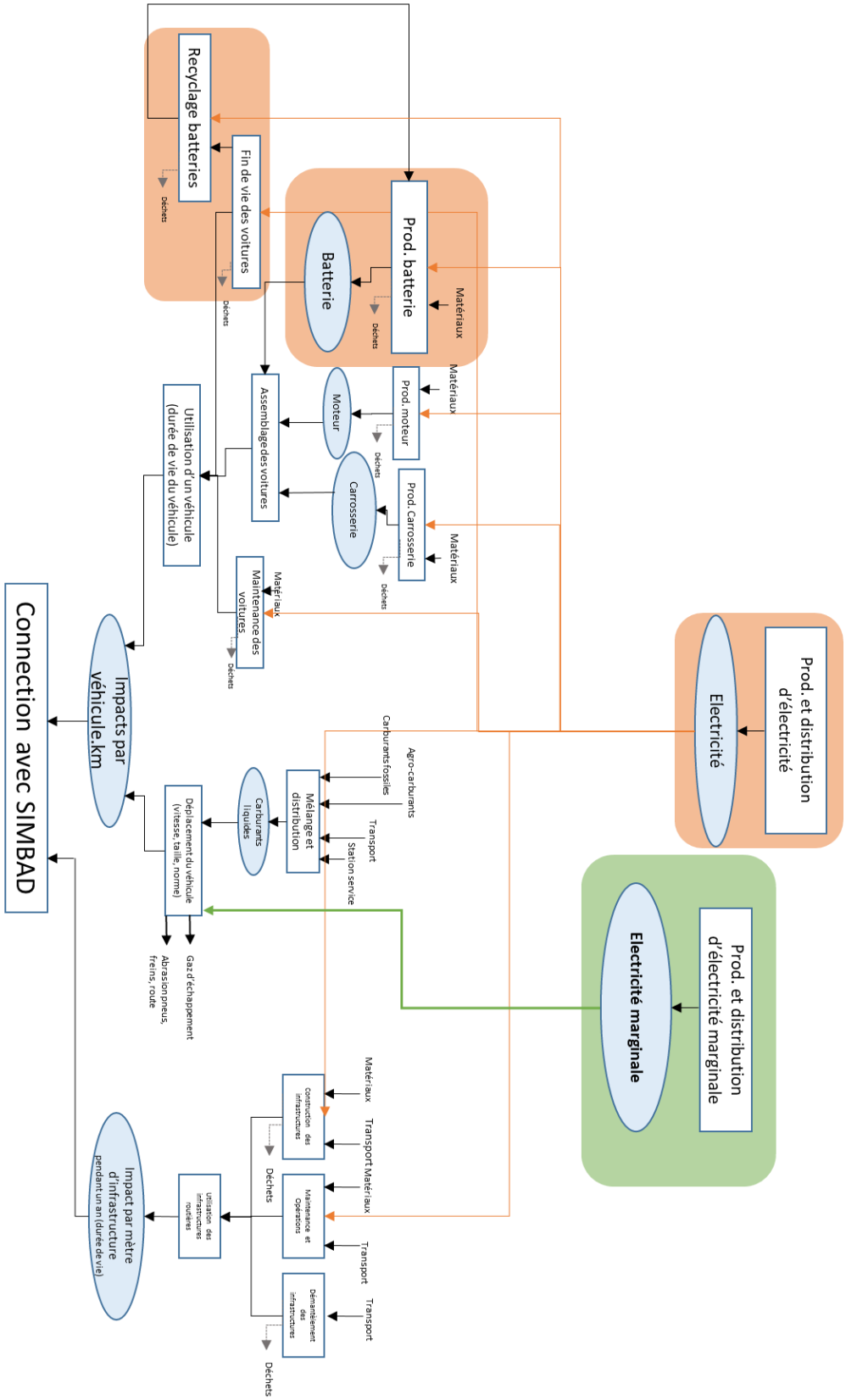
La question de la prospective de l'électrification du parc automobile ne se limite pas à la production des véhicules. L'approvisionnement en énergie constitue une composante importante. En fonction du parc de véhicules électriques dans le parc automobile la demande d'électricité va être plus ou moins impactée. Les fortes variations de la demande induites par l'augmentation des besoins en électricité et la variabilité dans le temps des puissances appelées (du fait des mises en charge, souvent simultanées, des véhicules) vont avoir des impacts sur l'offre électrique. La gestion du réseau électrique devra s'adapter à ces nouvelles contraintes. Des centrales devront être mises en route ou arrêtées. Dans le cas de faible intégration de véhicules électriques, le mix électrique français utilisé pour les autres processus peut être conservé. Dans le cas d'une forte intégration des véhicules, l'utilisation de mix électriques marginaux a été adoptée afin de prendre en compte l'approvisionnement en électricité des véhicules électriques.

Pour quantifier les impacts de cet approvisionnement marginal, l'ensemble des processus de production électrique ont été importés d'Ecoinvent afin de créer n'importe quelle combinaison de production électrique possible. L'étude de Lund *et al.* (2010) présente les impacts de différents parcs de production électrique et montre l'intérêt de bien choisir son mix énergétique. Dans cette même étude, les auteurs préconisent l'usage et la modélisation du système énergétique pour estimer le parc de production. Dans cette thèse, une approche par scénarios a été privilégiée. Les modifications apportées à l'approvisionnement d'électricité pour les véhicules sont schématisées en vert dans la Figure III-23. Les impacts liés aux bornes de recharge ont été ignorés.

Les consommations et les émissions de polluants des véhicules électriques et hybrides sont présentes dans le logiciel Copert5. Un véhicule électrique consomme 0,2 kWh par kilomètre et n'émet directement que des particules liées aux abrasions des freins, des pneus et de la route. Le véhicule hybride non-rechargeable ne consomme pas d'électricité, mais possède des profils de consommation et d'émissions en fonction de la vitesse de circulation.

Figure III-23 : Schéma du système d'ACV dans le cas d'une électrification du parc automobile

(en rouge les processus rajoutés pour la production des véhicules et en vert les processus liés à l'approvisionnement en électricité des véhicules)



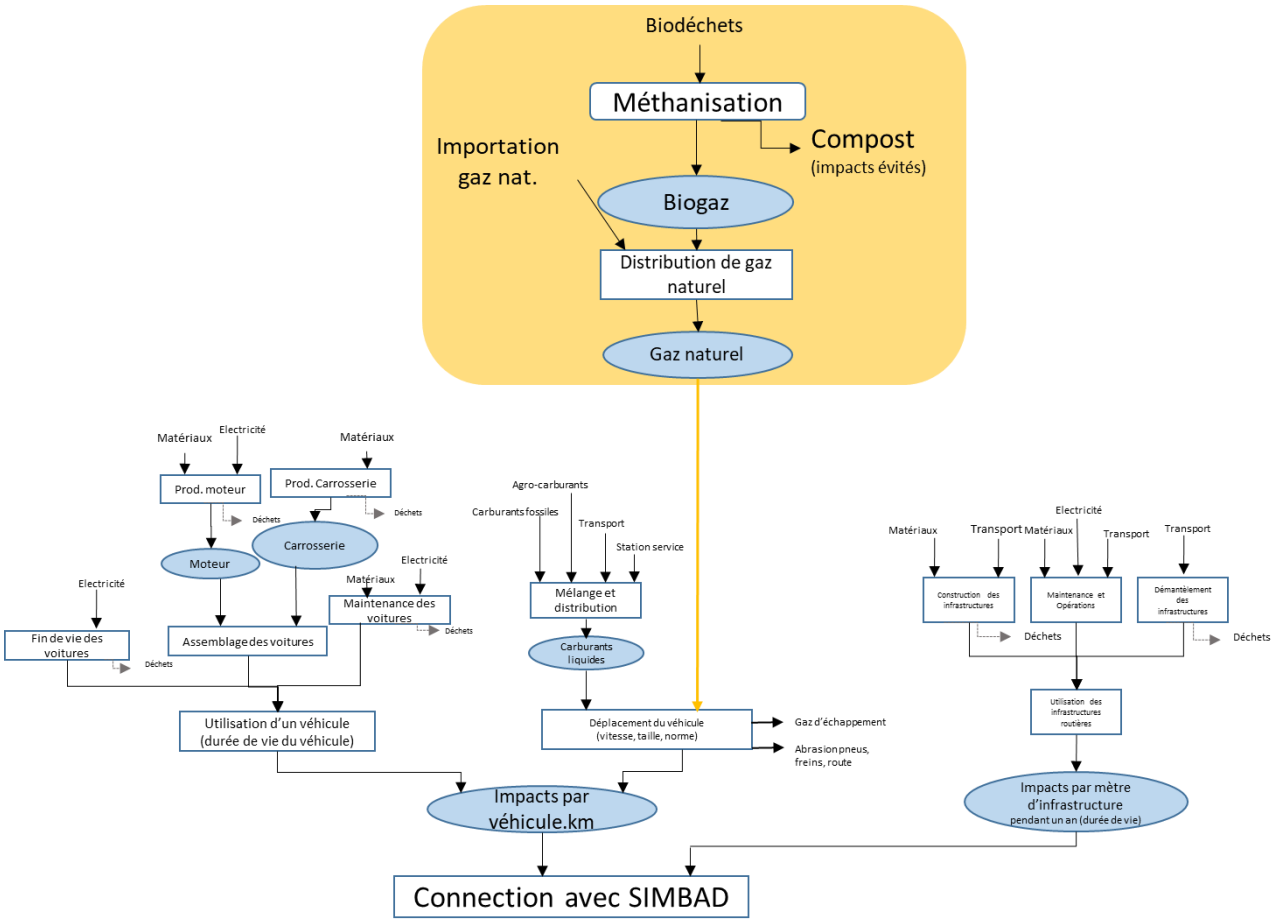
Source : traitement auteur

3.3.2. Prospective associée à la motorisation au gaz naturel :

Pour l'intégration de gaz naturel dans le parc automobile, l'approche est plus simple concernant les impacts associés à la fabrication du véhicule, car un véhicule à gaz naturel peut-être assimilé à un véhicule essence de taille medium (1 400 kg). Les profils de consommation et d'émissions sont fournis par Copert 5 et ils fournissent la quantité de gaz consommés.

De façon comparable à l'approvisionnement en électricité pour les véhicules électriques, l'approvisionnement en gaz est intégré dans le système pour les véhicules à gaz naturel. Les différents processus utilisés pour l'approvisionnement en gaz sont importés depuis Ecoinvent afin de pouvoir créer différents parcs de production de gaz naturel. Deux moyens de production de gaz sont modélisés : l'importation de gaz naturel (basée sur les ressources et technologies actuelles d'exploitation) et la production de biogaz à partir de matières organiques (traitement anaérobique du fumier, des biodéchets, des boues d'épuration et des huiles de cuisson usagées). La distribution du gaz par le réseau urbain est intégrée dans le système. La Figure III-24 présente le système utilisé dans le cas d'un développement de véhicules à gaz naturel.

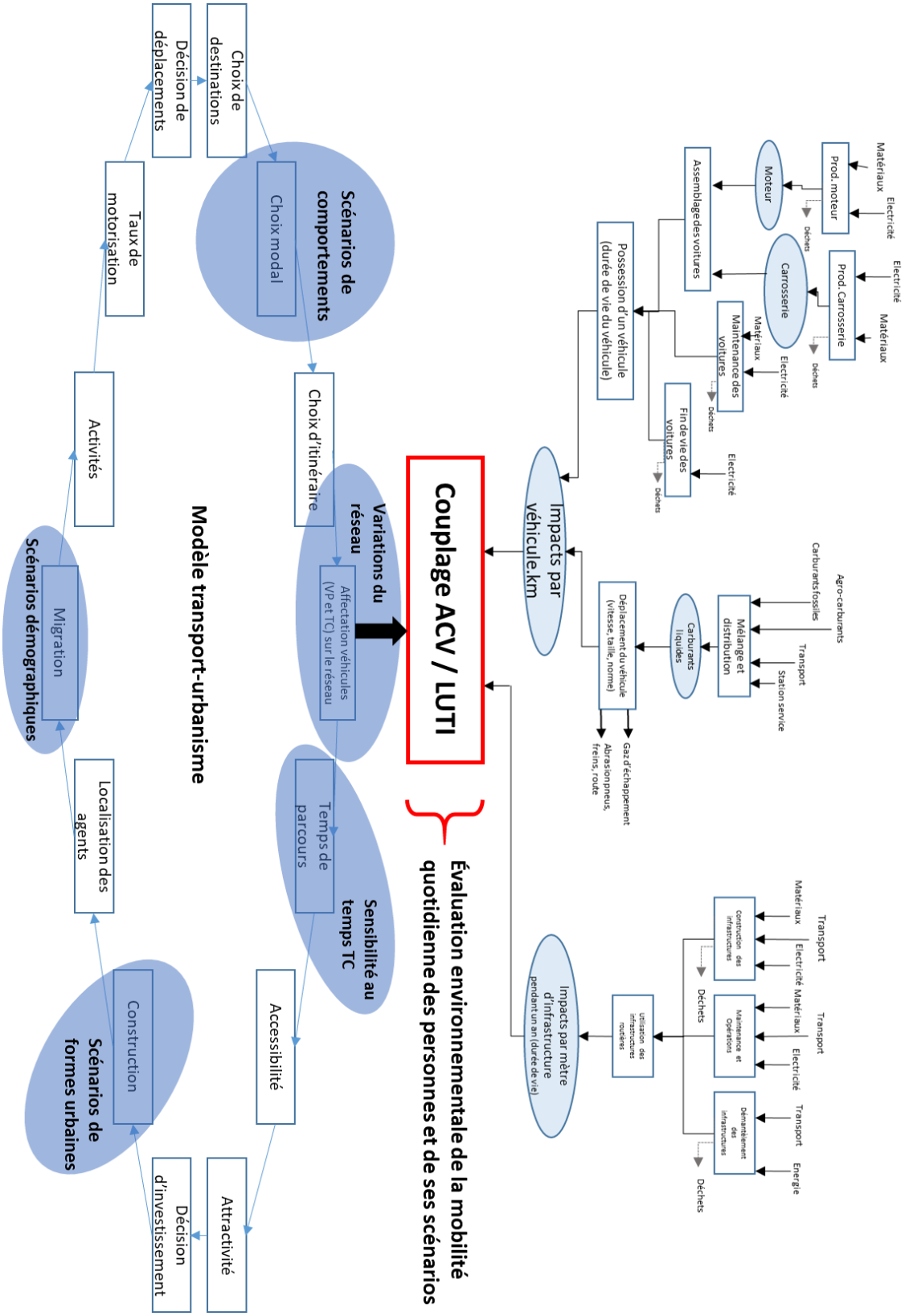
Figure III-24 : Schéma du système d'ACV de las cas d'une introduction de véhicules à gaz naturel



Source : traitement auteur

Le système utilisé pour l'ACV avec les élargissements présentés précédemment permet de simuler différents scénarios technologiques pour la mobilité quotidienne de personnes : électrification des véhicules, introduction des véhicules à gaz, rajeunissement du parc automobile et modification de la taille des véhicules. Ces scénarios technologiques se rajoutent aux scénarios de forme urbaine, de réseau, de comportements et de développement démographique réalisables via le modèle LUTI SIMBAD. Nous faisons l'hypothèse que les scénarios non technologiques n'ont pas de conséquence sur les compositions de parcs automobiles des 9 classes de ménages modélisées par SIMBAD. La Figure III-25 propose une vision globale de la méthodologie que nous proposons de couplage entre modèle LUTI et ACV.

Figure III-25 Schéma global du système d'ACV et du système transport-urbanisme



Source : traitement auteur

3.4. Méthode d'évaluation des impacts environnementaux

Après avoir décrit le système technologique modélisé et fait l'inventaire des différents processus mis en œuvre, la méthode d'évaluation des impacts environnementaux doit être déterminée. Plusieurs méthodes d'évaluation existent et sont couramment utilisées pour réaliser des ACV (ReCiPe, TRACI, IMPACT, CML). L'Union Européenne propose une harmonisation de ces différentes méthodes d'évaluation avec la publication d'un manuel, ILCD (The International Reference Life Cycle Data System Handbook). Dans le cadre de cette thèse, le cadre d'évaluation doit être construit de façon à répondre aux exigences formulées précédemment (1.2.3) : intégrer les spécificités territoriales, permettre une analyse spatialisée des impacts, être multicritère et fournir des clés de répartition d'impacts variés pour analyser les performances au niveau des technologies, des ménages et des territoires.

3.4.1. Des entretiens pour construire le tableau de bord

Dans le but de prendre en compte les spécificités territoriales, nous avons souhaité intégrer dans la conception du tableau de bord que nous proposons les points de vue des différents experts locaux travaillant sur la problématique des transports à Lyon. Pour ce faire, des entretiens semi-directifs ont été menés auprès de différents acteurs caractérisés par des échelles spatiales différentes pour leurs réflexions et leurs actions (de la commune au niveau national) et des positions différentes dans la chaine de décision et d'action (recherche, bureau d'étude, collectivité, politique). Quinze entretiens ont été menés, pendant la deuxième moitié de l'année 2017, en utilisant une grille d'entretien en quatre parties (Identification/ Diagnostic/ Prospective/ Action) orientée par deux questions générales (cf. Annexe 3 et Annexe 4) :

- Quel est l'état de connaissances et d'usage des indicateurs environnementaux de la mobilité quotidienne de personnes ?
- Quelles sont les attentes des acteurs en matière d'indicateurs environnementaux de la mobilité pour les années à venir ?

Dans l'ensemble, l'usage des indicateurs environnementaux varie beaucoup en fonction de l'échelle spatiale de l'acteur et de son institution. Les acteurs des niveaux communaux sont plus proches du terrain et des populations, et plus confrontés à des indicateurs d'action et de mise en œuvre qui répondent à des objectifs de court terme. « *Tu l'attrapes comment l'air ? Tu ne l'attrapes pas par un objet ou une politique particulière, c'est multi-truc* » (entretien avec Mme VESSILLER, vice-présidente de la Métropole de Lyon, 2017). « *Les EPCI sont des collectivités techniques et les communes des collectivités de terrain* » (entretien avec Mme DO KHAC, chargée de missions Développement Durable à la ville de Villeurbanne, 2017). Les enjeux environnementaux principaux repérés sont liés à la santé et à la pollution locale. Les échelles spatiales supérieures sont aussi attentives aux enjeux de pollution locale avec des analyses plus agrégées. Les principaux enjeux environnementaux mis en avant sont le réchauffement climatique et les ressources énergétiques. Le suivi de ces deux indicateurs et du niveau de pollution atmosphérique semble guidé par la mise en place des PCAET (Plan Climat Air Énergie Territoriale) au niveau de la Région et de la Métropole.

Les entretiens ont fait ressortir la place importante de la pollution locale pour l'ensemble des acteurs, certains faisant remarquer que cette prise de conscience de la qualité de l'air a été tardive malgré des niveaux de pollution élevés depuis de nombreuses années. La proximité temporelle des dommages liés à la pollution atmosphérique est, pour quelques acteurs, la raison de cette prise de conscience, d'autres faisant plutôt référence aux exigences sanitaires faites par l'OMS en matière de concentration de polluants. « *La question des pics de pollution est en train de monter en niveau, […], et ça montrera plus que la question du CO_2, parce que la question du CO_2, c'est tellement lointain* » (entretien avec Mr CROZET, professeur émérite du LAET, 2017). La connaissance et l'usage de cet enjeu sont hétérogènes selon les acteurs interviewés. Certains acteurs de services techniques possèdent des connaissances avancées sur les effets des différents polluants alors que d'autres acteurs privilégient l'usage de l'indicateur synthétique « indice ATMO ». Pour les acteurs de niveau local (municipal, Grand Lyon), les enjeux de pollution locale sont à connecter avec la présence de population afin d'aborder les enjeux de santé environnementale.

D'autres indicateurs et enjeux environnementaux ont été mentionnés au cours des entretiens, notamment la problématique du bruit le long des axes routiers. Principalement mentionné par des acteurs de l'agglomération lyonnaise, cet enjeu se résume par la gestion des « points noirs » de l'agglomération qui présentent des niveaux de bruits importants.

En ville, l'imperméabilité des sols par les infrastructures de transports a été mentionnée comme une nouvelle problématique à intégrer lors des projets d'infrastructures. L'enjeu étant lié au traitement des eaux de ruissellement qui nécessite de grosses centrales de traitement. L'exemple du renouvellement de la rue Garibaldi, où des bassins de rétention sous la chaussée ont été installés, a été avancé pour montrer la prise en compte de cet enjeu.

Des indicateurs d'utilisation d'énergie sont utilisés différemment en fonction du type de territoire et d'acteur concerné. Certains acteurs présentent la consommation énergétique comme un indicateur plus utile pour les territoires ruraux afin, notamment, de suivre la vulnérabilité énergétique de ces territoires.

Aucun entretien réalisé ne fait réellement mention des enjeux de biodiversité liés à la mobilité des personnes. Un acteur fait mention de l'effet de coupure lié aux infrastructures linéaires comme un enjeu environnemental, mais surtout comme un enjeu social pour une agglomération telle que Lyon avec le périphérique.

Une partie des entretiens réalisés, notamment auprès d'acteurs travaillant au sein de Villeurbanne, du Grand Lyon et du CEREMA, soulève l'intérêt croissant de croiser les enjeux environnementaux et sociaux. « *Il faut lier ces indicateurs environnementaux avec les indicateurs sociaux* » (entretien avec Mme VESSILLER, 2017). Ces enjeux s'expriment par les inégalités environnementales et sociales qui ont lieu sur le territoire ou qui sont à prévoir si certaines mesures de mobilité sont mises en place. Ces propos ont été illustrés notamment par deux exemples : l'exclusion de certaines personnes dans le cas de la création d'une zone à faibles émissions dans le centre et le report de trafic et d'émission de polluants vers le périphérique Est de Lyon dans le cas de la modification de l'autoroute A7 passant dans Lyon.

Ces entretiens ont permis de faire émerger un certain nombre de menaces et d'opportunités qui viendraient modifier l'utilisation d'indicateurs environnementaux.

- Une menace de l'émergence de trop d'indicateurs qui rendrait la prise de décision plus complexe avec un système de valeur plus fort.
- L'utilisation d'indicateurs pérennes sur le long terme permet d'exploiter des tendances porteuses de plus d'information cognitive qu'un indicateur ponctuel. « *L'impact des actions politiques, il se voit dans le temps lointain* » (entretien avec Mr VIENOT, chargé de mission à Auvergne–Rhône-Alpes Énergie Environnement, 2017).

- L'enrichissement des données à disposition devrait permettre de faire plus de liens entre les impacts environnementaux et des caractéristiques sociales ou des comportements de mobilité.
- L'utilisation de plusieurs indicateurs est renforcée par le développement de méthodes de plus en plus intégrées, par exemple pour les PCAET.
- Les indicateurs environnementaux pourraient perdre leurs intérêts d'aide à la décision si les pouvoirs publics perdent leur pouvoir de maitrise sur les questions environnementales de la mobilité. Cette perte de pouvoir viendrait des services privés de mobilité qui deviennent de plus en plus importants alors que les transports publics restent fragiles économiquement.

En conclusion, les entretiens réalisés présentent un panel de problématiques et d'enjeux environnementaux auxquels sont soumis les acteurs du territoire lyonnais. Dans la cadre d'une ACV, certaines des problématiques présentées ne peuvent pas être intégrées dans la méthode d'évaluation, notamment pour le bruit. En revanche, l'utilisation d'un modèle transport-urbanisme désagrégé tel que SIMBAD fournit des éléments spatiaux pour explorer certains des aspects présentés par les acteurs lors des entretiens. Le lien entre les impacts environnementaux et le niveau social des ménages peut être réalisé en considérant les variables présentes pour les ménages de l'aire urbaine ainsi que leur localisation. Le choix d'une approche spatialisée est renforcé par les entretiens qui montrent l'importance de la pollution locale pour les territoires urbains.

3.4.2. Méthode d'évaluation des impacts retenue

Les impacts environnementaux retenus pour la réalisation de cette ACV recouvrent trois grands domaines, le réchauffement climatique, la pollution atmosphérique et l'utilisation de ressources, couvrant ainsi les trois principales problématiques recensées dans les entretiens (le climat, la qualité de l'air et les ressources énergétiques). Pour la mobilité quotidienne de personnes d'une aire urbaine, les dommages sur les milieux naturels ne sont pas intégrés à la méthode d'évaluation. Les indicateurs retenus pour l'évaluation sont des indicateurs d'impacts, ou « midpoint indicators », afin de rendre compte de valeur physique et de pouvoir les rattacher à des objectifs réglementaires ou de suivi des collectivités (cf. Chap II 3.1.3). Neuf indicateurs

ont été retenus pour illustrer les différents impacts de la mobilité sur l'environnement, le Tableau III-10 présente les différents indicateurs, la méthode d'évaluation et l'unité qui lui sont associés (François *et al.*, 2017).

Tableau III-10 : Catégories d'impacts environnementaux considérées et méthodes d'évaluation appliquées

Catégories d'impact	*Méthode (midpoint)*	*Unité*
Réchauffement climatique	ILCD/IPPC 2007 (IPCC, 2007)	kg CO_2 équivalent
Énergie non-renouvelable (hors-nucléaire) *Énergie nucléaire* *Énergie renouvelable*	Cumulative Energy Demand (Hischier *et al.*, 2010)	kWh
Particules en suspension	ILCD 2011 (European Commission/Joint Research Centre, 2011)	kg PM2,5 équivalent
Ozone troposphérique	ReCiPe/ILCD (Goedkoop *et al.*, 2009 ; van Zelm *et al.*, 2008)	kg COVNM équivalent
Acidification terrestre	ReCiPe (Goedkoop *et al.*, 2009 ; van Zelm *et al.*, 2008)	kg SO_2 équivalent
Occupation du sol	ReCiPe (Goedkoop *et al.*, 2009)	m².an
Ressources métalliques	ReCiPe (Goedkoop *et al.*, 2009)	kg de Fer équivalent

Source : traitement auteur

Parmi les sept méthodes de caractérisation retenues pour les différentes catégories d'impacts, trois sont directement recommandées par le guide ILCD pour les indicateurs d'impact (European Commission/Joint Research Centre, 2011) : le réchauffement climatique, les particules en suspension et l'ozone troposphérique. Deux autres méthodes sont mentionnées comme acceptables dans le guide ILCD avec des faiblesses : la méthode d'acidification terrestre et la méthode d'occupation du sol. Enfin, les méthodes de caractérisation des ressources métalliques et énergétiques ne sont pas mentionnées dans le guide, mais la caractérisation de la déplétion des ressources reste encore une notion peu claire (European Commission/Joint Research Centre, 2011). Le choix a été fait d'utiliser des méthodes spécifiques à la ressource métallique et à l'énergie.

La méthode SIMBAD-ACV ne propose pas de pondération ni d'agrégation des différents indicateurs pour obtenir un score unique (cf. Chap II 3.1.3). La normalisation des indicateurs par des valeurs de référence n'est pas mise en place dans l'évaluation pour des raisons à la fois scientifiques et territoriales. Pour une évaluation territoriale et prospective, l'usage de valeurs normatives construites à un niveau international est peu intéressant, une approche relative, en comparant les différentes alternatives a été privilégiée dans cette thèse (Cucurachi *et al.*, 2017).

3.4.3. Exposition de la population aux NOx

Les méthodes d'évaluation pour l'ACV présentées précédemment ne permettent généralement pas de spatialiser les différents impacts sur le territoire. Des travaux récents proposent de spatialiser les impacts émis au long du cycle de vie pour des thèmes environnementaux pour lesquels la problématique spatiale et importante (par exemple, l'eutrophisation des eaux (Aissani *et al.*, 2013) et l'acidification terrestre (Bjørn & Hauschild, 2015)). L'échelle de ces travaux sont régionale, pour (Bjørn & Hauschild, 2015) le globe est découpé en 99 515 unités spatiales. Compte tenu de la résolution spatiale encore plus fine nécessaire pour représenter les effets des émissions de polluants locaux sur la santé, nous proposons ici une méthode d'analyse spatiale avec une résolution spatiale fine pour les émissions de polluants et pour la localisation de la population. L'aspect temporel n'a pas été intégré dans notre méthode, même s'il est important pour l'exposition aux polluants locaux avec des variabilités horaires pour les émissions et pour la localisation de la population en fonction de leur activité (Hatzopoulou *et al.*, 2011).

La méthode que nous proposons consiste à croiser les niveaux de pollution liés à la mobilité avec la densité de population du territoire. En raison de la complexité des phénomènes de dispersion et de transformation des polluants dans l'air (Chap I 1.3.3), la méthode développée considère des densités d'émissions de polluants. Cette hypothèse de travail est discutable pour certains polluants locaux tels que l'ozone ou les particules, pour lesquels les phénomènes de dispersion et de transformation ont une forte influence sur les concentrations, mais elle permet d'explorer des potentiels en termes d'exposition et d'ouvrir des perspectives de développement, comme pour l'étude de Loiseau (2014). Notre méthode croisant émissions et exposition a donc été réalisée pour un seul polluant émis pour la mobilité quotidienne des personnes, les oxydes d'azote (NOx), en raison de la forte contribution des transports routiers

aux émissions (en 2007, 74% des émissions de NOx du Grand-Lyon sont proviennent des transports (DREAL Rhône-Alpes, 2014)). Ainsi, pour cette analyse, seule la phase d'utilisation des véhicules (voitures et transports en commun) est prise en compte, puisque les autres phases d'émissions (fabrication des carburants, des véhicules et des infrastructures) sont à la fois moins contributrices aux émissions de NOx dans les zones urbaines et surtout parce qu'il est très compliqué de spatialiser les émissions de ces trois phases du cycle de vie des transports.

À partir du calcul d'émissions réalisé pour chaque tronçon grâce à SIMBAD couplé avec les équations d'émissions issues de Copert 5, il est possible de localiser les émissions directes de NOx sur l'ensemble de l'aire urbaine de Lyon. Les données présentes dans le modèle SIMBAD permettent de localiser l'ensemble de la population de l'aire urbaine de Lyon dans leurs différents IRIS de résidences. Les surfaces et les formes des IRIS sont hétérogènes, les IRIS de périphérie sont plus grands, et parfois délimités par les tracés des routes. Notre méthode mise en place utilise un découpage en carreaux uniformes afin de limiter les problèmes de MAUP (*Modifiable Areal Unit Problem*), notamment pour les IRIS délimités par une autoroute fortement émettrice. La taille de carreaux utilisée pour segmenter les territoires est de 250 m x 250 m pour l'ensemble de l'aire urbaine.

Pour chaque carreau, les émissions de NOx sont obtenues en sommant l'ensemble des émissions des tronçons qui le traverse, attribuées au prorata des longueurs des tronçons inclus dans le carreau. Afin d'obtenir la densité de population au niveau des carreaux qui sont plus fins que les IRIS, la base géographique BDTopo a été utilisée pour répartir la population à l'intérieur des IRIS. Cette base spatialise l'ensemble des bâtiments dans les IRIS permettant de répartir la population des IRIS dans les bâtiments. En sommant la population des bâtiments présents dans chaque carreau, on obtient la densité de population. Les niveaux de densités de population et d'émissions de NOx sont répartis par quintiles puis un score de 0 à 6 est attribué aux carreaux en fonction des deux niveaux de population et d'émissions (Tableau III-11).

Tableau III-11 : Matrice des scores d'exposition en fonction des niveaux de densités de population et d'émissions de NOx

Densité de population \ Densité d'émissions de NOx	Pas d'émissions	1er quintile	2e quintile	3e quintile	4e quintile	5e quintile
Pas de population	0	0	0	0	0	0
1er quintile	0	1	1	1	2	3
2ème quintile	0	1	1	2	3	4
3e quintile	0	1	2	3	4	5
4e quintile	0	2	3	4	5	5
5e quintile	0	3	4	5	5	6

Source : traitement auteur

Dans le but de comparer les différentes alternatives, les niveaux de population et d'émissions sont supposés fixes et déterminés à partir des quintiles du scénario de référence. Pour chaque scénario, une moyenne pondérée du score d'exposition est calculée à partir de la population de chaque carreau. Cette moyenne peut être déclinée pour le centre de l'agglomération, le Grand Lyon et l'ensemble de l'aire urbaine. L'analyse de l'exposition peut aussi croiser les niveaux de revenu des ménages pour quantifier les inégalités environnementales pour l'exposition aux polluants locaux liés à la mobilité quotidienne des personnes.

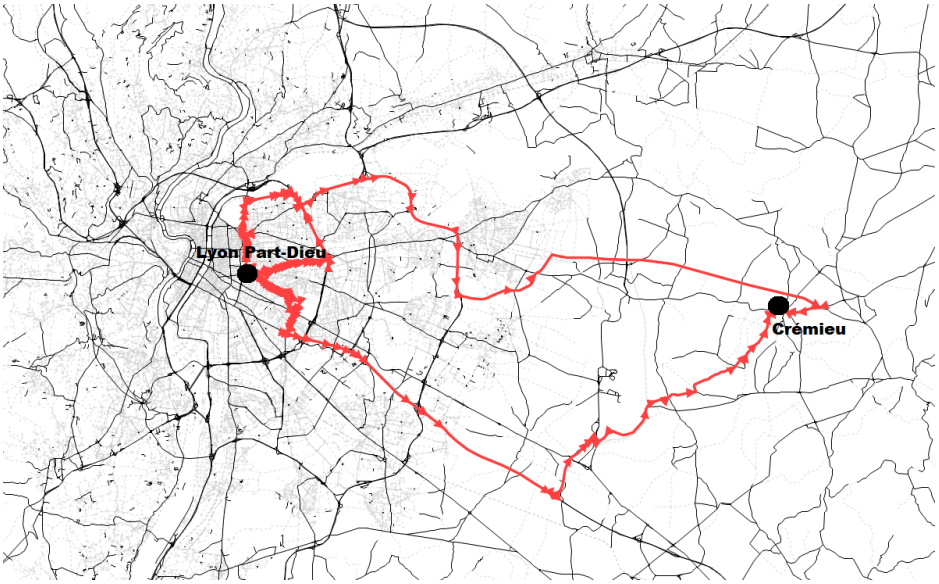
3.4.4. Allocation des impacts par ménages et par IRIS

Avec la méthodologie d'analyse présentée jusqu'à présent, les clés de répartition des impacts sont assez limitées. À ce stade, il est possible de répartir les impacts de trois manières, soit par phases du cycle de vie (Véhicules/Infrastructures/Carburants/Gaz d'échappement séparés en VP et TC), soit entre les neuf classes de ménages affectées sur le réseau, soit pour chaque tronçon. Mis à part pour la pollution locale, la localisation des émissions par tronçons n'a pas de grand intérêt, surtout pour une ACV. Nous proposons ici une méthode permettant de désagréger les impacts calculés au niveau des tronçons au niveau des ménages afin de réaliser par la suite différentes agrégations pour analyser des déterminants socio-économiques et spatiaux.

La méthode de désagrégation des impacts consiste à remonter une par une les étapes du modèle à quatre étapes du modèle LUTI. Pour cela, de nombreuses données du modèle SIMBAD sont nécessaires et le traitement mobilise des ressources informatiques importantes. Lors de la désagrégation, les informations relatives à la répartition des impacts par phases du cycle de vie de la mobilité ne sont pas conservées.

La première étape de la désagrégation reconstitue les couples origine-destination à partir de l'ensemble des tronçons du réseau. L'ensemble des chemins reliant deux IRIS est décrit dans le modèle d'affectation VISUM et les charges de véhicules et de passagers sont connues entre ces différents chemins. La Figure III-26 illustre les trois principaux chemins qui relient le quartier de Lyon Part-Dieu à la commune de Crémieu. Pour chaque chemin, ses impacts environnementaux associés sont obtenus en sommant l'ensemble des tronçons le constituant. Les impacts moyens entre deux IRIS en fonction de l'heure de la journée (HP ou HC), du mode de transport (VP ou TC) et de la classe de ménages sont déterminés en pondérant chaque chemin reliant les IRIS par sa charge de véhicules ou de passagers.

Figure III-26 : Représentation des trois principaux chemins entre le quartier de la Part-Dieu de Lyon et la commune de Crémieu



Source : sorties SIMBAD, traitement auteur

Pour continuer la désagrégation des impacts, les matrices de sorties de ménages produites par SIMBAD sont importées, car elles permettent de connaitre la répartition modale et horaire

des déplacements ainsi que la distribution des sorties de ménages de chaque IRIS vers les autres IRIS de l'aire urbaine. À ce niveau de la désagrégation, le motif de déplacement devient disponible, ce qui permet par exemple de distinguer les impacts liés aux sorties liées au travail avec celles liées aux achats, dont la distribution des déplacements et les choix modaux ne sont pas identiques. Les figures présentées en Annexe 5 illustrent la répartition des flux pour les trois modes principaux (VP, TC et modes doux) des sorties de ménages de Vaulx-en-Velin pour le motif travail entre les 20 communautés de communes présentes sur l'aire urbaine. À partir de ces connaissances sur la répartition des sorties entre les différents modes et les différents IRIS, les impacts moyens d'une sortie d'IRIS sont connus en fonction du niveau de revenu du ménage et du motif de déplacement. En utilisant la matrice inverse, les impacts moyens vers une destination sont quantifiés afin d'analyser les IRIS attractifs qui génèrent des déplacements et des externalités environnementales.

La dernière étape de la désagrégation utilise la base des ménages simulés dans le modèle SIMBAD pour lesquels un nombre de sorties par motifs a été généré. En utilisant le niveau de revenu et l'IRIS de localisation du ménage ainsi que son nombre de sorties par motifs, la quantité d'impacts environnementaux est calculée au niveau le plus fin du modèle LUTI SIMBAD. Il est alors possible d'agréger les impacts des ménages par IRIS afin de réaliser des analyses spatiales.

La méthode de désagrégation effectuée travaille sur la base de moyennes statistiques réalisées pour les différents IRIS, motifs et classes de ménages manipulés. L'analyse des impacts environnementaux n'est donc pas pertinente à l'échelle d'un ménage. Cependant, la spécificité des ménages non motorisés, qui ne peuvent pas se déplacer en tant que conducteur, a été intégrée à la procédure de désagrégation. Cette même méthode de désagrégation a été réalisée pour les distances parcourues et les temps passés en transport afin de mesurer les niveaux de mobilité des différents ménages.

Conclusion de la partie 3 :

La cadre de l'ACV et la méthode d'évaluation mise en œuvre pour la mobilité quotidienne de personnes couvrent un système large incluant le cycle de vie des véhicules, celui des carburants ainsi que celui des infrastructures. De plus, les frontières du système ont été élargies afin de prendre en compte des éléments prospectifs qui n'étaient pas inclus initialement dans le système, telles que la production des batteries ou l'élaboration de mix énergétiques prospectifs. Le passage des données d'usage du système de transport du modèle SIMBAD à l'utilisation des processus technologiques du système d'ACV considéré a nécessité la représentation de parcs de véhicules roulants qui caractérisent les technologies de véhicules utilisées par les différentes catégories de ménages du modèle (cf. 3.1.2).

Au même titre que les données d'inventaires, les parcs utilisés dans le système ont été territorialisés afin de représenter les spécificités de l'aire urbaine de Lyon. La méthode d'évaluation a été adaptée pour répondre aux usages et connaissances des acteurs du territoire lyonnais sur les enjeux environnementaux de la mobilité quotidienne de personnes. La méthode développée inclut neuf indicateurs environnementaux qui couvrent les enjeux de réchauffement climatique, de pollutions atmosphériques et d'utilisation de ressources naturelles. En complément de l'approche des méthodes de caractérisation utilisées pour les neuf indicateurs liés à l'ACV, une méthode d'évaluation spatiale a été mise en œuvre afin d'estimer un niveau d'exposition de la population à la pollution locale.

En dernier lieu, un module de désagrégation des impacts environnementaux a été construit en utilisant à la fois les résultats de l'ACV et les données du modèle transport-urbanisme. Ce module permet d'estimer les responsabilités d'émissions au niveau le plus fin du modèle SIMBAD, c'est-à-dire les ménages, afin de réaliser ensuite différentes agrégations pour mettre en relation les impacts environnementaux avec les variables socio-économiques et spatiales des ménages et des IRIS.

Synthèse du chapitre III :

Le chapitre 1 a permis de présenter les principaux enjeux environnementaux des transports des personnes et les mécanismes urbains animant la mobilité quotidienne des personnes. Le deuxième chapitre s'est interrogé sur la démarche d'Évaluation Environnementale Stratégique appliquée à la mobilité quotidienne proposant ensuite une approche quantitative croisant la modélisation transport-urbanisme et l'Analyse de Cycle de Vie. Ce chapitre méthodologique présente donc l'élaboration d'un outil quantitatif, SIMBAD-ACV, qui servira, dans les chapitres suivants, à répondre à la problématique posée et à valider les hypothèses formulées :

Hypothèse principale : *Le couplage de l'ACV et d'un modèle transport-urbanisme permet de représenter les principaux mécanismes urbains et technologiques ainsi que les enjeux environnementaux de la mobilité quotidienne des personnes actuelle et à venir d'une Aire Urbaine.*

Hypothèse 1bis : *L'utilisation de l'ACV apporte une vision multicritère et systémique nécessaire pour les enjeux actuels et futurs de la mobilité quotidienne des personnes.*

Hypothèse 2bis : *Le rôle central du système urbain sur la mobilité quotidienne de personnes nous conduit à utiliser un modèle transport-urbanisme pour l'évaluation environnementale de celle-ci.*

La méthode générale développée dans cette thèse repose sur le couplage entre le modèle LUTI SIMBAD et une ACV. Le premier fournit les flux de véhicules et de passagers associés à la mobilité quotidienne des personnes. Ces flux sont ensuite transposés en utilisation de technologies, par le biais des parcs de véhicules, pour pouvoir être utilisés dans l'ACV des transports. Les résultats sont par la suite spatialisés pour permettre l'analyse désagrégée des impacts environnementaux associés à la mobilité des personnes.

SIMBAD représente la mobilité quotidienne pour l'aire urbaine de Lyon, telle que définie en 1999. Ce choix permet de disposer d'un modèle LUTI, développé depuis 2005, appliqué sur un territoire suffisamment étendu pour avoir un intérêt stratégique. Les diverses interactions transport-urbanismes du modèle sont prises en compte de façon quasi-dynamique afin de considérer leur temporalité. De plus, SIMBAD représente relativement finement les

composantes de la mobilité quotidienne. En effet, les flux de déplacements sont affectés sur les réseaux de voiries et de transport en commun caractérisés par leurs conditions de circulation (vitesse et charge). L'approche désagrégée qui est déployée dans SIMBAD permet aussi de relier la mobilité aux ménages et aux territoires qui constituent l'aire urbaine de Lyon. Au final, le modèle SIMBAD répond à la majorité des exigences formulées pour une ÉES de la mobilité quotidienne puisqu'il couvre un territoire étendu, avec une finesse suffisante tout en intégrant les principaux mécanismes associés à la mobilité quotidienne.

Dans la construction de l'ACV, le système retenu intègre les processus liés à l'utilisation des véhicules, mais aussi ceux associés à la production des carburants, à la fabrication des véhicules et aux infrastructures. De plus, le système a été élargi afin d'incorporer des éléments prospectifs notamment sur la fabrication de véhicules électriques et sur la production d'énergies. Certaines spécificités du territoire d'étude ont été considérées dans la construction de l'ACV, notamment sur les types de véhicules considérés et sur les énergies.

Après avoir représenté les technologies du système de transport, la méthode d'évaluation a été conçue en lien avec les différents retours des entretiens réalisés au près d'acteurs du territoire. 9 indicateurs et méthodes de caractérisation ont été retenus afin d'évaluer les impacts de la mobilité sur le climat, sur la qualité de l'air et sur les ressources. De plus, les éléments descriptifs sur les ménages et les IRIS, fournis par SIMBAD, ont permis de désagréger les impacts environnementaux et ainsi fournir de nouvelles possibilités d'analyse. La méthode d'évaluation en ACV a été complétée par une approche spatialisée plus fine pour répondre à la problématique d'exposition de la population aux polluants locaux formulée lors des entretiens.

Pris dans son ensemble, la méthode SIMBAD-ACV offre la possibilité de représenter et d'évaluer la mobilité quotidienne des personnes en partant de l'usage du sol jusqu'à la spatialisation des impacts sur l'ensemble de l'aire urbaine de Lyon. À partir de l'approche désagrégée et multicritère construite, les différents enjeux environnementaux pourront être analysés pour différents types de ménages et de territoires. Les aspects systémique et stratégique, qui ont orienté la construction de l'outil, seront évalués dans les chapitres suivants avec la mise en œuvre de SIMBAD-ACV. Le chapitre IV illustrera la diversité d'analyse possible pour une situation de référence, alors que le chapitre V présentera l'aspect prospectif de la méthode avec différentes alternatives de mobilité quotidienne des personnes.

Chapitre IV : Enjeux multiples – lectures multiples

Contexte :

Afin de réaliser l'évaluation environnementale de la mobilité quotidienne des personnes d'une aire urbaine, la méthode SIMBAD-ACV a été mise en œuvre en associant un modèle d'interactions transport-urbanisme, SIMBAD, avec les outils et bases de données d'Analyse en Cycle de Vie (ACV). L'application de cette méthode sur l'aire urbaine de Lyon offre la possibilité d'éprouver les choix méthodologiques réalisés et ainsi de les valider. De plus, la richesse d'analyse permise par la méthode apporte des connaissances variées sur les impacts environnementaux de la mobilité quotidienne des habitants d'une aire urbaine, notamment sur l'usage des technologies de transport, l'influence des caractéristiques des ménages et la répartition spatiale des pratiques de mobilité et de leurs impacts.

Objectifs du chapitre :

- Réaliser l'évaluation environnementale de la mobilité quotidienne des habitants de l'aire urbaine de Lyon pour l'année 2009
- Afficher les intérêts majeurs de la méthodologie SIMBAD-ACV pour réaliser une évaluation environnementale stratégique de la mobilité
- Présenter les spécificités des systèmes de transport et de leurs technologies affectant leurs impacts environnementaux
- Montrer l'influence des caractéristiques socio-économiques des ménages sur les impacts environnementaux de leur mobilité
- Mettre en évidence l'intérêt majeur de prendre en considération les interactions transport-urbanisme en spatialisant les résultats environnementaux et en présentant l'importance des caractéristiques de forme urbaine
- Compléter l'analyse axée sur les émetteurs avec une approche centrée sur l'exposition aux polluants locaux

Plan du chapitre :

La première partie de ce chapitre présentera le fonctionnement du système de transport de l'aire urbaine de Lyon, avec le système de transport en commun et le système de transport individuel. L'analyse des technologies de transport permettra de réaliser les bilans environnementaux pour les divers indicateurs retenus. Cette partie s'intéressera aussi à l'usage des systèmes de transport et à comment cet usage influence les impacts environnementaux.

La deuxième partie se focalisera sur les différents types de ménages présents dans l'aire urbaine de Lyon et surtout les différents impacts environnementaux que leurs mobilités respectives génèrent. Ceci permettra de relier les impacts environnementaux aux activités quotidiennes réalisées par les ménages, mais aussi d'analyser les variabilités qui existent en fonction de caractéristiques socio-économiques des ménages.

Dans la dernière partie, la répartition spatiale des différents émetteurs sera réalisée afin de rendre compte de l'hétérogénéité du territoire lyonnais en matière de pratiques de mobilité et d'impacts environnementaux associés. Cette spatialisation sera utilisée pour évaluer différents découpages territoriaux, ici un découpage administratif et décisionnel, ainsi que pour relier les impacts aux différentes caractéristiques de forme urbaine disponibles dans la méthode SIMBAD-ACV.

Pour finir, la problématique de pollution locale sera abordée via l'outil d'exposition de la population aux NOx ajouté à la méthode globale. Cet outil cartographiera les zones de l'aire urbaine de Lyon avec un fort enjeu de santé publique et présentera les caractéristiques des populations à risque.

Partie 1 : Analyse du système de transport et de ses processus technologiques

L'utilisation de l'ACV couplée avec SIMBAD pour l'évaluation environnementale de la mobilité quotidienne des personnes implique, dans un premier temps, de représenter et d'estimer le fonctionnement du système de transport de l'aire urbaine de Lyon avant d'estimer les impacts environnementaux associés à son fonctionnement. La mobilité quotidienne des habitants de l'aire urbaine de Lyon a été décomposée dans notre travail entre trois modes de déplacements différents ayant chacun une autonomie organisationnelle et technologique vis-à-vis des deux autres.

Le système des transports individuels et motorisés comprend l'ensemble du réseau de voirie et l'ensemble des flux automobiles. Il intègre dans son fonctionnement les flux liés aux marchandises ainsi que ceux liés aux déplacements de voitures venant de l'extérieur du périmètre d'étude.

Le système de transport en commun représente l'ensemble des lignes du réseau de transport public urbain (TCL) et les lignes de TER. Le fonctionnement de ce système de transport est considéré comme constant et donc non contraint par l'usage qui en est fait en termes de saturation à l'intérieur des véhicules ou d'altération des vitesses commerciales.

Le dernier système de transport intègre l'ensemble des déplacements en modes doux réalisés pour la mobilité quotidienne de personnes. L'impact environnemental de ce système est considéré comme nul et les déplacements en modes doux entre chaque zone sont assimilés à des vols d'oiseau réalisés à pied à une vitesse de 4 km/h.

L'objectif de cette partie est d'estimer l'ensemble des impacts environnementaux associés à ces systèmes de transports et à leurs usages. Pour cela, les principales caractéristiques des systèmes de transport seront exposées avant de présenter leurs impacts environnementaux tout au long des cycles de vie des différentes technologies envisagées.

1.1. Analyse du sous-système de transport en commun et de ses usages

Différentes analyses environnementales de systèmes de transport en commun existent, dont la plupart s'intéressent à la mise en œuvre de nouvelles lignes dans le cadre d'EIE. L'originalité de l'analyse menée sur le système de transport en commun de Lyon est son périmètre, car ce dernier inclut la majorité des transports en commun présents dans l'aire urbaine de Lyon, la diversité de modes de transports (bus, trolley, tramway, métro, train, funiculaire). Par ailleurs, l'approche ACV qui est utilisée permet notamment d'inclure la fabrication des infrastructures et la fabrication du matériel roulant.

1.1.1. Parc roulant et places offertes

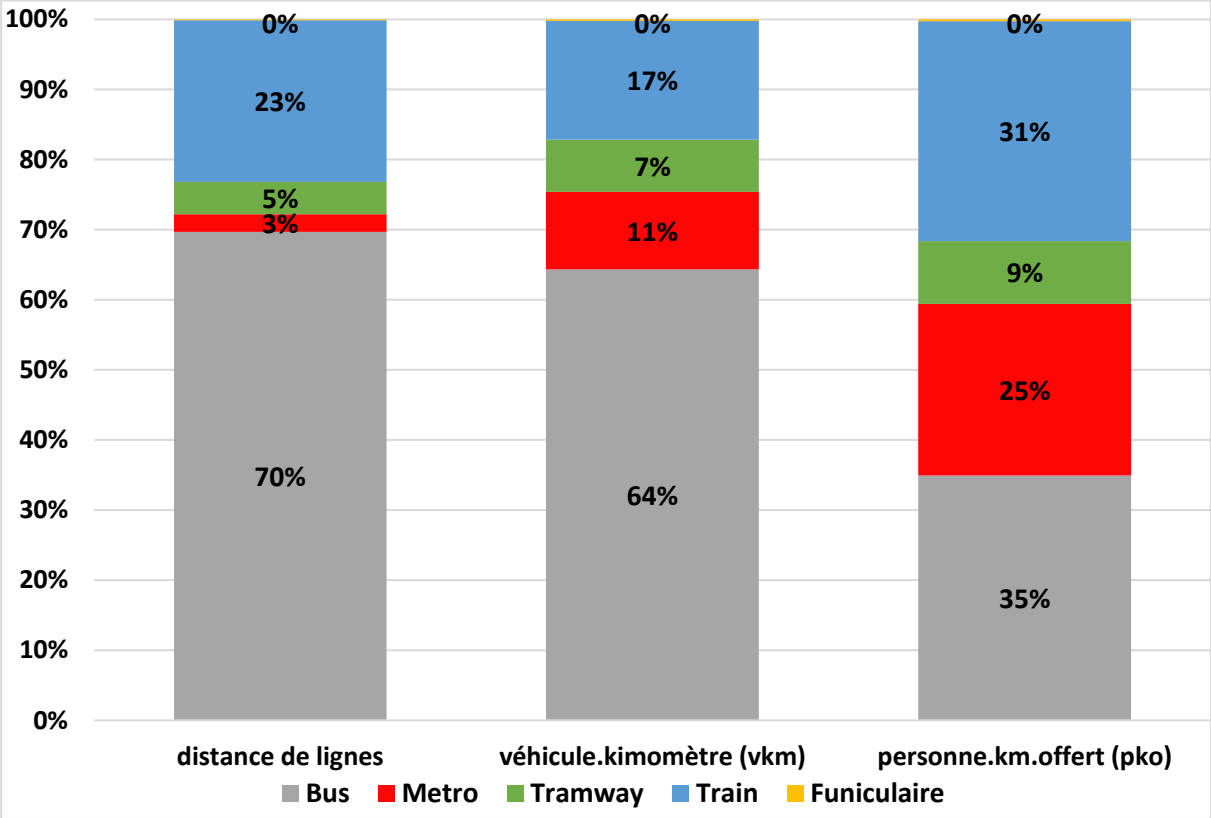
Afin d'analyser le système de transports en commun de l'aire urbaine de Lyon, il est nécessaire de décrire ses caractéristiques. En 2015, année de référence pour le réseau de transport en commun implémenté dans le modèle SIMBAD, 5 modes sont disponibles sur le réseau, les bus urbains (incluant des trolleybus), les métros, les tramways, les funiculaires et les trains régionaux (TER) (cf. Figure III-7). Chacun de ces modes possède des caractéristiques propres (vitesse, capacité, fréquence, tracés) qui vont avoir des influences sur l'évaluation environnementale.

La Figure IV-1 présente les répartitions des distances des lignes, des distances parcourues par les véhicules ainsi que des PKO (places offertes x kilomètres parcourus). La première mesure rend compte de l'étendue du réseau qui constitue environ 1 300 km de lignes en 2015. On constate que les bus urbains et les trains régionaux représentent la majorité des tracés du réseau de transports en commun, ce qui induit l'utilisation d'infrastructures, soit dédiées (pour le transport ferré ou les bus en site propre), soit partagées avec les autres modes routiers. En revanche, les fréquences des lignes de bus et de trains sont moins importantes que celles des modes « lourds urbains » (métro et tram) avec respectivement en moyenne 308 et 112 départs par lignes dans la journée pour le métro et le tram contre 51 et 64 pour les TER et les bus

urbains. Ainsi, les modes lourds urbains, qui ne parcourent que 7% du réseau de transport, représentent 18% des distances parcourues par les véhicules.

En multipliant les distances parcourues par la capacité de chacun des 5 modes disponibles dans le modèle lyonnais, il est possible d'estimer l'offre de transport en commun en passagers kilomètres offerts. Le nombre de places étant en moyenne plus important pour les modes lourds, respectivement 368, 200, 307[26], 200 et 90 places pour les métros, les trams, les trains régionaux, les funiculaires et les bus urbains. Les modes « lourds urbains » constituent un tiers de l'offre de transport en commun, quasiment à valeur égale avec les bus urbains et les trains régionaux (Figure IV-1). Le cinquième mode, le funiculaire, avec ses deux lignes, est insignifiant, du point de vue quantitatif, avec moins de 0,5% pour les trois mesures d'offre de transport.

Figure IV-1 : Répartition du système de transport en commun de 2015 entre les différents modes

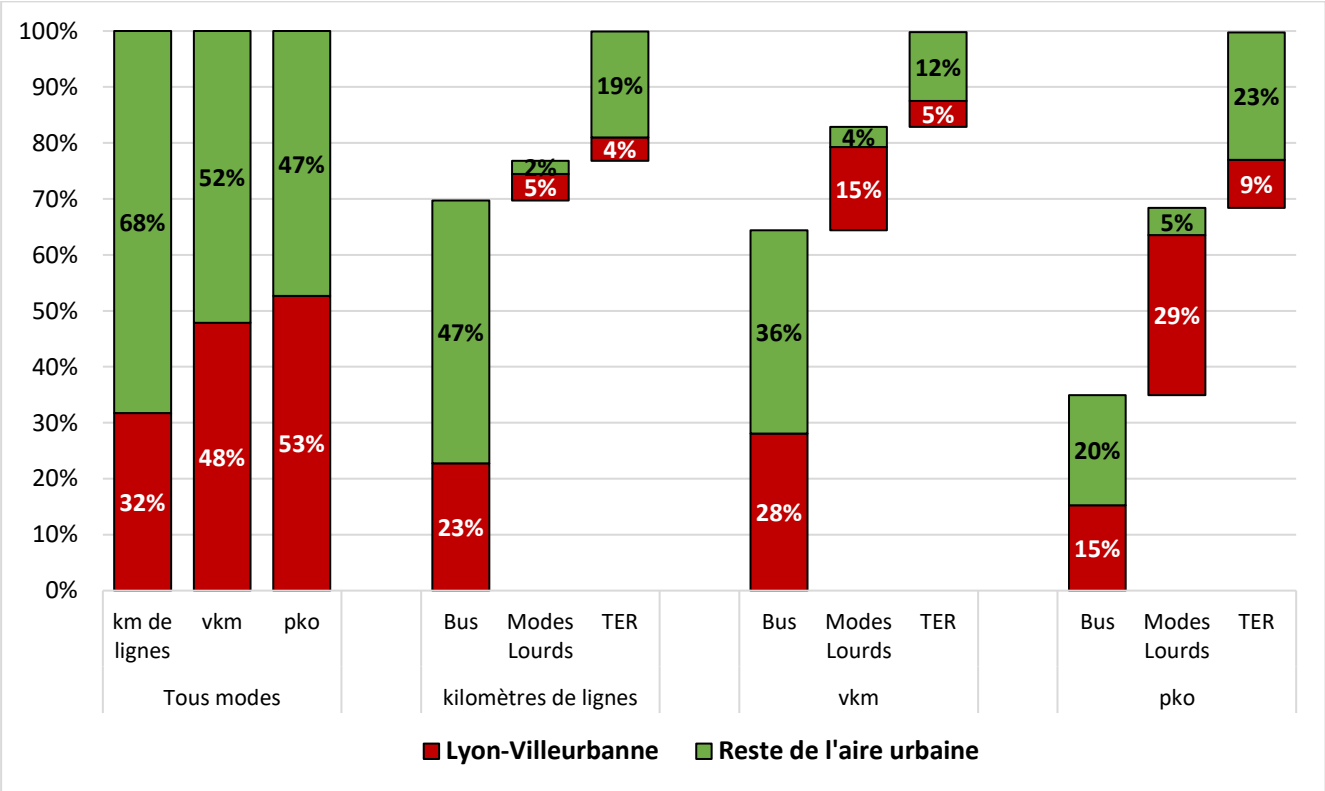


Source : traitement auteur, données SYTRAL

[26] Capacités des TER, ARAFER (2018)

La répartition spatiale de cette offre de transports couvre 44% de la surface de l'aire urbaine de Lyon de 1999, mais touche 88% de la population. Malgré l'étendue du réseau lyonnais, l'offre reste fortement concentrée dans le centre de Lyon et Villeurbanne. La Figure IV-2 illustre cette concentration de l'offre avec notamment 53% de l'offre totale, en matière de places offertes, présente dans le centre. L'offre en dehors de Lyon et Villeurbanne est principalement couverte par les bus urbains et les trains régionaux. Cette hétérogénéité des modes sur le territoire aura un impact sur la répartition spatiale des impacts environnementaux avec les zones centrales utilisatrices des modes urbains lourds et les zones périphériques utilisatrices des TER et des bus.

Figure IV-2 : Distribution du système de transport en commun de 2015 entre le centre et le reste de l'aire urbaine de Lyon

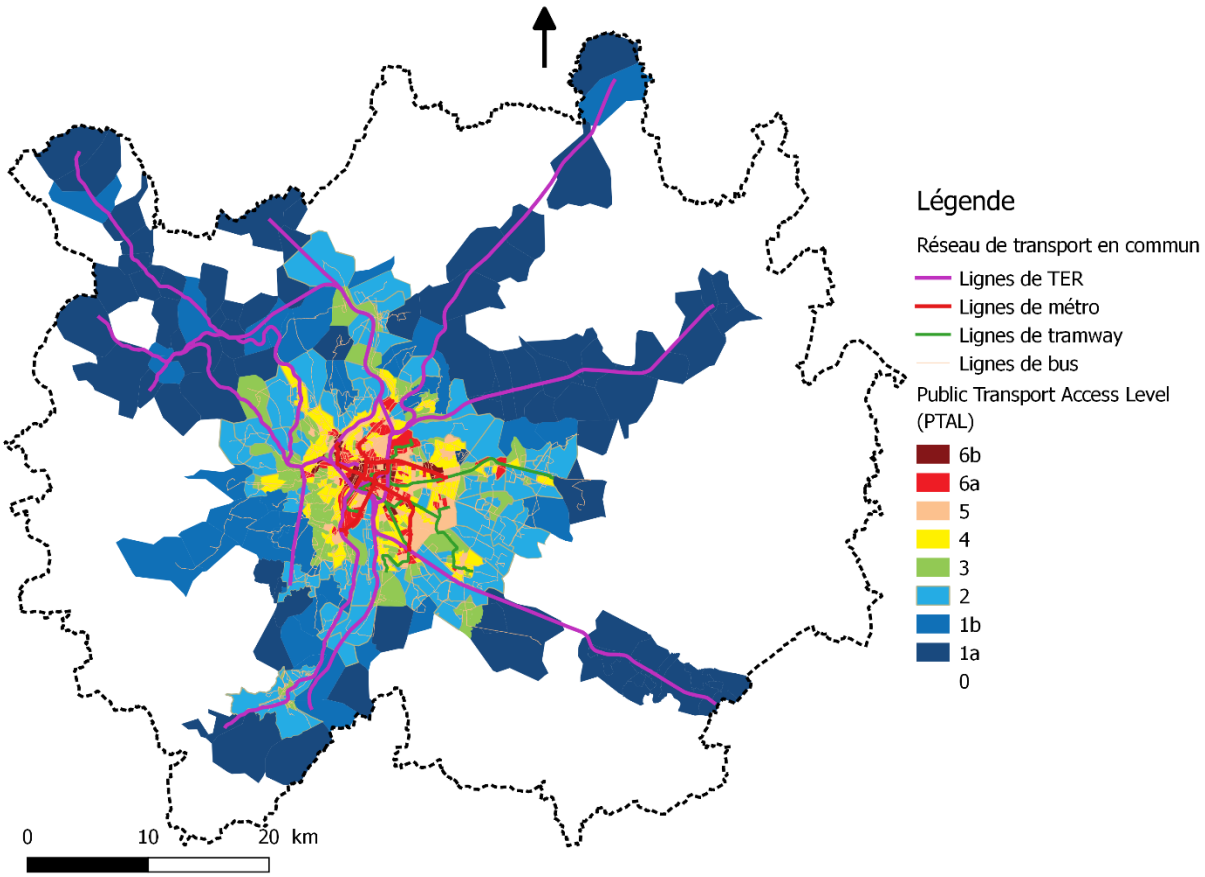


Source : traitement auteur, données SYTRAL

En plus de représenter un enjeu sur la répartition des impacts environnementaux, la répartition spatiale des transports en commun interagit avec leur usage ainsi qu'avec les choix de localisation des agents. La carte suivante présente les différents niveaux d'accessibilité en

transports en commun de l'aire urbaine de Lyon, calculée à partir des temps d'accès aux arrêts et de la fréquence de passages des différents modes de transports (Figure IV-3). Cette méthode de calcul est inspirée de l'indicateur PTAL (Public Transport Access Level) utilisé par l'organisation des transports de Londres (Transport for London, 2015), reprise par Pelé (2018) sur le réseau urbain du Grand-Lyon, en intégrant le réseau ferroviaire.

Figure IV-3 : Indicateur PTAL pour l'accessibilité aux transports en commun de l'aire urbaine de Lyon en 2015



Source : traitement auteur, données SYTRAL, Pelé (2018) & Transport for London (2015)

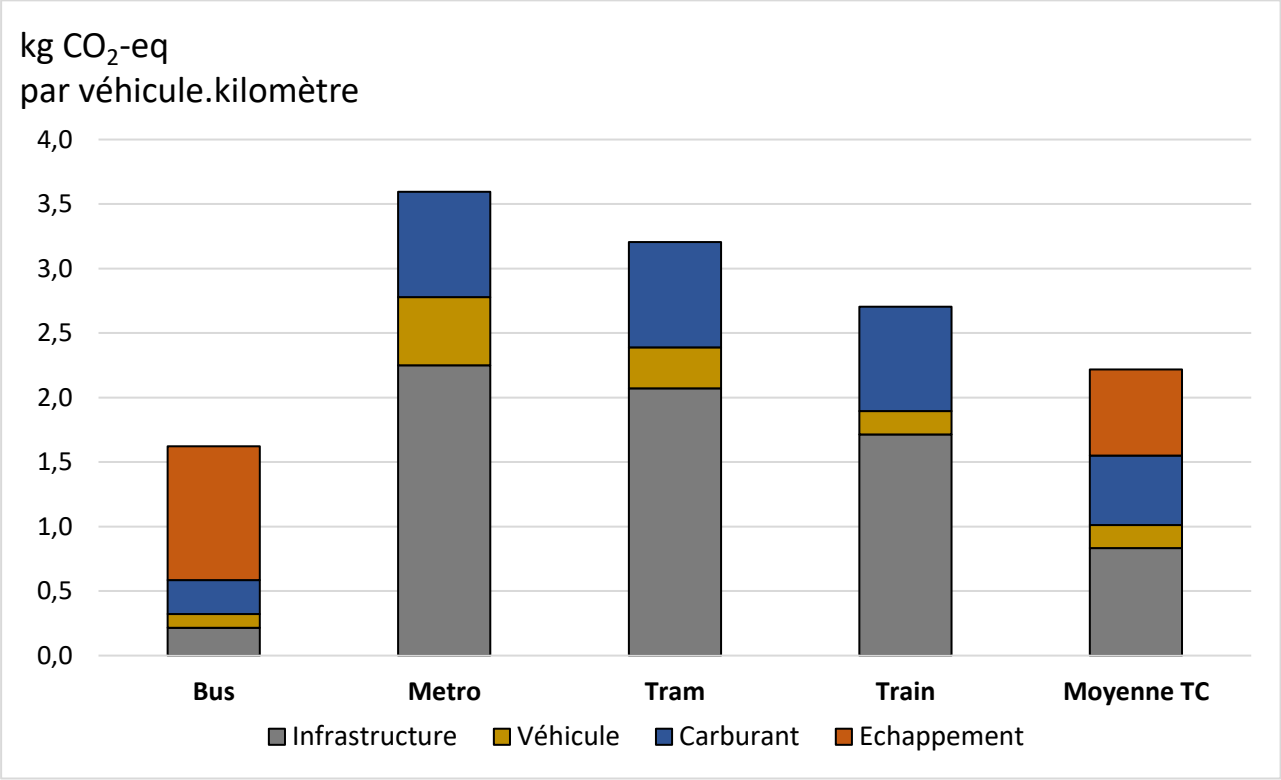
Cette partie a permis de décrire le système de transport en commun qui sera évalué par la suite. Le système lyonnais est unique par les technologies présentes, les tracés, la couverture spatiale. Ces différentes spécificités ont un impact sur l'évaluation environnementale de l'offre,

mais aussi de l'usage qu'il est fait de ce système en raison notamment des accessibilités différenciées qui en résultent.

1.1.2. Impacts environnementaux du sous-système de transport en commun

Pour le système de transports en commun, les impacts environnementaux sont calculés différemment pour chaque mode avec soit des coefficients de consommation et d'émissions constants comme pour les modes lourds (métro, tram, train), soit en considérant la vitesse de circulation pour les bus urbains. La Figure IV-4 montre les différents niveaux d'émissions de GES pour les quatre modes de transports significatifs de l'aire urbaine de Lyon pour un kilomètre parcouru par un véhicule. Le bilan carbone est divisé en quatre groupes pour les quatre phases du cycle de vie, émissions à l'utilisation (échappement), le cycle de vie des carburants consommés, le cycle de vie des véhicules et celui des infrastructures.

Figure IV-4 : Émissions de GES par véhicule.kilomètre du système de transport en commun et de chacun de ses modes



Source : traitement auteur, données de SIMBAD-ACV

On observe deux profils d'impacts différents pour les bus urbains et les modes lourds. Les premiers contribuent au réchauffement climatique principalement via les gaz d'échappement (64%) et émettent environ moitié moins de GES pour un véhicule.kilomètre que les modes lourds. Ces derniers, étant électriques, n'émettent pas de gaz d'échappement. En revanche, les autres phases sont plus importantes, notamment les infrastructures qui représentent environ 63% de leur bilan de GES. En moyenne, sur le réseau lyonnais, du fait de la répartition des véhicules en termes de distance parcourue (Figure IV-1), un vkm représente 2,2 kg de CO_2-eq, dont 38% proviennent du cycle de vie des infrastructures.

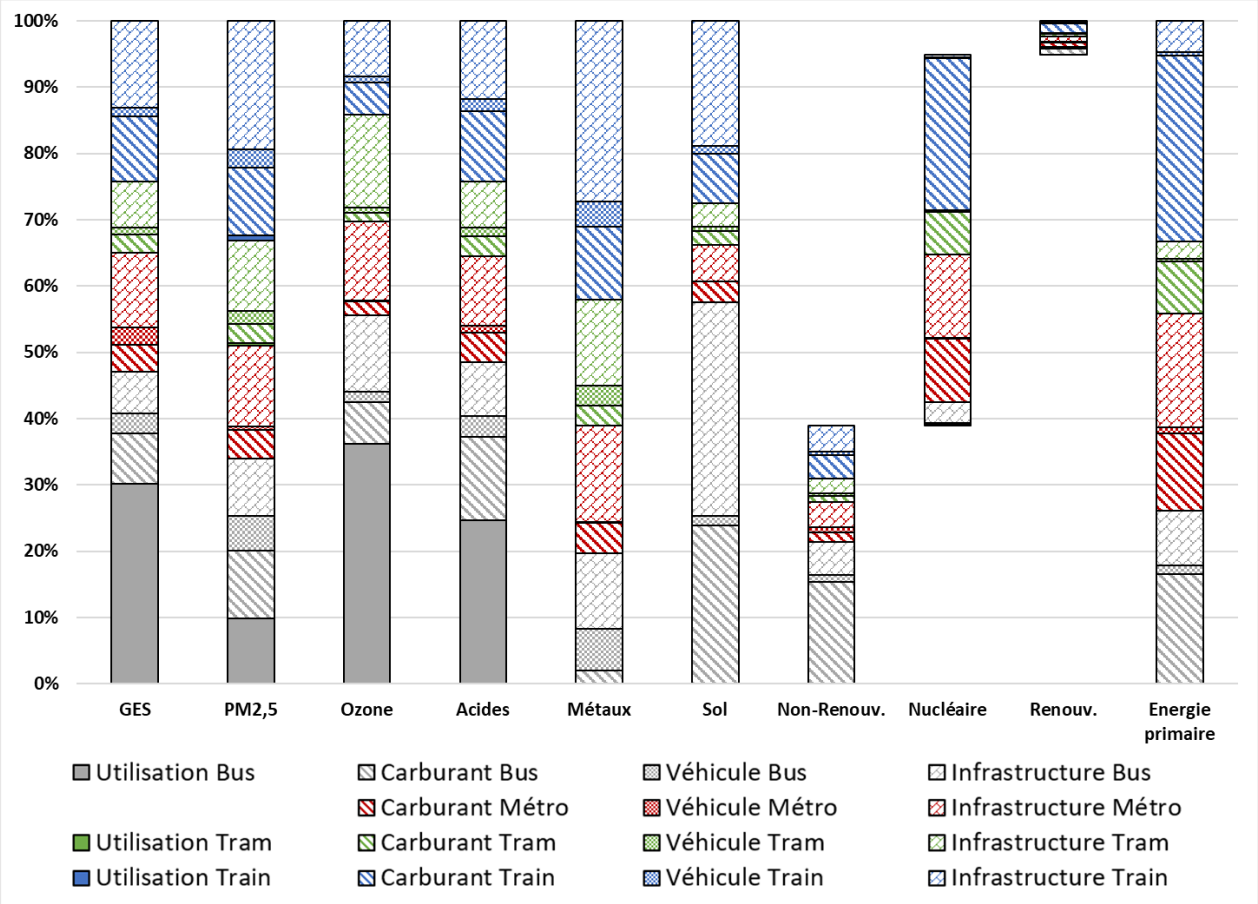
Cette offre mérite également d'être mise en relation avec la population du territoire concerné. Le Tableau IV-1 présente ainsi le bilan environnemental des transports en commun de l'aire urbaine de Lyon ramené par habitant. La Figure IV-5 montre la distribution de chaque indicateur environnemental en fonction des différents modes et des quatre phases de cycle de vie des transports.

Tableau IV-1 : Impacts environnementaux du système de transport en commun par habitant par jour

Par habitant	GES	$PM_{2,5}$	Ozone	Acide	Métaux	Sol	Non-Renouv.	Nucléaire	Renouv.	Énergie primaire
unités	g CO_2	g $PM_{2,5}$	g COVNM	g SO_2	g Fer	m².an	kWh	kWh	kWh	kWh
Bus	106	0,051	0,79	0,55	4,8	4,63	0,48	0,08	0,03	0,59
Métro	40,5	0,025	0,20	0,18	4,7	0,69	0,14	0,50	0,03	0,67
Tram	24,2	0,024	0,23	0,13	4,7	0,50	0,08	0,15	0,01	0,24
Train	54,7	0,049	0,20	0,27	10,4	2,21	0,18	0,53	0,04	0,75
Total	226	0,149	1,42	1,13	24,6	8,04	0,88	1,26	0,12	2,26

Source : traitement auteur, données de SIMBAD-ACV

Figure IV-5 : Contribution de chaque mode et chaque phase du cycle de vie à la performance environnementale des transports en commun



Source : traitement auteur, données de SIMBAD-ACV

Pour chacun des 10 indicateurs environnementaux, la contribution de chaque mode et chaque phase de cycle de vie varie. Les bus urbains participent fortement au réchauffement climatique et à la pollution d'ozone avec respectivement 47% et 56% des émissions polluantes, alors que leurs impacts sont bien plus faibles pour la consommation de métaux et d'énergie avec respectivement 20% et 26% des consommations totales. Pour l'ensemble des impacts, les infrastructures représentent un poste non négligeable d'impact allant de 33% pour la consommation d'énergie à 66% pour la consommation de ressources métalliques. Pour la consommation énergétique, on remarque une forte contribution du nucléaire dans le mix énergétique, propre à la production électrique française de 2015. Seulement 5% de la consommation d'énergie primaire provient de sources renouvelables pour le système de transports en commun.

Les différentes observations faites sur la performance globale du système de transport en commun rendent compte des différents choix de conception du système, modes de transports, tracés, fréquences. Cependant, la somme des impacts de tous les modes fournit une performance environnementale totale du système de transports indépendante de l'usage qu'il en est fait, que le réseau soit surchargé ou vide. Or, l'efficacité du système réside aussi dans l'adéquation entre l'offre et la demande de déplacements en transport en commun et nécessite donc de s'intéresser à son usage.

1.1.3. Usage du système de transport en commun

L'offre de transport en commun et les impacts environnementaux associés sont connus et calculés indépendamment de l'usage du système de transport en commun simulé par SIMBAD. Cependant, la modélisation et l'affectation des déplacements quotidiens sur le réseau de transport en commun sont nécessaires pour estimer l'efficacité de ces transports et pouvoir affecter les impacts environnementaux aux différents usages et usagers du système de transport en commun.

Le modèle SIMBAD estime pour 2009 le nombre de passagers sur l'ensemble des lignes et de leurs tronçons. La distance parcourue par les passagers (passagers.kilomètre, pkm) peut être ainsi comparée avec les pko afin d'estimer le taux de remplissage des transports en commun. Le Tableau IV-2 représente pour chaque mode de transport le nombre moyen de places offertes par types de véhicules ainsi que le taux de remplissage moyen de chaque mode sur une journée. Les performances en matière d'émissions de GES sont ainsi présentées pour un vkm, un pko et un pkm.

Tableau IV-2 : Émissions de GES de chaque mode de transport en commun par vkm, pko et pkm

g de CO_2-eq	vkm	places offertes	pko	Taux de remplissage	pkm
Bus	1 623	90	18,0	16,8%	107
Metro	3 596	368	9,8	9,2%	107
Tram	3 205	200	16,0	12,5%	128
Train	2 704	307	8,8	10,0%	88
Total	2 218	166	13,4	12,4%	108

Source : traitement auteur, données de SIMBAD-ACV

Malgré un impact par véhicule plus faible, le bus urbain reste le mode le plus émetteur de GES par place offerte (18 g de CO2-eq par pko) alors que les trains et les métros sont les moins émetteurs du fait de leurs grandes capacités. Cependant, les taux de remplissage sont plus importants pour les bus avec 17% des places occupées contre seulement 9% pour les métros sur une journée entière. En croisant la performance environnementale de chaque mode et le nombre de places réellement occupées, le train apparait comme le mode de transport le moins émetteur par passagers.kilomètre et le bus et le métro se retrouvent avec le même bilan carbone par pkm. Le modèle SIMBAD, appliqué pour l'année 2009, présente ainsi un taux de remplissage moyen de 12,4% de ces transports en commun.

Le Tableau IV-3 indique, pour chaque indicateur, les performances par type de véhicules (vkm), par places offertes (pko) et par passagers transportés (pkm), mais aussi pour une sortie moyenne ainsi que pour un habitant moyen de l'aire urbaine de Lyon. L'affectation des déplacements par le modèle révèle qu'une sortie en transport en commun représente environ 9,5 km et qu'un habitant réalise 0,22 sortie en transport en commun par jour.

Tableau IV-3 : Impacts environnementaux du système de transport en commun pour différentes unités fonctionnelles

				9,48 km par sortie	0,22 sortie par habitant	
	Unité	par vkm	par pko	par pkm	par sortie	par habitant
GES	kg CO_2	2,22	0,013	0,108	1,02	0,226
PM2,5	g $PM_{2,5}$	1,47	0,009	0,071	0,68	0,149
Ozone	g COVNM	14,0	0,085	0,681	6,45	1,42
Acide	g SO_2	11,1	0,067	0,539	5,11	1,13
Métaux	g Fer	242	1,46	11,8	112	24,6
Sol	m^2.an	79,1	0,477	3,84	36,4	8,04
Non-Renouv.	kWh	8,68	0,052	0,422	4,00	0,882
Nucléaire	kWh	12,4	0,075	0,605	5,73	1,26
Renouv.	kWh	1,15	0,007	0,056	0,53	0,117
Énergie primaire	kWh	22,3	0,134	1,08	10,3	2,26

Source : traitement auteur, données de SIMBAD-ACV pour 2009

Les deux tableaux précédents révèlent les différents mécanismes à l'œuvre pour la performance de la mobilité en transport en commun avec le taux de remplissage des véhicules, la distance parcourue et le nombre de sorties réalisées.

Les détails fournis au niveau des tronçons par le modèle transport utilisé dans SIMBAD permettent d'analyser relativement finement les impacts du système de transport en commun. Cependant, il convient de rester vigilant lors de la formulation de conclusions. En effet, les taux de remplissage du modèle sont faibles comparés aux valeurs identifiées dans la littérature. Par exemple, l'ARAFER estime le taux de remplissage des TER de Rhône-Alpes à 27% pour l'année 2016. Cette sous-estimation résulte des choix de modélisation, notamment celui de modéliser des sorties de ménages plutôt que l'ensemble de déplacements. Les non-résidents de l'aire urbaine de Lyon utilisant les transports en commun pour leurs mobilités quotidiennes ou touristiques ne sont pas, non plus, comptabilisés dans les taux de remplissage.

1.2. Analyse du sous-système de transport individuel motorisé et des déplacements afférents

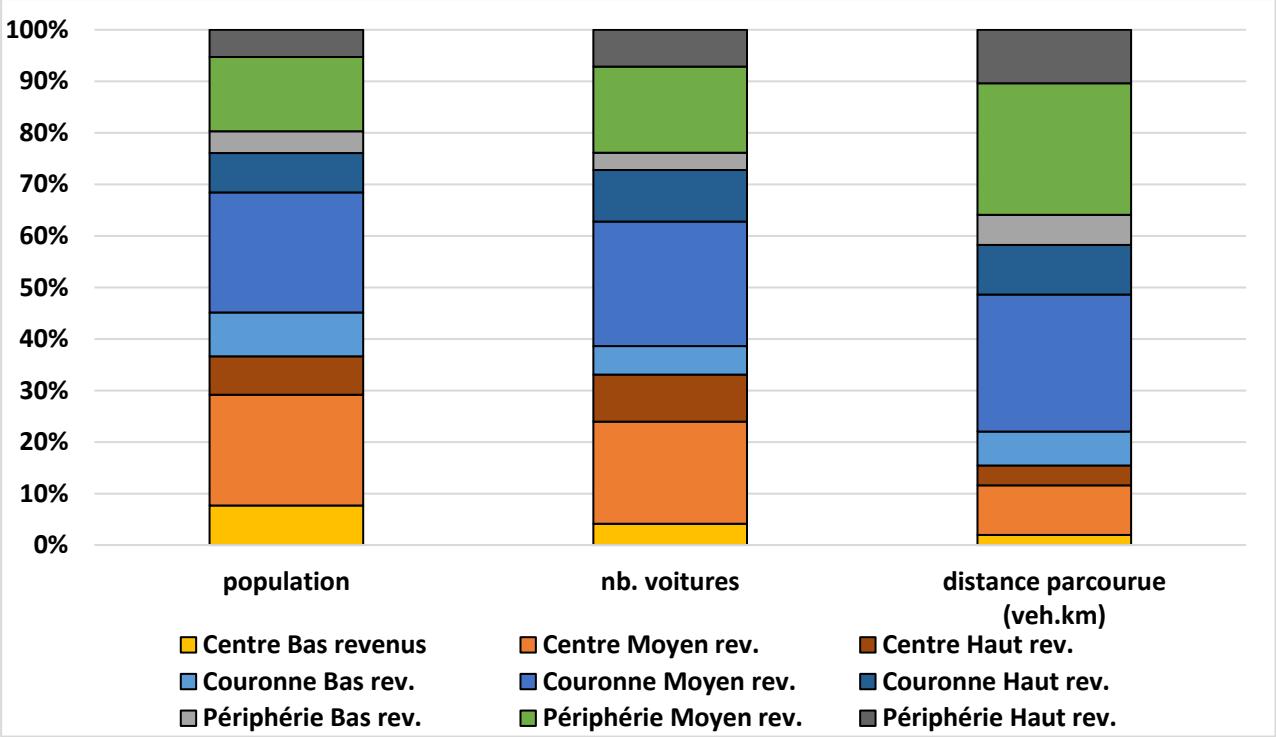
L'usage important des transports individuels motorisés, principalement la voiture, pousse à une analyse approfondie des technologies mises en œuvre, de leurs usages et des leurs impacts environnementaux. De plus, contrairement à l'analyse du système de transport en commun dont le fonctionnement et les impacts environnementaux peuvent être considérés en première approche indépendamment de la demande, l'analyse du système de transport individuel motorisé est directement liée à la mobilité afférente.

1.2.1. Impacts environnementaux du sous-système de transport individuel motorisé

Dans le cadre de SIMBAD, la modélisation du système de transport individuel repose sur un seul mode, la voiture. Par contre, 9 parcs automobiles ont été utilisés dans SIMBAD-ACV

afin de différencier les choix technologiques de 9 classes de ménages en fonction de leur niveau de revenu et de leur distance au centre (Chap III 3.1.2). La Figure IV-6 illustre la taille de ces 9 parcs en fonction de la population, du nombre de véhicules qu'ils représentent ainsi que de la distance parcourue par chacun d'eux.

Figure IV-6 : Poids des neuf parcs automobiles de l'aire urbaine de Lyon (localisation et niveau de revenu)



Source : traitement auteur, données de SIMBAD-ACV

La Figure IV-6 montre des comportements différents en fonction de la classe de ménages. Les ménages du centre, pourtant nombreux (37% de la population), parcourent peu de distance en voiture (15%) comparée aux ménages de périphérie et de la couronne de l'aire urbaine de Lyon. Par conséquent, le bilan environnemental du système de transport individuel sera majoritairement lié à la mobilité des ménages de la couronne et de la périphérie. Le taux de motorisation est aussi une variable importante pour la détermination de la mobilité (Pelé, 2018), notamment pour les ménages avec les différents niveaux de revenu puisqu'en moyenne un ménage à bas revenu possède 0,71 véhicule contre 1,44 pour un ménage aisé.

Le Tableau IV-4 décrit la performance moyenne d'un kilomètre parcouru par un véhicule en fonction des quatre phases du cycle de vie des transports. Ces scores rassemblent les 9 parcs automobiles répartis sur l'ensemble du réseau de voirie au cours d'une journée.

Tableau IV-4 : Impacts environnementaux du système de transport individuel par vkm

Par véhicule.km	GES	$PM_{2,5}$	Ozone	Acide	Métaux	Sol	Non-Renouv.	Nucléaire	Renouv.	Énergie primaire
unité	g CO_2	g $PM_{2,5}$	g COVNM	g SO_2	g Fer	m².an	kWh	kWh	kWh	kWh
Échappement	169	0,039	0,54	0,28	0	0	0	0	0	0
Carburants	43,5	0,041	0,23	0,35	1,2	3,7	0,87	0,01	0,05	0,93
Fab. véhicule	69,6	0,073	0,28	0,36	27,1	1,2	0,23	0,04	0,02	0,29
Infrastructure	16,3	0,014	0,17	0,10	2,7	2,2	0,12	0,13	0,01	0,25
Total	298	0,168	1,21	1,09	31,1	7,1	1,22	0,17	0,08	1,47

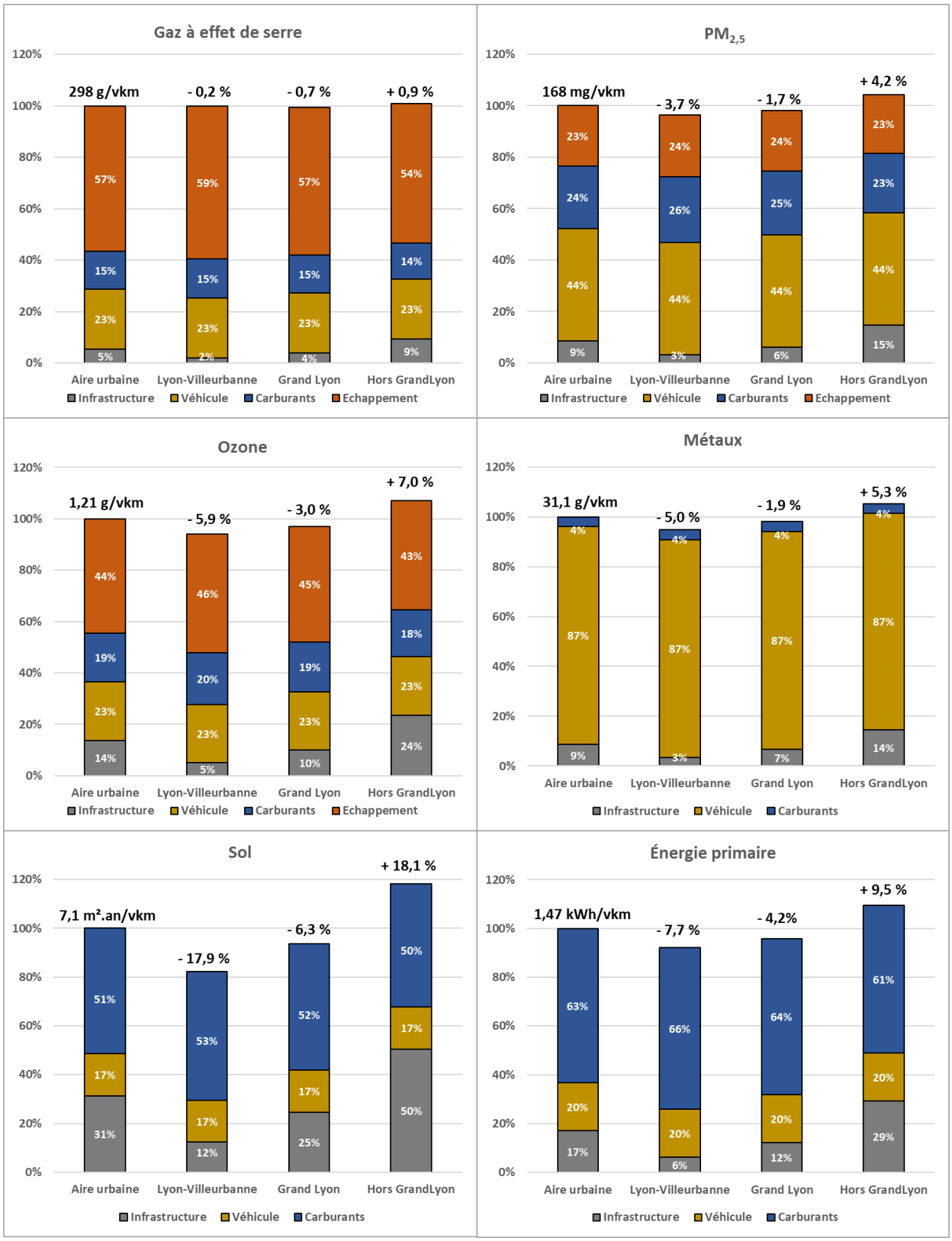
Source : traitement auteur, données de SIMBAD-ACV pour 2009

La répartition par phases de cycle de vie montre le poids important que font peser les phases indirectes (carburants, véhicule et infrastructure) dans le bilan global. La plus forte contribution des gaz d'échappement porte sur le réchauffement climatique avec 57% des émissions des GES totales. L'approche multicritère adoptée dans SIMBAD-ACV révèle des contributions hétérogènes de chaque phase du cycle de vie pour les différents indicateurs.

La valeur 169 g CO_2-eq par km d'émissions directes est largement plus élevée que les objectifs européens d'émissions fixés pour 2015 et 2020 de respectivement 130 g/km et 95 g/km pour les véhicules neufs. Cependant, ces objectifs ne concernent que les gaz d'échappement et sont basés sur les données constructeurs en sorties d'usine et non sur des cycles de conduites plus proches de la réalité. En ce qui concerne la valeur sur le cycle de vie de 298 g CO_2-eq par km, Le Féon (2014) dans son étude par ACV de la mobilité quotidienne estime les émissions de GES à 292 g/km pour un véhicule individuel. Aux États-Unis, Chester *et al.* (2013) ont un facteur d'émission de GES par km plus élevé (373 g/km pour leurs plus petits véhicules) en utilisant aussi une méthode d'ACV.

Le choix méthodologique réalisé dans SIMBA-ACV d'implémenter un modèle d'émission, COPERT, permet d'intégrer certains paramètres de condition de circulation. La Figure IV-7 présente les variations de la performance environnementale en fonction de trois zones de circulations, le centre avec les communes de Lyon et de Villeurbanne, la couronne constituée des autres communes faisant partie de la métropole du Grand Lyon et le reste de l'aire urbaine situé en dehors de la métropole. Dans le centre, la vitesse moyenne dans la journée est de 35 km/h contre 49 km/h et 63 km/h respectivement dans la couronne et le reste l'aire urbaine.

Figure IV-7 : Variations des impacts environnementaux par vkm en fonction de la zone de circulation (Centre, Grand Lyon, périphérie)



Source : traitement auteur, données de SIMBAD-ACV pour 2009

On observe qu'un kilomètre parcouru dans chacune de ces trois zones concentriques n'a pas le même impact environnemental, mettant ainsi en lumière l'influence de la condition de circulation, mais surtout que les taux de variation changent d'un indicateur à un autre. Ainsi, les émissions de GES varient peu en fonction des conditions de circulation (variation entre -0,7% et +0,9%), alors que l'usage du sol est plus sensible (variation entre -17,9% et +18,1%), notamment du fait de la plus faible circulation sur les infrastructures de la périphérie. Pour l'ensemble des indicateurs environnementaux, les conditions de circulation sont moins performantes environnementalement dans la périphérie. Ce résultat est lié directement à la partie infrastructures du cycle de vie des transports. En effet, la phase liée aux véhicules est la même pour chacune des zones. Les phases d'utilisation et de fabrication des carburants présentent une performance environnementale meilleure par véhicule.kilomètre dans la périphérie que dans les autres zones urbaines.

L'influence des conditions de circulation peut être complétée par une analyse diachronique en fonction de l'heure de circulation. La séparation des flux routiers en heures pleines et heures creuses révèle en effet deux situations de circulation distinctes avec environ 6 fois plus de flux en heure pleine qu'en heure creuse et une vitesse moyenne plus faible avec respectivement 43 km/h et 62 km/h en heure pleine et en heure creuse. La Tableau IV-5 présente les performances environnementales d'un vkm en fonction des deux heures types modélisées dans SIMBAD-ACV.

Tableau IV-5 : Impacts environnementaux d'un vkm en heures pleines et creuses

Par véhicule.km	**GES**	**$PM_{2,5}$**	**Ozone**	**Acide**	**Métaux**	**Sol**	**Non-Renouv.**	**Nucléaire**	**Renouv.**	**Énergie primaire**
unité	g CO_2	g $PM_{2,5}$	g COVNM	g SO_2	g Fer	m².an	kWh	kWh	kWh	kWh
Journée moyenne	298	0,168	1,21	1,09	31,1	7,13	1,22	0,17	0,08	1,47
Heures pleines	305	0,170	1,24	1,11	31,2	7,29	1,24	0,18	0,08	1,50
Heures creuses	291	0,165	1,18	1,07	30,9	6,92	1,18	0,17	0,08	1,42
diff HP/HC	4,8%	3,3%	5,3%	4,1%	0,9%	5,4%	5,1%	6,4%	4,5%	5,2%

Source : traitement auteur, données de SIMBAD-ACV pour 2009

Pour l'ensemble des 10 indicateurs, les conditions de circulations en heures pleines ont un impact négatif sur l'environnement. Contrairement aux variations spatiales (Figure IV-7), les variations temporelles reposent moins sur les impacts des infrastructures, mais davantage sur ceux liés aux émissions directes et aux carburants. Par contre, les impacts liés à la fabrication des véhicules étant indépendants des conditions de circulation, l'usage des ressources métalliques ne varie que faiblement entre l'heure pleine et l'heure creuse.

L'impact du système de transport individuel est aussi dépendant des choix technologiques réalisés (ou contraints) pour chaque parc automobile modélisé. L'efficacité environnementale des véhicules varie d'un parc à l'autre, sous l'effet cumulé des choix technologiques et des conditions de circulation puisque les parcs automobiles sont réalisés à partir des niveaux de revenus et des localisations des ménages. Les résultats par vkm du Tableau IV-6 montrent une décorrélation entre les émissions de GES, celles de $PM_{2,5}$ équivalentes et la consommation d'énergie primaire. Par exemple, les véhicules des ménages modestes du centre, qui sont plutôt anciens et de petite cylindrée, sont fortement émetteurs de polluants locaux (particules, mais aussi précurseurs d'ozone et d'acidification), tout en présentant les niveaux d'émissions de GES et de consommation d'énergie les plus faibles des 9 parcs.

L'analyse réalisée dans cette sous-partie a permis de montrer les différents facteurs contribuant aux impacts des transports individuels sans les relier aux passagers transportés. L'approche multicritère de SIMBAD-ACV révèle pour chaque indicateur les poids relatifs de chaque phase du cycle de vie dans le score total, soulignant l'intérêt de l'approche en ACV. Les effets des conditions de circulation et des choix technologiques de chaque parc automobile (cf. Annexe 2) sont significatifs et résultent de l'approche micro permise notamment par l'utilisation de SIMBAD et du modèle d'émissions COPERT.

1.2.2. Usage du système de transport individuel

Le passage de la performance des véhicules à la performance de la mobilité individuelle nécessite différents éléments essentiels liés à l'usage du système de transport individuel. Il peut ainsi être exprimé par le produit de trois variables que sont le taux d'occupation des véhicules, la distance parcourue par sortie et le nombre de sorties par jour et par personne.

$$Impactmobilité = impact_véh * \frac{1}{taux\ d'occupation} * distance\ par\ sortie * nb\ sorties$$

Le premier élément est le taux d'occupation des véhicules. En France en 2008, d'après l'ENTD, le taux d'occupation des voitures pour la mobilité locale est de 1,4 passager par véhicule[27]. Pour la mobilité quotidienne de l'aire urbaine de Lyon en 2009, le taux d'occupation moyen estimé par le modèle est de 1,26 passager par véhicule, soit la même valeur que l'EMD de 2006 de Lyon. En fonction des niveaux de revenus et la localisation de chaque parc automobile, les taux d'occupation de véhicule varient (de 1,36 à 1,22 passager par véhicule). Ce taux permet de convertir la performance environnementale par personne.kilomètre, fréquemment utilisée pour analyser l'efficacité d'un système de transport.

Le deuxième élément lié à l'usage du système de transport individuel est la distance parcourue pour un déplacement moyen ou, dans le cas du modèle SIMBAD, la distance parcourue pour une sortie de ménages. En France en 2008, d'après l'ENTD, la distance moyenne d'un déplacement en voiture pour la mobilité locale est de 10,2 km par déplacement[27]. Pour la mobilité quotidienne des personnes de l'aire urbaine de Lyon en 2009, la distance moyenne d'une sortie de ménage en transport individuel est estimée par le modèle à 15,5 km, soit 7,75 km par déplacement si l'on considère un aller et un retour, soit deux déplacements par sortie. Dans l'EMD de 2006 à Lyon la distance moyenne d'un déplacement en voiture est de 7,79 km.

Le dernier élément, permettant d'estimer les impacts par habitant, correspond au nombre de sorties en voiture par habitant par jour. En France en 2008, d'après l'ENTD, un habitant réalise en moyenne pour sa mobilité locale 2,05 déplacements en véhicule personnel par jour[27]. Pour la mobilité quotidienne des personnes de l'aire urbaine de Lyon en 2009, le nombre de sorties par jour et par habitant est estimé à 0,82 sortie à partir du modèle SIMBAD. Ceci représente 1,64 déplacement si l'on considère deux déplacements par sorties, sachant que c'est une estimation plancher puisqu'il peut y avoir des sorties avec des déplacements chainés. Ainsi, le nombre de déplacements quotidien en voiture est estimé à 1,84 par personne et par jour dans l'EMD 2006 de l'aire urbaine de Lyon (Pelé, 2018). Au total, le modèle estime à 10,1 km parcourus en voiture conducteur par jour et par personnes pour 2009, contre 11,6 km dans l'EMD de 2006.

[27] Chiffres de l'Enquête Nationale Transports et Déplacements (ENTD) de 2008 : http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/transports/s/transport-voyageurs-deplacements.html

Les valeurs de ces trois éléments d'usage du système de transport individuel sont cohérentes avec les valeurs de l'EMD de 2006, qui a servi à calibrer le modèle SIMBAD. Elles sont, en revanche, inférieures aux valeurs moyennes françaises obtenues par l'ENTD de 2008. Cependant, les communes urbanisées présentes dans l'ENTD possèdent des valeurs plus proches de celles obtenues par modélisation[27].

Le Tableau IV-6 reprend et présente les trois éléments d'usage des systèmes de transport individuel ainsi que leurs conséquences sur les performances environnementales sur le réchauffement climatique, les émissions de particules fines et la consommation d'énergie finale. Chaque parc automobile renvoyant à des usages différents de la part de la population correspondante, les 9 parcs automobiles modélisés ont été différenciés dans le tableau suivant.

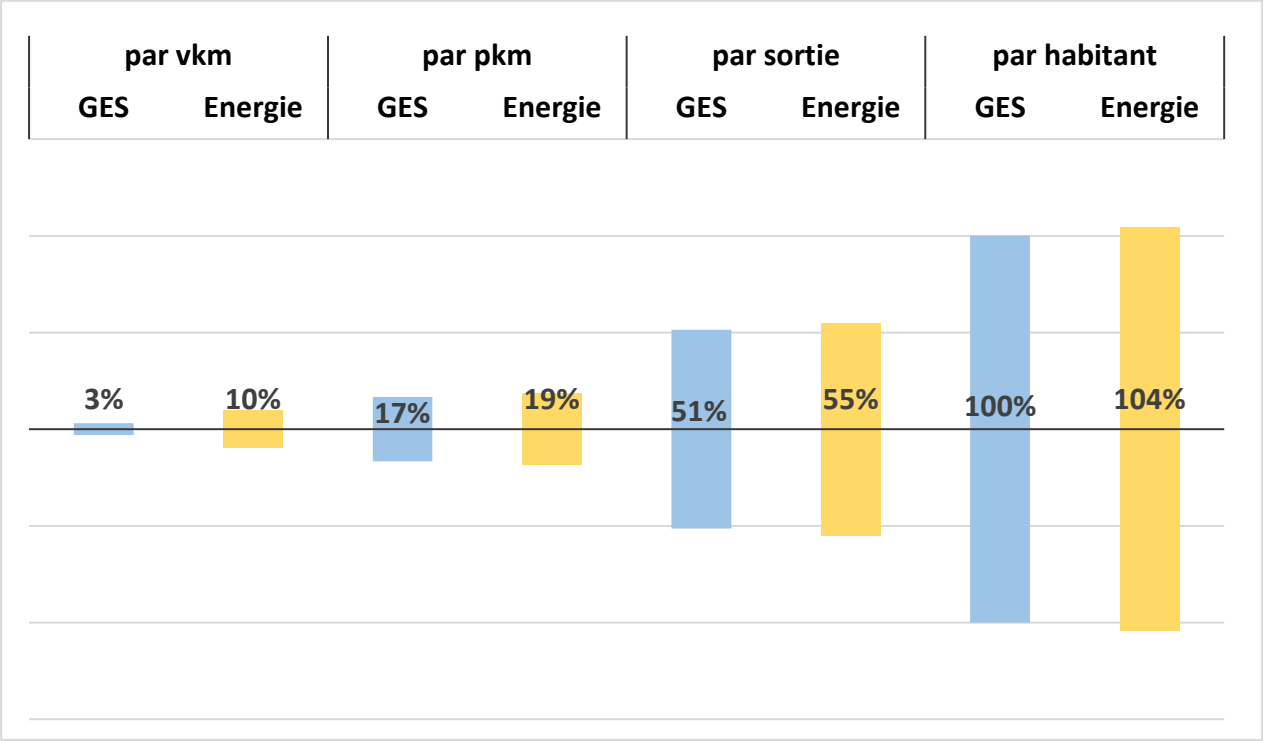
Tableau IV-6 : Impacts environnementaux des différents parcs automobiles

	Véhicule.kilomètre			Personnes par véhicules	Personne.kilomètre			Distance par sortie	Sortie de ménage			Sorties par habitant	Habitant		
Unités	GES kg CO_2	$PM_{2,5}$ g $PM_{2,5}$	Énergie kWh	personnes/ véhicule	GES kg CO_2	$PM_{2,5}$ g $PM_{2,5}$	Énergie kWh	kilomètres/ sortie	GES kg CO_2	$PM_{2,5}$ g $PM_{2,5}$	Énergie kWh	sorties/ habitant	GES kg CO_2	$PM_{2,5}$ g $PM_{2,5}$	Énergie kWh
Aire urbaine	0,298	0,168	1,47	1,26	0,237	0,133	1,16	15,5	3,67	2,06	18	0,82	3	1,69	14,7
Centre - Bas	0,296	0,176	1,391	1,31	0,226	0,135	1,06	8,6	1,94	1,16	9,1	0,38	0,75	0,44	3,5
Centre - Moyen	0,302	0,165	1,421	1,23	0,247	0,134	1,16	9,5	2,34	1,27	11	0,58	1,35	0,74	6,3
Centre - Haut	0,304	0,162	1,43	1,22	0,249	0,132	1,17	9,7	2,41	1,28	11,3	0,65	1,56	0,83	7,3
Couronne - Bas	0,296	0,173	1,417	1,32	0,224	0,131	1,07	13,2	2,95	1,73	14,2	0,79	2,32	1,36	11,1
Couronne - Moyen	0,299	0,167	1,429	1,24	0,241	0,135	1,15	15,2	3,67	2,05	17,5	0,93	3,41	1,91	16,3
Couronne - Haut	0,301	0,16	1,439	1,22	0,247	0,131	1,18	15,9	3,93	2,08	18,8	0,98	3,83	2,03	18,3
Périphérie - Bas	0,298	0,18	1,534	1,36	0,219	0,132	1,13	18,3	4,02	2,42	20,7	1,04	4,16	2,51	21,4
Périphérie - Moyen	0,297	0,169	1,52	1,28	0,232	0,132	1,19	21,2	4,92	2,8	25,2	1,08	5,32	3,03	27,2
Périphérie - Haut	0,296	0,168	1,517	1,26	0,235	0,133	1,21	22,6	5,31	3,01	27,2	1,1	5,85	3,32	30

Source : traitement auteur, données de SIMBAD-ACV

En multipliant l'ensemble des éléments d'usage, les émissions totales de GES pour la mobilité en transport individuel sont de 3 kg de CO_2-eq par jour par personne. On observe surtout une variabilité croissante entre les différentes classes de ménages en passant du score par véhicule.kilomètre aux scores par habitant. Les ménages modestes ou habitant dans le centre ont des impacts plus faibles malgré des facteurs unitaires par véhicule souvent plus élevés que les autres classes de ménages. Pour décrire cette augmentation de la variabilité avec la prise en compte de l'usage des transports individuels, la Figure IV-8 représente les écarts-types relatifs pour les GES et l'énergie primaire, pondérés par les vkm, les pkm, les sorties et le nombre d'habitants, de l'ensemble des ménages de l'aire urbaine.

Figure IV-8 : Écarts-types relatifs des impacts de réchauffement climatique et de consommation d'énergie primaire en fonction de l'unité fonctionnelle



Source : traitement auteur, données de SIMBAD-ACV

L'analyse réalisée sur les usages des transports individuels et leurs effets sur les résultats environnementaux de la mobilité quotidienne montre le poids important de l'usage sur la performance. En effet, l'impact environnemental pour un habitant se résume par l'équation

présentée précédemment. Ainsi le facteur d'émission des véhicules, même s'il est dépendant de la technologie et des conditions de circulation, ne constitue qu'une partie de l'équation. Les autres variables sont en revanche de nature non technologique et dépendent de différents facteurs socio-économiques et géographiques plus difficiles à contrôler et maitriser.

1.3. Analyse du système de transport Lyonnais

Après avoir montré les spécificités environnementales des transports collectifs et individuels, il est nécessaire pour quantifier les impacts environnementaux du système de transport de personnes total, et de la mobilité qui est liée, de regrouper l'ensemble des modes de transport de l'aire urbaine de Lyon, c'est-à-dire les véhicules individuels motorisés, les transports en commun et les modes doux.

1.3.1. Compétitivité des modes de transport

Le modèle SIMBAD repose sur la considération de trois modes principaux de déplacements, les modes doux, les véhicules personnels et les transports en commun. Les sorties de ménages sont réparties entre ces trois modes. Leurs parts de marché respectives, en nombre de sorties de ménages, en distance parcourue et en temps passé, sont illustrées avec la Figure IV-9. L'usage des véhicules personnels est également différencié entre passager et conducteur.

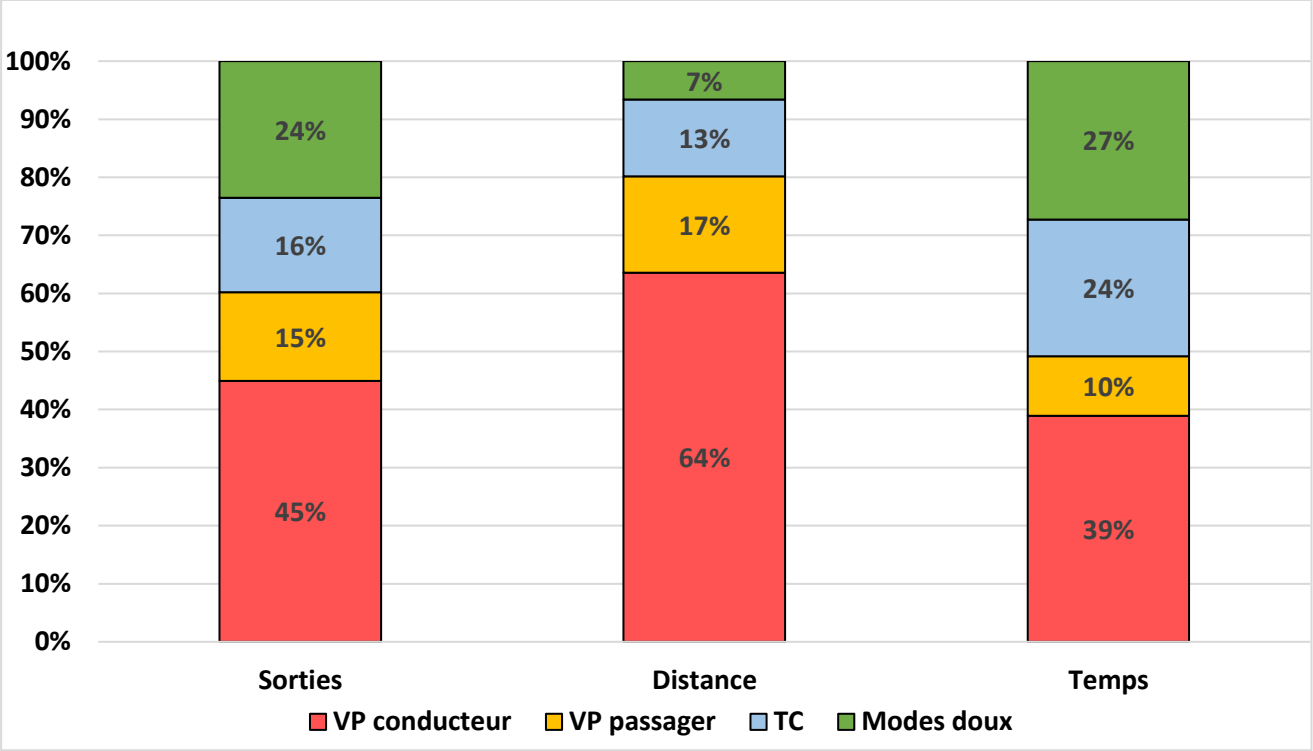
Pour la mobilité quotidienne des personnes de l'aire urbaine de Lyon de 2009, la part modale des sorties en véhicules personnels motorisés représente 60%, dont 45% en tant que conducteur et 15% en tant que passager. Les transports en commun représentent 16% des sorties des ménages et les modes doux 24%. La part modale des véhicules motorisés individuels en France en 2008 était de 67%, celle des transports en commun de 8% et celle des modes doux de 25% pour la mobilité locale (CGDD, 2010). En revanche, la voiture est largement majoritaire en matière de distances parcourues avec 80% (83% dans l'ENTD).

La répartition temporelle est au contraire dominée par les modes alternatifs (TC et modes doux) qui représentent 51% du temps passé pour se déplacer par les habitants de l'aire urbaine de Lyon. En moyenne, les simulations de SIMBAD estiment qu'un habitant de l'aire urbaine

de Lyon en 2009 réalise, tous modes confondus, 1,36 sortie de domicile par jour, et parcourt 15,8 km pour une durée totale de 49 minutes soit une vitesse moyenne de 19,2 km/h.

Les valeurs simulées sont légèrement différentes de celles extraites des analyses de l'EMD de 2006 de Lyon, puisque les parts modales sont respectivement de 54%, 14% et 32% pour les voitures, les TC et les modes doux. Dans cette enquête, la distance quotidienne moyenne est de 19 km par personne, pour un temps de 64 minutes, soit une vitesse moyenne de déplacement de 17,8 km/h (Pelé, 2018).

Figure IV-9 : Parts de marché des modes de transports principaux de l'aire urbaine de Lyon en 2009

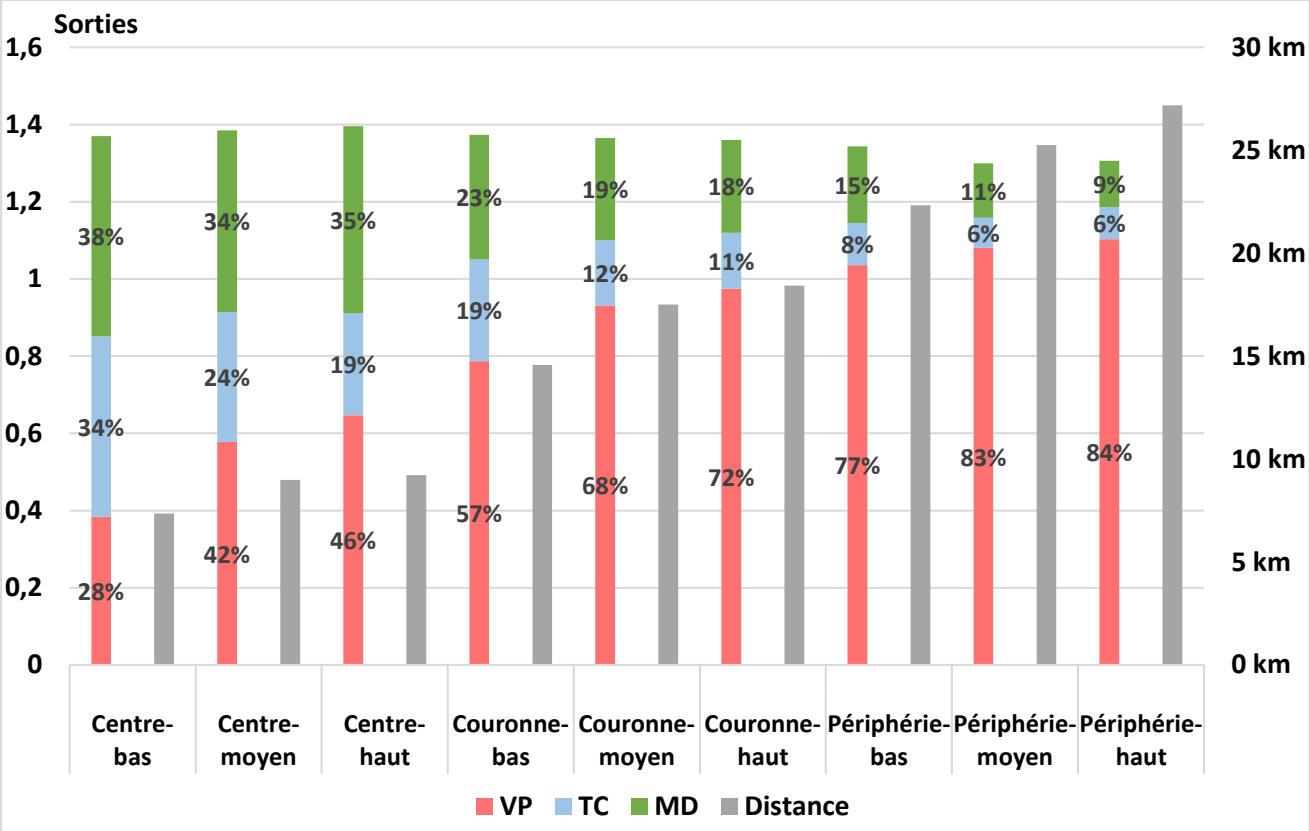


Source : traitement auteur, données SIMBAD pour 2009

Les usages de ces différents modes divergent en fonction des classes de ménages. La Figure IV-10 présente conjointement le nombre de sorties réalisées avec chacun des trois modes principaux et la distance moyenne parcourue par un habitant de chacune des 9 classes de ménages pendant une journée. On observe que le nombre de sorties est quasi constant, quels que soient le niveau de revenu et la localisation. Les différences d'usage sont principalement liées à la répartition modale et à la distance parcourue. Par exemple, les ménages du centre

utilisent la voiture pour 40% de leurs sorties contre 82% pour les ménages de la périphérie et la distance parcourue par jour et par personne est pratiquement le triple dans la périphérie que dans le centre, respectivement 25,2 km et 8,7 km.

Figure IV-10 : Choix modaux et distance parcourue des neuf catégories de ménages de l'aire urbaine de Lyon en 2009



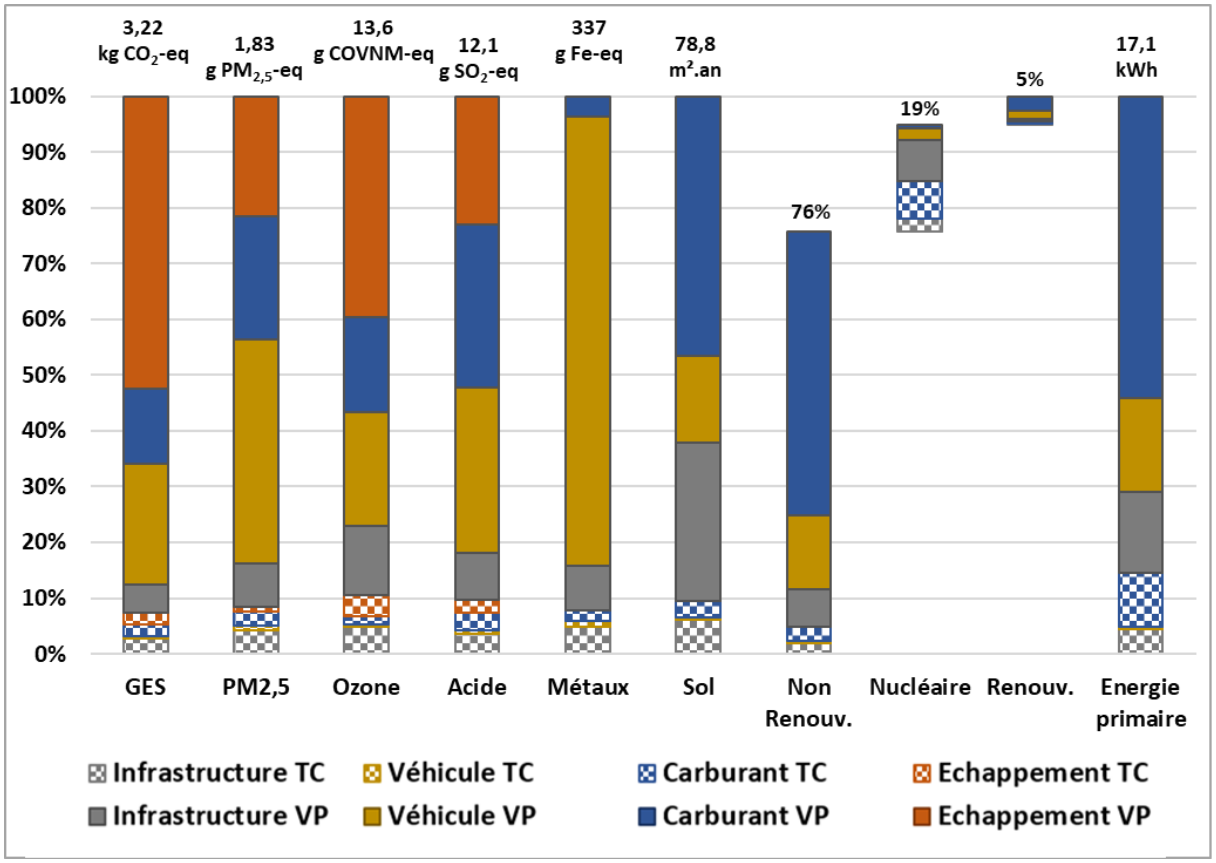
Source : traitement auteur, données de SIMBAD pour 2009

Cette description des usages du système de transports par les habitants de l'aire urbaine permet dans un premier lieu de fournir des informations sur l'usage des différents modes de transports afin de mieux les évaluer, mais aussi d'apporter quelques éléments quantitatifs sur la fonction de référence utilisée dans cette analyse : « *Répondre à la demande de déplacements de personnes du système urbain de l'aire urbaine de Lyon pendant les jours ouvrés* ».

1.3.2. Évaluation environnementale du système de transport Lyonnais

En combinant les analyses des systèmes de transports en commun et de transports individuels avec les répartitions modales, il est possible de réaliser un bilan complet des impacts environnementaux de la mobilité quotidienne des habitants de l'aire urbaine de Lyon de 2009. La Figure IV-11 présente les valeurs moyennes de chacun des indicateurs environnementaux pour un habitant ainsi que la répartition entre les phases de cycle de vie en distinguant les véhicules personnels et les transports en commun.

Figure IV-11 : Impacts environnementaux de la mobilité quotidienne des personnes de l'aire urbaine de Lyon en 2009



Source : traitement auteur, données de SIMBAD-ACV

La dominance de la voiture en matière de distances parcourues par personne présentée Figure IV-9 transparait directement sur les résultats puisque la contribution des transports en commun n'excède jamais les 15%. La contribution de ces derniers est minimale pour le réchauffement climatique avec 7,3% du total des émissions de GES. Pour la mobilité quotidienne d'une personne de l'aire urbaine de Lyon, les émissions de GES sur l'ensemble du cycle de vie des transports s'élèvent à 3,22 kg de CO_2-eq par jour par habitant. Rapporté à l'année en considérant 227 jours ouvrés hors vacances, le bilan carbone d'un Lyonnais pour sa mobilité quotidienne est de 730 kg de CO_2-eq soit 15% du bilan global d'un habitant moyen français en 2014 (SOeS - MEEM, 2017). Le bilan carbone de SIMBAD-ACV est cohérent avec celui réalisé par Le Féon (2014) sur l'aire urbaine stéphanoise, qu'il estimait, avec une méthodologie variante et un terrain différent, à 2,67 kg de CO_2-eq par habitant par jour, avec notamment une plus faible contribution estimée des phases indirectes.

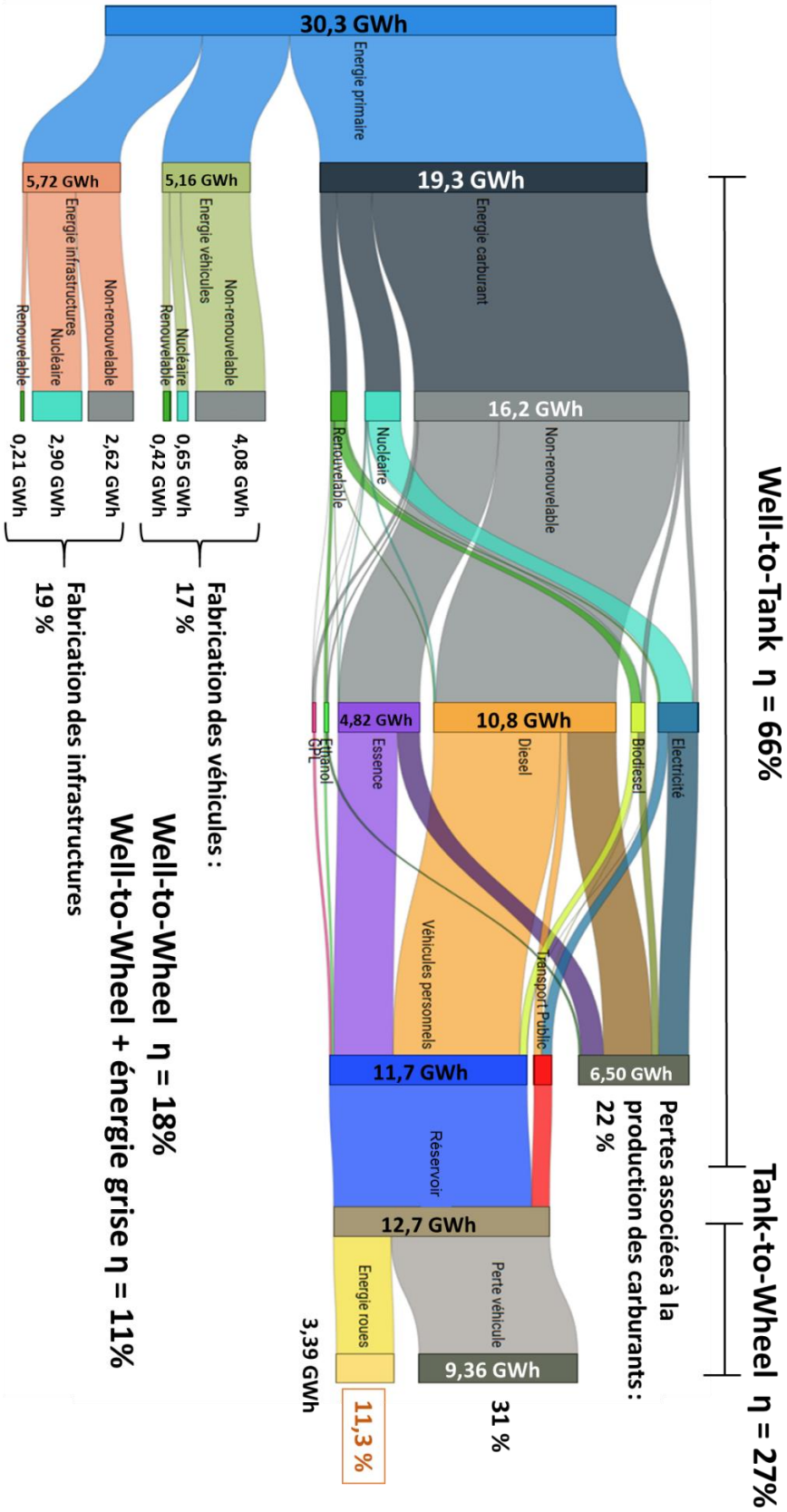
Les résultats de SIMBAD-ACV montrent la forte contribution des phases indirectes dans la performance environnementale. La contribution des gaz d'échappement et des autres émissions directes ne représente jamais plus de 55% de l'impact total des différents indicateurs. Même pour les impacts des pollutions locales telles que les particules fines ($PM_{2,5}$) et la formation d'ozone, la contribution n'est respectivement que de 22% et 44% soulevant la question de la localisation des sources de pollutions locales indirectes (usines, centrales, raffineries …).

L'analyse de l'occupation du sol, dont la valeur moyenne est de 79 m² par an (227 jours), révèle la place importante qu'occupe aujourd'hui la production de carburant dans le partage de sol. En effet, les agrocarburants liquides, pourtant minoritaires dans les mélanges de carburant (7% et 5% en volume pour le diesel et l'essence), représentent près de 45% du total de surface occupée par an pour la mobilité quotidienne de personnes. Les infrastructures de transports ne représentent que 34% de cette surface totale, avec une part non négligeable liée aux infrastructures de transports en commun (6%).

Au niveau énergétique, la mobilité quotidienne repose à 95% sur de l'énergie primaire non renouvelable. L'origine nucléaire de l'énergie constitue 19% de la consommation d'énergie totale et primaire. Du fait de l'ensemble des données disponibles, l'analyse énergétique a été approfondie en construisant un diagramme de Sankey ou diagramme de flux (Figure IV-12) permettant de visualiser les différents vecteurs d'énergie, de constater les différentes pertes énergétiques qui ont lieu et de mettre en lumière la part d'énergie grise liée aux véhicules et aux infrastructures. La méthodologie mise en place permet de rendre compte des différentes

transformations et pertes du puit au réservoir (Well-to-Tank). La partie finale du réservoir à la roue (Tank to Wheel) a été estimée en considérant un rendement énergétique pour les véhicules thermiques de 24% et pour les véhicules électriques de 80% (Heywood & MacKenzie, 2015), permettant ainsi d'estimer l'énergie utile mise en œuvre par les modes motorisés.

Figure IV-12 : Diagramme des flux d'énergie de la mobilité quotidienne des personnes



Source : traitement auteur, données de SIMBAD-ACV, utilisation du logiciel « Acquire's Sankey Diagram Generator »

Ainsi, au total, l'ensemble des habitants de l'aire urbaine de Lyon consomment 30,3 GWh d'énergie primaire par jour pour se déplacer au quotidien, soit l'équivalent, en rayonnement solaire, à l'énergie reçue par 7,7 km² pendant un jour moyen à Lyon, l'équivalent de la surface des arrondissements du 1er, du 2e et du 6e de Lyon, ou 3 149 m^3 de pétrole brut (soit l'équivalent du volume d'une piscine olympique par jour). Dans le bilan énergétique total, l'énergie grise liée aux cycles de vie des véhicules et des infrastructures représente 36% du total pour le système de transport. Les pertes énergétiques liées à la transformation et à la distribution des carburants représentent 22% de l'énergie totale.

L'énergie finale, qui représente la quantité d'énergie introduite dans les véhicules, représente 12,7 GWh, soit l'équivalent de 1,3 million de litres de diesel par jour pour les habitants de l'aire urbaine de Lyon, les véhicules personnels consommant 92% de cette énergie finale. En ramenant cette consommation d'énergie finale par pkm, on obtient 0,526 kWh/pkm pour les voitures et 0,289 kWh/pkm pour les TC. Ces deux valeurs sont bien supérieures aux quantités d'énergies nécessaires pour la marche à pied et le vélo, respectivement 0,063 kWh/km et 0,033 kWh/km[28]. Ainsi, les modes doux, qui représentent 7% des distances parcourues totales dans SIMBAD, nécessitent entre 0,12 et 0,06 GWh d'énergie finale par jour, soit 0,9% et 0,5% de l'énergie finale consommée par les modes motorisés.

En incluant des rendements énergétiques des véhicules, la quantité d'énergie utile mise en œuvre au niveau des roues des véhicules motorisés représente 3,39 GWH soit 11% de l'énergie primaire totale. Ce bilan énergétique révèle la faible efficacité énergétique du système de transport d'une agglomération européenne occidentale telle que Lyon et éclaire sur les différentes transformations et améliorations à réaliser pour optimiser l'usage des différentes énergies.

[28] Calculs pour une personne de 70 kg marchant à 4km/h et roulant à vélo à 16 km/h, basés sur les recherches de McArdle *et al.* (2000), https://www.brianmac.co.uk/energyexp.htm.

Conclusion de la partie 1 :

L'utilisation de l'ACV pour l'évaluation environnementale de la mobilité quotidienne des habitants de l'aire urbaine de Lyon montre clairement que les phases indirectes d'émissions de polluants (fabrication de véhicules, des carburants et des infrastructures) sont non négligeables pour l'ensemble des indicateurs retenus. La contribution de chaque phase du cycle de vie des transports varie en fonction de l'indicateur environnemental suivi. De plus, quel que soit l'indicateur retenu, la contribution des transports en commun n'est pas négligeable (entre 7% et 15%), surtout si elle est mise en relation avec la part modale qu'elle représente (16% des sorties). Ces observations permettent de valider une partie de la première hypothèse formulée.

Hypothèse 1bis : **L'utilisation de l'ACV apporte une vision multicritère et systémique nécessaire pour aborder les enjeux actuels et futurs de la mobilité quotidienne des personnes.**

Dans cette partie, le modèle LUTI SIMBAD, notamment la modélisation transport, a permis de représenter finement les usages du système de transport. L'importance des variables d'usage du système de transport (nombre de sorties, distance parcourue, taux de remplissage) dans les résultats environnementaux appuie l'intérêt d'utiliser un modèle urbain pour réaliser l'évaluation environnementale de la mobilité quotidienne de personnes. Cette observation vient valider une partie de la deuxième hypothèse formulée, même si l'intérêt de modéliser l'interaction transport-urbanisme reste à vérifier.

Hypothèse 2bis : **Le rôle central du système urbain sur la mobilité quotidienne des personnes nous conduit à utiliser un modèle transport-urbanisme pour l'évaluation environnementale de celle-ci.**

Dans cette partie, le couplage SIMBAD-ACV permet d'établir plusieurs éléments de connaissance sur les impacts environnementaux de la mobilité quotidienne des habitants de l'aire urbaine de Lyon. Dans un premier temps, l'utilisation des véhicules personnels représente la majorité des impacts environnementaux associés à la mobilité quotidienne, et ceci indifféremment de l'indicateur observé. De plus pour les voitures, les conditions de circulations et les technologies de motorisation utilisées influencent directement et de façon significative les performances unitaires des véhicules. Cependant, la performance environnementale de la mobilité quotidienne des personnes, dans son ensemble, apparait beaucoup plus sensible aux paramètres d'usage du système de transport qu'aux performances unitaires des véhicules. En

effet, les taux de remplissages des véhicules personnels ou collectifs, les distances parcourues, les parts modales et la fréquence de sorties de ménages sont des facteurs décisifs pour les impacts environnementaux totaux, alors même que ces facteurs sont très variables.

Partie 2 : Les déterminants socio-économiques des impacts environnementaux des ménages

La partie précédente a révélé le rôle central que joue l'usage du système de transport dans le bilan environnemental de la mobilité quotidienne des habitants de l'aire urbaine de Lyon. En utilisant l'ensemble des données disponibles et simulées dans SIMBAD, la méthode SIMBAD-ACV désagrège les différents usages et impacts environnementaux du système de transport au niveau des ménages. Nous avons pu vérifier que les résultats sont cohérents avec ceux de l'EMD lyonnais de 2006 sur laquelle le modèle avait été calibré, et ce même par sous catégories de ménages. Ceci permet dès lors d'envisager de pousser l'analyse des résultats d'évaluation environnementale en fonction des principales caractéristiques socio-économiques des ménages.

L'objectif de cette partie est d'évaluer la capacité de la méthode SIMBAD-ACV à modéliser et évaluer différents comportements de mobilité au niveau des ménages. Pour la situation évaluée, différents usages du système de transport sont estimés pour l'ensemble des ménages de l'aire urbaine de Lyon, aboutissant à des impacts environnementaux variés.

Cette variété est observée, dans un premier temps, par le biais des variables socio-économiques disponibles dans SIMBAD-ACV au niveau des ménages, c'est-à-dire, la taille, le niveau de revenu par unité de consommation, l'âge du chef de ménage, le nombre voitures possédées et le taux d'actif. Dans un deuxième temps, dix catégories de ménages sont proposées pour analyser leurs performances environnementales afin d'illustrer plus clairement la variabilité des comportements et d'impacts environnementaux associés à la mobilité dans l'aire urbaine de Lyon. Pour finir, l'analyse est réalisée par motifs de sorties de domicile afin de relier la performance environnementale et l'usage du système de transport avec la structure d'activités des ménages et de leurs membres (travail, éducation, achat, services, loisirs, accompagnement et autres).

2.1. Analyse par variables socio-économiques des ménages

Au sein du modèle LUTI SIMBAD, les ménages sont décrits par 5 variables socio-économiques et par leur IRIS de localisation. La désagrégation mise en œuvre dans SIMBAD-ACV permet d'associer différentes mobilités, et leurs impacts environnementaux, aux ménages et à leurs caractéristiques socio-économiques. La taille des ménages représente le nombre de personnes dans le ménage. Le niveau de revenu, utilisé dans SIMBAD, correspond à trois classes dont le niveau Bas représente les 20% de la population avec les plus bas revenus par unité de consommation[29], le niveau Haut regroupe les 20% de la population avec les revenus les plus élevés par unité de consommation. Le niveau Moyen regroupe les 60% de la population restant. Le paramètre d'âge du ménage se rapporte à l'âge du chef de ménage découpé en 5 classes. Le taux de motorisation décrit en trois classes les ménages non motorisés, les ménages avec un seul véhicule à disposition et ceux multimotorisés. Le dernier paramètre socio-économique indique le nombre d'actifs au sein du ménage, l'analyse réalisée dans cette partie utilise le taux d'actif dans le ménage, soit le rapport entre le nombre d'actifs et la taille du ménage.

Le Tableau IV-7 présente la répartition démographique en fonction des cinq paramètres socio-économiques des ménages ainsi que les mobilités associées à chaque classe de ménage.

[29] Unité de consommation (UC) : « *Système de pondération attribuant un coefficient à chaque membre du ménage et permettant de comparer les niveaux de vie de ménages de tailles ou de compositions différentes.* » définition de l'INSEE : www.insee.fr/fr/metadonnees/definition/c1802

Tableau IV-7 : Variables de mobilité en fonction des différents paramètres socio-économiques des ménages en 2009

Paramètres du ménage :	Population (personnes)	Nombre de sorties par pers.	%VP	%TC	%MD	Distance parcourue par pers.	%VP	%TC	%MD	Taux de remplissage des VP[30]
Taille du ménage :										
1	265 302	1,42	41%	24%	35%	12,40 km	65%	22%	13%	1,22
2	466 320	1,32	64%	14%	22%	15,29 km	83%	11%	6%	1,20
3	320 841	1,31	66%	15%	19%	17,10 km	83%	12%	5%	1,21
4	389 100	1,34	65%	14%	21%	17,33 km	83%	12%	5%	1,28
5 et plus	311 877	1,44	60%	17%	24%	16,94 km	77%	17%	6%	1,42
Revenu :										
Bas	356 306	1,37	50%	23%	27%	13,46 km	71%	21%	9%	1,33
Moyen	1 039 553	1,36	62%	15%	23%	16,29 km	81%	13%	6%	1,25
Haut	357 581	1,36	65%	13%	22%	17,34 km	84%	10%	6%	1,24
Âge :										
< 30 ans	203 985	1,33	49%	25%	26%	13,33 km	73%	19%	8%	1,18
[30 ; 45[	635 385	1,39	64%	15%	21%	18,08 km	82%	13%	5%	1,27
[45 ; 60[	530 157	1,39	63%	16%	21%	17,32 km	81%	13%	6%	1,24
[60 ; 75[	251 241	1,37	58%	14%	28%	13,28 km	77%	13%	10%	1,31
>= 75 ans	132 673	1,13	51%	16%	34%	9,08 km	71%	16%	14%	1,35
Nombre de voitures :										
0	216 044	1,37	7%	38%	55%	8,00 km	12%	56%	32%	6,27[30]
1	777 360	1,36	64%	15%	22%	14,51 km	82%	12%	6%	1,23
2	760 036	1,35	72%	12%	16%	19,64 km	86%	10%	4%	1,27
Taux d'actif :										
0%	452 307	1,29	50%	18%	31%	11,36 km	72%	17%	12%	1,29
20%	100 108	1,55	56%	17%	27%	16,55 km	73%	19%	8%	1,52
25%	76 208	1,43	60%	15%	25%	15,86 km	78%	15%	7%	1,38
33%	82 881	1,41	59%	18%	23%	16,49 km	77%	17%	6%	1,31
40%	203 246	1,41	62%	16%	22%	17,54 km	78%	16%	6%	1,37
50%	391 550	1,35	65%	14%	20%	17,53 km	83%	12%	5%	1,25
67%	205 140	1,28	70%	13%	17%	17,98 km	86%	10%	4%	1,18
100%	242 001	1,41	63%	17%	20%	18,35 km	83%	12%	5%	1,14

Source : traitement auteur, données SIMBAD

[30] Le taux de remplissage de véhicules personnels est approximé par $\frac{pkm\ passager + pkm\ conducteur}{pkm\ conducteur}$, ce qui peut donner des valeurs élevées pour les ménages, ou les usages, qui ne sont pas motorisés.

Le niveau de mobilité en fonction de la taille du ménage révèle un saut entre les ménages à une personne avec les couples et les familles. En dépit d'un nombre de sorties par jour et par personne important, le recours à la voiture de ces ménages est plus faible avec une part modale de 41% pour les véhicules personnels. La distance parcourue par jour est aussi plus faible pour les personnes habitant seules. Les grandes familles avec plus de 5 personnes présentent la particularité d'avoir un taux de remplissage des voitures plus élevé que les autres ménages moins grands.

Le niveau de revenu du ménage ne révèle pas de disparité en termes de nombre de sorties quotidiennes par personne. En revanche, les ménages modestes se distinguent des catégories plus aisées par un usage de la voiture moins important, des distances parcourues plus faibles et un taux de remplissage des véhicules plus important, ce qui est cohérent avec d'autres études sur l'aire urbaine de Lyon (Paulo, 2006; Pelé, 2018). Le Tableau IV-6 et la Figure IV-10, présentés dans la partie précédentes, soulignent cet écart qui reste présent au sein des trois découpages spatiaux utilisés (centre, couronne, périphérie). La différence entre les deux catégories les plus aisées est plus faible même si les 20% les plus riches de l'aire urbaine de Lyon parcourent des distances plus longues. L'ENTD de 2008 souligne aussi cette croissance de la distance parcourue avec le revenu (CGDD, 2010).

L'analyse de la mobilité en fonction de l'âge du chef de ménages révèle une mobilité plus faible, en distance et en nombre de sorties, chez les ménages de plus de 75 ans. Les ménages entre 30 et 60 ans, qui représentent 66% de la population, présentent les parts modales en véhicules personnels les plus importantes ainsi que des distances parcourues plus longues. Ce déclin de mobilité chez les ménages âgés est généralisé sur le territoire français comme le montre l'ENTD de 2008, qui souligne d'ailleurs que 43% des personnes de plus de 74 ans ne se déplacent pas un jour de semaine donné (CGDD, 2010).

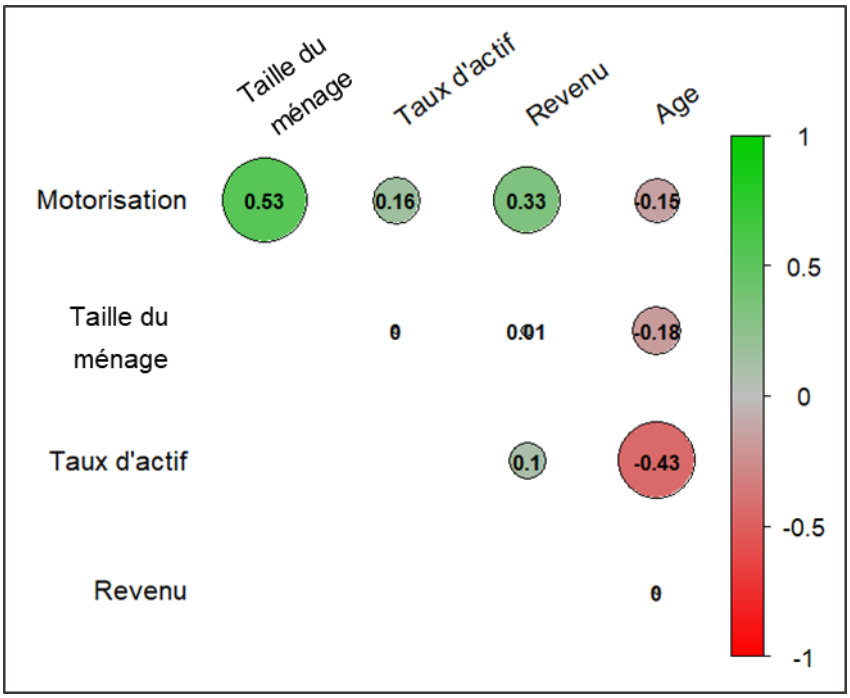
Parmi les cinq paramètres socio-économiques liés aux ménages disponibles, la possession d'un véhicule personnel apparait comme très significative, tout comme d'autres études de mobilité quotidienne (De Witte *et al.*, 2013; Stead & Marshall, 2001). 12% de la population de l'aire urbaine de Lyon ne disposent pas d'un véhicule à son domicile alors que 43% disposent d'au moins deux voitures à son domicile. En 2008, l'ENTD estime qu'en France 19% des ménages ne disposent pas de voiture. Sur l'aire urbaine de Lyon, par personne, les ménages non motorisés parcourent environ deux fois moins de distance par jour pour leur mobilité, tout en gardant un nombre de sorties similaire aux ménages motorisés. Les membres des ménages

multimotorisés du modèle SIMBAD parcourent environ 5 km de plus par jour que ceux ne disposant que d'un seul véhicule, de plus leur part modale pour la voiture est plus forte.

Sur le territoire de l'aire urbaine de Lyon, en 2009, 26% de la population fait partie d'un ménage sans activité. Au sein de cette catégorie de population, le recours à la voiture pour sa mobilité est plus faible et les distances parcourues quotidiennement sont plus courtes. On constate d'ailleurs que les distances se rallongent avec le taux d'activité du ménage, alors que le taux de remplissage des véhicules recule avec cette variable pour atteindre 1,14 passager par véhicule pour les ménages avec un taux d'actif de 100%.

Les résultats de mobilité en fonction des caractéristiques socio-économiques illustrent le fonctionnement du modèle SIMBAD en cohérence avec d'une part l'EMD de Lyon de 2006, à partir de laquelle le modèle est calibré, mais aussi avec d'autres études nationales ou internationales (ENTD 2008, De Witte *et al.*, 2013; Stead & Marshall, 2001). Cependant, l'interprétation des résultats de mobilité, et par la suite les niveaux d'impacts environnementaux, au niveau des ménages en considérant séparément chaque caractéristique socio-économique est complexe du fait de la forte corrélation entre ces cinq variables. La Figure IV-13 présente les coefficients de corrélation des variables socio-économiques des ménages estimés par le modèle SIMBAD.

Figure IV-13 : Matrice de corrélation des variables socio-économiques des ménages en 2009



Source : traitement auteur, données SIMBAD

La méthode de calcul mise en œuvre grâce aux différentes données de SIMBAD a permis aussi d'estimer le niveau des impacts environnementaux pour l'ensemble des ménages de l'aire urbaine de Lyon. Les 10 indicateurs environnementaux calculés par SIMBAD-ACV peuvent donc être reliés aux différentes variables socio-économiques des ménages disponibles. Le Tableau IV-8 synthétise pour chaque variable socio-économique le bilan environnemental par habitant et par jour.

Les résultats présentés montrent l'influence des diverses variables socio-économiques sur le bilan environnemental de la mobilité quotidienne des ménages de l'aire urbaine de Lyon. On observe aussi que les variables socio-économiques ne sont pas source de transfert d'impacts entre les différents enjeux environnementaux, car l'ensemble des indicateurs varient dans le même sens en fonction des différents paramètres disponibles.

Parmi les cinq variables disponibles dans le modèle au niveau des ménages, le taux de motorisation apparait comme très contributif aux impacts environnementaux, puisque les impacts environnementaux sont entre 3,5 et 7 fois plus important pour un membre d'un ménage multimotorisé que pour une personne non motorisée. En effet, dans la méthode SIMBAD-ACV,

la possession de la voiture induit des impacts environnementaux indirects associés à la fabrication des véhicules, de plus le taux de motorisation contribue aussi à une mobilité automobile avec des déplacements plus longs.

Le taux d'actifs dans le ménage apparait aussi comme explicatif du niveau d'impacts environnementaux liés à la mobilité quotidienne puisque l'on observe une croissance des émissions avec l'augmentation de la part d'actifs dans le ménage. Finalement, un membre d'un ménage inactif émet deux fois moins de polluants qu'un membre d'un ménage pleinement actif.

Pour les trois autres paramètres socio-économiques des ménages, il est à remarquer le faible bilan environnemental des personnes âgées, environ deux fois plus faible que la moyenne, lié directement à leur plus faible mobilité. Les distances parcourues plus courtes et l'usage plus faible de la voiture des personnes vivant seules ou avec un bas revenu, observés précédemment, transparaissent dans les impacts environnementaux qui sont entre 20% et 35% plus faibles que la moyenne sur l'ensemble des ménages de l'aire urbaine de Lyon.

Tableau IV-8 : Impacts environnementaux en fonction des différents paramètres socio-économiques des ménages en 2009

Par jour et par habitant	Gaz à effet de serre	Particules <2,5µm	Formation d'ozone	Acidification	Ressource métallique	Occupation du sol	Énergie non renouvelable	Énergie nucléaire	Énergie renouvelable	Énergie primaire
unité	kg CO_2	g $PM_{2,5}$	g COVNM	g SO_2	g Fer	m².an	kWh	kWh	kWh	kWh
Taille :										
1	2,27	1,29	9,67	8,64	231	51,6	9,07	3,40	0,70	13,17
2	3,30	1,85	13,47	12,2	339	74,3	13,27	2,90	0,91	17,08
3	3,69	2,08	15,06	13,67	382	84,3	14,82	3,26	1,02	19,10
4	3,53	2,01	14,52	13,14	368	81,5	14,17	3,22	0,98	18,37
5 et plus	3,03	1,76	12,82	11,50	319	72,9	12,16	3,39	0,88	16,43
Revenu :										
Bas	2,43	1,46	10,86	9,49	250	58,8	9,77	3,25	0,73	13,75
Moyen	3,33	1,88	13,75	12,41	345	75,6	13,37	3,22	0,93	17,52
Haut	3,66	2,02	14,42	13,39	383	84,7	14,76	3,10	1,01	18,87
Âge :										
< 30 ans	2,71	1,54	11,35	10,18	277	60,3	10,83	3,25	0,79	14,87
[30 ; 45[	3,68	2,10	15,19	13,75	384	85,3	14,79	3,50	1,03	19,32
[45 ; 60[	3,59	2,03	14,76	13,37	372	82,4	14,42	3,41	1,01	18,84
[60 ; 75[	2,52	1,43	10,51	9,44	259	58,7	10,15	2,63	0,72	13,50
>= 75 ans	1,59	0,90	6,73	6,01	162	37,2	6,41	1,92	0,46	8,79
Nombre de Voitures :										
0	0,61	0,39	3,71	3,01	59	18,6	2,39	4,09	0,35	6,83
1	3,03	1,71	12,42	11,21	309	66,9	12,14	2,57	0,83	15,54
2	4,15	2,35	16,93	15,41	436	97,2	16,71	3,58	1,14	21,43
Taux d'actif :										
0%	2,09	1,18	8,79	7,87	214	48,2	8,39	2,53	0,61	11,53
20%	2,70	1,58	11,60	10,35	285	66,1	10,84	3,34	0,80	14,98
25%	2,92	1,67	12,24	10,99	304	69,1	11,73	3,02	0,83	15,58
33%	3,16	1,81	13,26	11,93	330	74,9	12,71	3,40	0,91	17,02
40%	3,27	1,89	13,73	12,36	344	78,0	13,12	3,48	0,94	17,54
50%	3,65	2,07	14,98	13,57	379	83,9	14,65	3,31	1,01	18,97
67%	4,07	2,28	16,44	14,98	420	91,8	16,33	3,30	1,11	20,74
100%	4,20	2,35	17,04	15,49	430	92,6	16,82	3,87	1,17	21,86

Source : traitement auteur, données de SIMBAD-ACV

2.2. Analyse par types de ménages

L'analyse de la mobilité des ménages en fonction de leurs variables socio-économiques révèle des usages du système de transport et des impacts environnementaux très variés au sein de l'aire urbaine de Lyon. Cependant, le niveau de corrélation entre les différentes variables utilisées rend l'interprétation des résultats complexe. Afin de contourner ce problème, une typologie de 10 classes de ménages, basée sur les paramètres disponibles, est utilisée pour décrire plus distinctement les résultats de mobilité et environnementaux. Les classes de ménages utilisées sont construites à partir d'autres travaux d'analyse de la mobilité des ménages et intègrent aussi les observations faites par variables lors de la partie précédente (De Witte *et al.*, 2013; Nicolas *et al.*, 2002; Paulo, 2006; Pelé, 2018; Vanco, 2011).

Ces différentes études, basées sur des enquêtes, ont permis de montrer les différentes variables explicatives pour la mobilité quotidienne des personnes, que ce soit au niveau des ménages (Pelé, 2018; Vanco, 2011) ou des individus (Paulo, 2006), parmi l'ensemble des variables socio-économiques déterminant (De Witte *et al.*, 2013). Il en ressort que la taille des ménages et son nombre d'actifs sont deux variables explicatives, de même que l'âge des individus notamment pour les personnes jeunes (inférieur à 25 ans) et âgées (supérieur à 75 ans). La motorisation du ménage apparait aussi comme un facteur déterminant de la mobilité, notamment pour le choix modal, même si le taux de motorisation s'explique grandement avec la taille, le revenu et la localisation du ménage (Paulo, 2006; Pelé, 2018).

À partir de ces variables explicatives fortes de la mobilité quotidienne, nous proposons une typologie dans le but d'illustrer la variabilité de mobilité et d'impacts environnementaux associés aux variables socio-économiques. Ainsi, dans cette typologie, les aspects spatiaux ne sont pas pris en considération directement. Le croisement entre cette typologie de ménages et les caractéristiques spatiales sera présenté dans la partie 3.3. Chaque classe de ménages utilisée regroupe au minimum 5% de la population totale de l'aire urbaine de Lyon en 2009.

- *Retraité > 75ans* : ménages dont l'âge de la personne de référence est supérieur ou égal à 75 ans.
- *Seul inactif* : ménages d'une personne, dont l'âge est inférieur à 75 ans, qui ne possèdent pas d'activité.
- *Couple / Famille inactif* : ménages de deux personnes ou plus, dont l'âge de la personne de référence est inférieur à 75 ans, qui ne possèdent pas d'activité.

- *Seul actif* : ménages d'une personne, dont l'âge est inférieur à 75 ans, qui exercent une activité.
- *Couple 1 actif* : ménages de deux personnes, dont l'âge de la personne de référence est inférieur à 75 ans, qui possède qu'un seul actif.
- *Couple biactif* : ménages de deux personnes actives, dont l'âge de la personne de référence est inférieur à 75 ans.
- *Famille sans ou un véhicule* : ménages de trois personnes et plus, dont l'âge de la personne de référence est inférieur à 75 ans, qui possède un véhicule au plus.
- *Famille de 3 personnes multimotorisée* : ménages de trois personnes, dont l'âge de la personne de référence est inférieur à 75 ans, qui possèdent deux véhicules ou plus.
- *Famille de 4 personnes multimotorisée* : ménages de quatre personnes, dont l'âge de la personne de référence est inférieur à 75 ans, qui possèdent deux véhicules ou plus.
- *Famille de 5+ personnes multimotorisée* : ménages de cinq personnes et plus, dont l'âge de la personne de référence est inférieur à 75 ans, qui possèdent deux véhicules ou plus.

Le Tableau IV-9 synthétise pour chacune de ces 10 catégories les variables socio-économiques correspondantes ainsi que les pratiques de mobilité qui sont réalisées. L'âge moyen est estimé en considérant les valeurs médianes des cinq classes d'âge présentes dans le modèle SIMBAD, c'est-à-dire 25 ans, 37 ans, 52 ans, 67 ans et 80 ans. Le revenu moyen est estimé en remplaçant les catégories Bas, Moyen et Haut par les valeurs 1,2 et 3.

Tableau IV-9 : Variables socio-économiques et de mobilité des différentes catégories de ménages en 2009

	Population (habitants)	Taille	Âge moyen	Revenu	Voiture	Ratio d'actif	Nombre de Sorties	%VP	%TC	%MD	Distance	%VP	%TC	%MD	Taux de remplissage
Retraité >75ans	132 673	1,48	80	1,89	0,71	4%	1,13	51%	16%	34%	9,08 km	71%	16%	14%	1,35
Seul inactif	83 039	1	51,3	1,83	0,43	0%	1,54	28%	27%	44%	9,86 km	45%	32%	22%	1,45
Couple/Famille inactif	146 935	2,18	60,5	2,03	1,06	0%	1,25	59%	14%	27%	11,00 km	77%	13%	10%	1,35
Seul actif	130 932	1	39,4	2,02	0,72	100%	1,48	52%	22%	26%	16,23 km	75%	17%	8%	1,16
Couple 1 actif	110 666	2	48,7	2,06	1,14	50%	1,4	60%	16%	23%	16,21 km	79%	14%	7%	1,24
Couple biactif	165 844	2	39,9	2,13	1,35	100%	1,35	71%	13%	15%	19,82 km	88%	8%	4%	1,13
Famille sans ou un véhicule	381 608	3,88	43,6	1,76	0,91	46%	1,38	54%	19%	27%	13,79 km	74%	18%	8%	1,29
Famille de 3 personnes multimotorisée	164 166	3	44,2	2,32	2	60%	1,3	75%	11%	15%	20,20 km	88%	9%	3%	1,2
Famille de 4 personnes multimotorisée	251 540	4	43,2	2,15	2	45%	1,35	71%	12%	17%	19,60 km	85%	11%	4%	1,28
Famille de 5+ personnes multimotorisée	186 038	5,56	43,5	2,02	2	34%	1,44	66%	15%	19%	19,24 km	80%	15%	5%	1,41

Source : traitement auteur, données SIMBAD

L'analyse des mobilités par catégories de ménages montre des pratiques de mobilités très contrastées entre les différents ménages. La typologie choisie révèle une variabilité significative du nombre de sorties réalisées par personnes entre les différentes catégories, contrairement à la typologie de la partie précédente croisant revenu et localisation (Figure IV-10). Les retraités sont moins mobiles, alors que les personnes vivant seules et sans activité sont les plus mobiles, en matière de sorties quotidiennes. Cependant, ces deux catégories de ménages sont les seules à parcourir moins de 10 km par jour et par personne pour leur mobilité, les personnes seules sans activité utilisant majoritairement les modes doux pour leurs déplacements.

Les ménages parcourant le plus de distance par jour et par personne pour leur mobilité quotidienne sont les familles possédant plusieurs véhicules et les couples biactifs. Ces ménages parcourent en moyenne plus de 19 km par personne et par jour. Les couples biactifs, ainsi que les actifs seuls, se distinguent des autres catégories de ménages par leurs taux de remplissage faibles, moins de 1,2 personne par véhicule. L'analyse de l'EMD de 2006 de l'aire urbaine de Lyon révèle une hiérarchie de ces catégories similaire, en ce qui concerne les distances parcourues par jour et par personne.

La mise en œuvre de SIMBAD-ACV et de la désagrégation des impacts au niveau des ménages a permis de réaliser les différents bilans environnementaux pour les 10 catégories de ménages. Le Tableau IV-10 présente, pour les 10 indicateurs d'ACV, les niveaux d'impacts environnementaux de chacune des catégories.

Tableau IV-10 : Impacts environnementaux des différentes catégories de ménages en 2009

Par jour et par habitant :	Gaz à effet de serre	Particules <2,5µm	Formation d'ozone	Acidification	Ressource métallique	Occupation du sol	Énergie non renouvelable	Énergie nucléaire	Énergie renouvelable	Énergie primaire
unité	kg CO_2	g $PM_{2,5}$	g COVNM	g SO_2	g Fer	m^2.an	kWh	kWh	kWh	kWh
Retraité >75ans	1,59	0,9	6,73	6,01	162	37,2	6,41	1,92	0,46	8,79
Seul inactif	1,29	0,75	5,98	5,19	131	31,5	5,15	3,2	0,46	8,81
Couple/Famille inactif	2,01	1,14	8,43	7,54	207	47,1	8,12	2,07	0,57	10,77
Seul actif	3,42	1,92	14,18	12,81	349	75,9	13,69	4,11	1	18,8
Couple 1 actif	3,33	1,88	13,78	12,44	344	76,5	13,39	3,31	0,94	17,64
Couple biactif	4,75	2,65	19,08	17,41	488	104,5	19,07	3,68	1,29	24,04
Famille sans ou un véhicule	2,6	1,49	10,97	9,79	265	58,5	10,38	2,79	0,74	13,91
Famille de 3 personnes multimotorisée	4,55	2,56	18,33	16,75	475	105	18,32	3,63	1,24	23,19
Famille de 4 personnes multimotorisée	4,07	2,32	16,68	15,15	428	95,4	16,4	3,58	1,13	21,1
Famille de 5+ personnes multimotorisée	3,55	2,06	14,84	13,42	378	86,5	14,27	3,81	1,02	19,09

Source : traitement auteur, données de SIMBAD-ACV

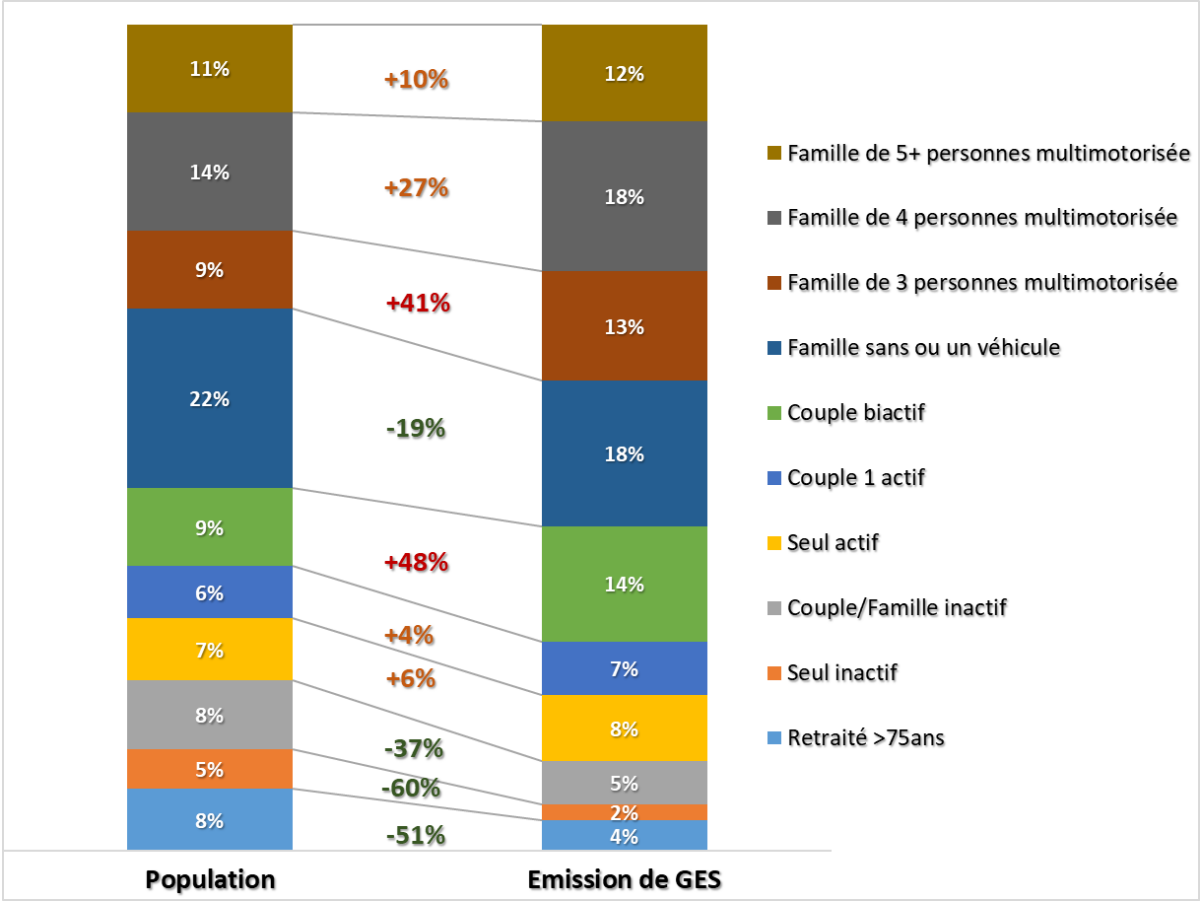
Les impacts environnementaux des ménages parcourant le moins de distance par jour et par personne (retraités et seul inactif) sont les plus faibles. De façon symétrique, les ménages parcourant les plus grandes distances par personne apparaissent comme les plus émetteurs par personne. Les conclusions sont identiques pour l'ensemble des indicateurs avec très peu de transferts d'impacts entre les 10 enjeux environnementaux présentés. Cependant, on observe que l'usage d'énergie primaire nucléaire dépend pour partie de l'utilisation des transports en commun, c'est pourquoi les personnes seules inactives présentent un usage de cette énergie supérieur à d'autres catégories moins utilisatrices de ces transports.

La distance parcourue par jour et par personne ne suffit pas à expliquer les différents niveaux d'émissions des ménages. En effet, le rapport émissions par distance varie significativement, par exemple les émissions de GES par pkm fluctuent entre 131 et 240 g de CO_2-eq / pkm, soit presque le double. La comparaison des catégories « couple biactif » et « Famille de 5+ personnes multimotorisée » illustre clairement cette observation puisqu'à distance parcourue par personne et par jour équivalente (respectivement 19,8 et 19,2 km), les émissions sont entre 21% et 34% plus importantes par personne pour les couples biactifs, du fait notamment de leurs faibles taux de remplissage des voitures.

Les deux tableaux précédents montrent la grande diversité d'usage du système de transport qui existe sur l'aire urbaine de Lyon en fonction des caractéristiques socio-économiques des ménages et de leur cycle de vie. Cette variété se traduit, en niveau environnemental, par des niveaux d'émissions très contrastés, avec certaines catégories émettant au-delà de trois fois plus que d'autres.

La Figure IV-14 synthétise la contribution des différentes classes de ménages de l'aire urbaine de Lyon pour leur mobilité quotidienne en termes d'émissions de GES, au regard de leurs poids démographiques. Cette représentation permet de replacer l'ensemble de catégories dans le contexte global et stratégique de l'aire urbaine, plutôt que dans une analyse centrée sur chaque type de ménage. La méthode SIMBAD-ACV estime donc que 57% des émissions de GES proviennent des couples biactifs et des familles avec au moins deux véhicules, alors qu'ils ne représentent que 44% de la population de l'aire urbaine de Lyon en 2009.

Figure IV-14 : Poids démographique et contribution aux émissions de GES des différentes catégories de ménages

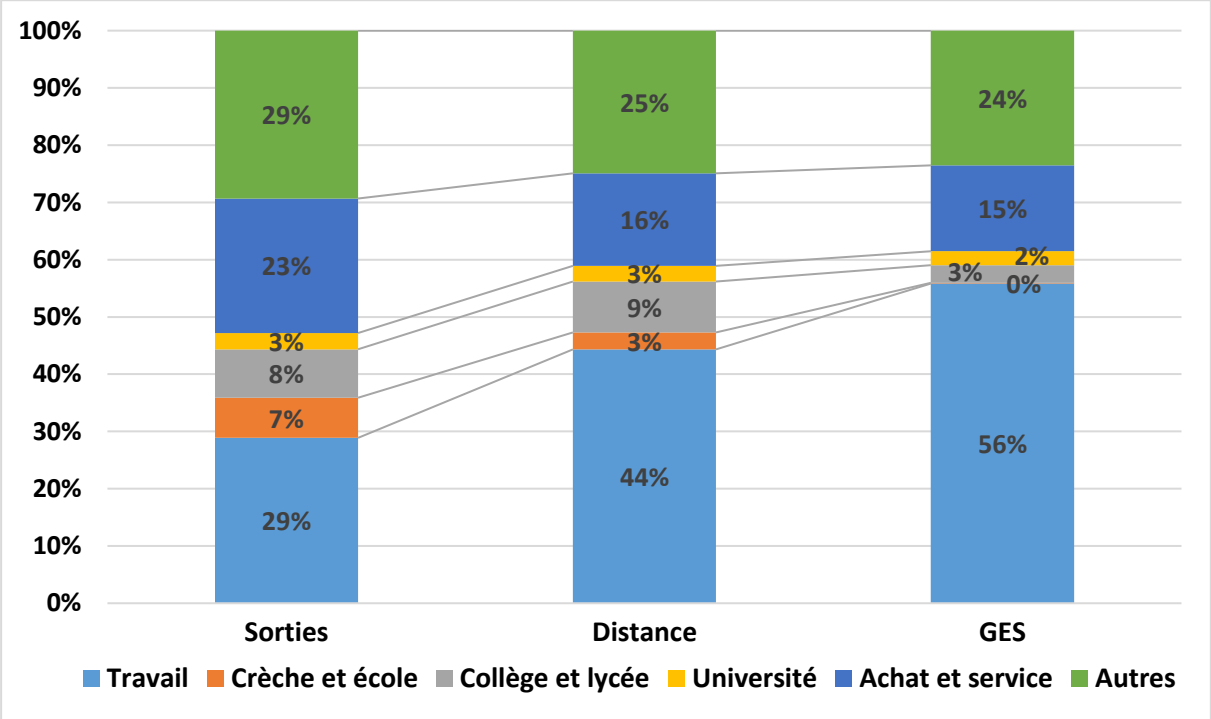


Source : traitement auteur, données de SIMBAD-ACV

2.3. Analyse par motifs de déplacements

L'analyse des pratiques de mobilité et des impacts environnementaux afférents en fonction des paramètres et des catégories socio-économiques des ménages a révélé une grande hétérogénéité sur le territoire, amenant à s'interroger sur la structure d'activités liées aux différentes mobilités simulées dans SIMBAD-ACV. Le modèle SIMBAD repose sur une répartition des sorties de ménages en six motifs différents (Travail / Achat et Service / Crèche et École primaire / Collège et Lycée / Université / Autres (regroupant loisirs / accompagnement et les autres motifs potentiels)). Pour chaque ménage du modèle, le nombre de sorties par motif est estimé permettant ainsi de réaliser une analyse par motifs des pratiques de mobilité et des impacts environnementaux liés. La Figure IV-15 présente la répartition générale des sorties de ménages, des distances parcourues et des émissions de GES en fonction des différents motifs simulés.

Figure IV-15 : Répartition par motifs des sorties de ménages, de la distance parcourue et des émissions de GES

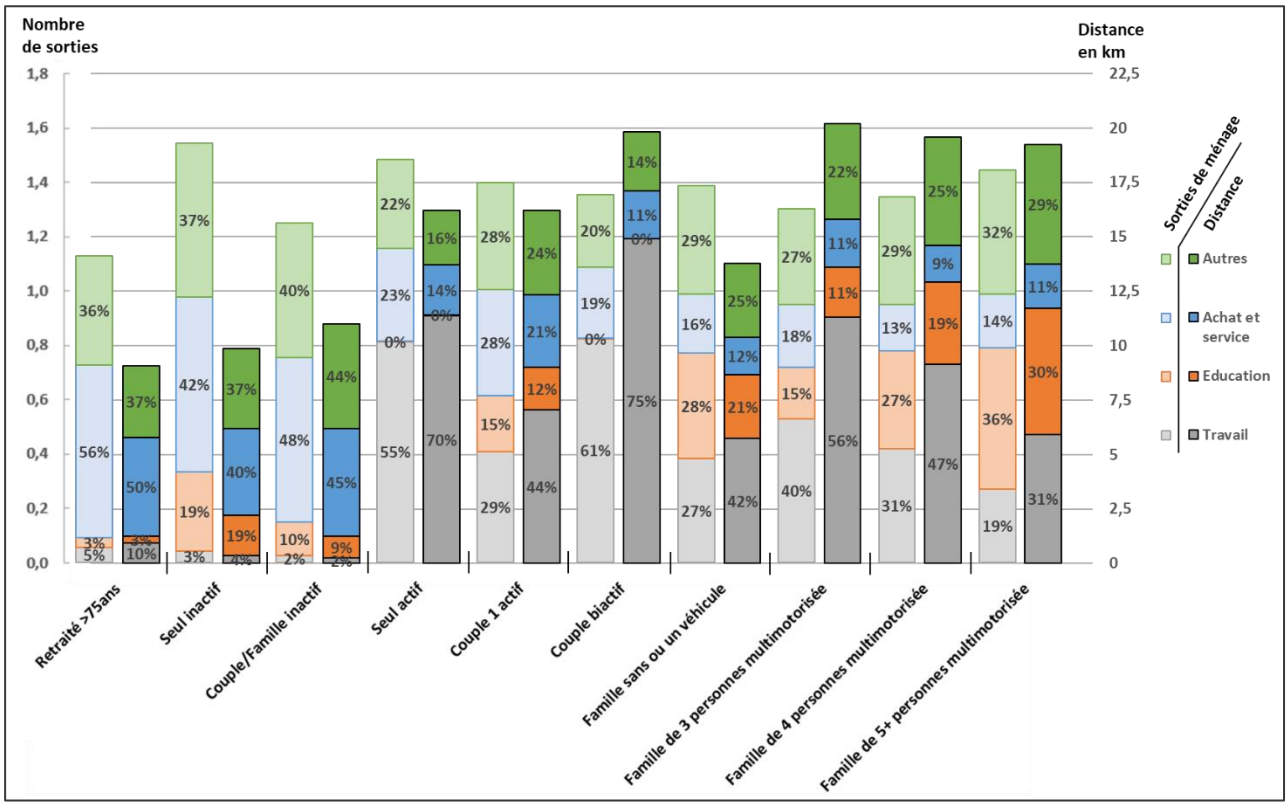


Source : traitement auteur, données de SIMBAD-ACV

Pour l'aire urbaine de Lyon de 2009, aucun des six motifs de déplacement ne prédomine dans la répartition des sorties des ménages. Cependant, les déplacements pour le travail s'avèrent significativement plus longs et plus émetteurs de GES que les déplacements pour d'autres motifs. Dans le bilan carbone de la mobilité quotidienne de l'aire urbaine de Lyon, les déplacements liés au travail représentent 56% des émissions totales de GES. À l'opposé, les déplacements liés à l'éducation, représentant 18% des sorties des ménages, ne contribuent qu'à hauteur de 5% aux émissions de GES.

Afin d'illustrer la variété de structure d'activité sur l'aire urbaine de Lyon entre les différentes catégories de ménages, la Figure IV-16 présente la répartition par motifs des sorties et des distances parcourues par les 10 catégories construites précédemment.

Figure IV-16 : Profils d'activités en nombre de sorties et en distance par habitant des différentes catégories de ménages en 2009



Source : traitement auteur, données SIMBAD pour 2009

La description des motifs de déplacement de la Figure IV-16, révèle des structures d'activités très diverses entre les différentes catégories de ménages. Par exemple, les ménages inactifs ou retraités réalisent plus de sorties pour leurs achats, leurs besoins de services ou pour

des motifs autres que les autres ménages pour lesquels les déplacements contraints (travail et éducation) représentent la majorité de leurs sorties.

La variation entre le nombre de sorties par motif et les distances parcourues découle de pratiques de mobilité différentes en fonction de chacun des motifs simulés dans SIMBAD. Le Tableau IV-11 présente le nombre de sorties moyen par personne, les parts modales, les distances moyennes d'une sortie et le taux de remplissage des véhicules personnels en fonction des quatre motifs principaux (l'*Éducation* regroupe *crèche et école*, *collège et lycée* et *université*).

Tableau IV-11 : Variables de mobilité liées aux motifs de sorties en 2009 dans l'aire urbaine de Lyon

		Part modale				
	Sorties par habitant	Voiture	Transport en commun	Modes doux	Distance par sortie	Taux remplissage des voitures
Travail	0,39	74%	16%	10%	18,0 km	1,07
Education	0,25	33%	32%	35%	9,3 km	4,51[30]
Achat et service	0,32	62%	10%	27%	8,1 km	1,35
Autres	0,40	62%	12%	27%	10,0 km	1,34

Source : traitement auteur, données SIMBAD pour 2009

À travers le modèle SIMBAD et la méthode de désagrégation mise en œuvre, on observe des pratiques clairement différentes par motifs. Les sorties associées au travail apparaissent comme plus longues et plus dépendantes de la voiture, alors que les autres motifs de déplacement présentent une part modale en modes doux plus significative, supérieure à 27%. Le taux de remplissage des véhicules personnels varie grandement d'un motif à l'autre, avec un taux très faible pour les déplacements domicile-travail. Les forts taux de remplissage associés à l'éducation sont liés à la faible présence de conducteurs pour ce motif, les conducteurs accompagnants sont associés au motif d'accompagnement inclus dans *Autres*.

Les impacts environnementaux moyens par habitant associés à chacun de ces quatre motifs sont présentés dans le Tableau IV-12 :

Tableau IV-12 : Impacts environnementaux de la mobilité quotidienne par habitant répartie par motifs

Par habitant	GES	PM2,5	Ozone	Acide	Métaux	Sol	Non-Renouv.	Nucléaire	Renouv.	Énergie primaire
unité	kg CO_2	g $PM_{2,5}$	g COVNM	g SO_2	g Fer	m².an	kWh	kWh	kWh	kWh
Travail	1,79	1,00	7,22	6,58	184,3	39,1	7,17	1,38	0,48	9,03
Education	0,18	0,12	0,94	0,82	21,7	5,7	0,69	0,72	0,08	1,48
Achat et service	0,48	0,27	2,01	1,80	49,6	11,2	1,94	0,46	0,13	2,53
Autres	0,76	0,43	3,11	2,80	77,7	17,2	3,03	0,67	0,21	3,91

Source : traitement auteur, données de SIMBAD-ACV

Les résultats d'ACV alloués par motifs ne montrent pas de transfert d'impacts environnementaux entre les différents indicateurs calculés. La répartition des émissions de GES, présentée en Figure IV-15 (Travail 56%, Éducation 6%, Achat et service 15% et Autres 24%), est identique pour les autres enjeux environnementaux.

Les résultats d'émissions de GES ramenés aux distances parcourues (pkm) indiquent une plus faible efficacité des déplacements domicile-travail, environ 254 g CO_2-eq / pkm contre 202 g CO_2-eq /pkm en moyenne tous motifs confondus. Ces résultats globaux et par pkm en fonction des motifs de déplacement sont cohérents avec d'autres études réalisées à partir d'EMD. Notamment la thèse de Le Féon (2014) qui estime, pour la mobilité quotidienne des habitants de l'aire urbaine de Saint-Étienne, à 232 g CO_2-eq /pkm les émissions de GES liées aux déplacements vers le travail, contre 184 g CO_2-eq en moyenne. La répartition des émissions de GES par motif montre aussi la place importante que représentent les autres motifs que le travail, puisque le travail ne représente que 47% des émissions de GES de son étude.

L'analyse environnementale par motif montre l'intérêt de considérer l'ensemble des motifs de déplacements plutôt que de réduire le périmètre d'étude à la mobilité alternante comme cela est souvent réalisé en considérant que ce sont des déplacements longs et souvent motorisés et qui représentent l'essentiel des enjeux environnementaux liés à la mobilité quotidienne. La répartition par motif permet aussi une meilleure compréhension des pratiques de mobilité observées au niveau des différentes catégories de ménages.

Conclusion de la partie 2 :

Les résultats d'ACV obtenus lors de l'évaluation du système de transport ont été désagrégés, grâce aux différentes données disponibles dans le modèle SIMBAD, au niveau le plus fin disponible des ménages. Cette partie a permis de présenter différentes analyses réalisables par SIMBAD-ACV à un niveau semi-agrégé par grands types de ménages en fonction de leurs caractéristiques socio-économiques, contribuant à une meilleure compréhension systémique des enjeux environnementaux de la mobilité quotidienne des personnes. Cependant, de nombreux paramètres spatiaux viennent contraindre le système de transports, les ménages et leurs activités, en jouant par exemple sur les tracés des infrastructures de transports, la localisation des ménages et celle des activités (entreprises, commerces …). L'usage du sol et son impact sur les enjeux environnementaux de la mobilité quotidienne mériteraient donc d'être intégrés afin d'améliorer l'approche systémique mise en œuvre.

Dans cette partie, les trois niveaux d'analyse menés sur les usages du système de transport montrent une grande variété de pratiques de mobilité entre les ménages et suivant les motifs. Les usages simulés par le modèle SIMBAD sont cohérents avec les observations et les analyses réalisées dans l'EMD de Lyon en 2006, qui a servi au calibrage du modèle, ainsi qu'avec d'autres enquêtes et études menées sur d'autres territoires (autres EMD et ENTD 2008). Au vu des usages très variés du système de transport par les différents types de ménages de l'aire urbaine de Lyon, on observe des impacts environnements très hétérogènes entre les ménages et les motifs de déplacements. Cependant, on observe une variabilité très faible entre les différents enjeux environnementaux estimés en réalisant des analyses au niveau des ménages.

À travers les différentes analyses de cette partie, la méthode SIMBAD-ACV a montré sa capacité à élargir l'analyse environnementale de la mobilité quotidienne des personnes au-delà du système de transport en intégrant les ménages comme objets d'évaluation. Ainsi, l'évaluation environnementale s'enrichit avec de nouvelles clés de répartition des impacts, par exemple par catégories de ménages (Figure IV-14) ou par motifs de déplacements (Figure IV-15), qui pourront être réutilisées lors des simulations réalisées ultérieurement.

Partie 3 : Analyse spatiale des impacts environnementaux

La méthode SIMBAD-ACV a montré dans les deux parties précédentes sa capacité à analyser les impacts environnementaux de la mobilité quotidienne des habitants de l'aire urbaine de Lyon et leurs relations avec les aspects technologiques et socio-économiques de cette mobilité. L'objectif de cette partie est donc d'évaluer la capacité de SIMBAD-ACV à représenter et évaluer les différents mécanismes associés à l'usage du sol et à la répartition des acteurs qui influent sur la mobilité quotidienne et ses impacts environnementaux.

La première partie d'analyse spatialise les niveaux d'impacts environnementaux d'ACV en fonction du lieu de résidence des ménages ainsi qu'en fonction des zones attractives de l'aire urbaine de Lyon. La variabilité spatiale ainsi représentée sera ensuite mise en relation, dans un premier temps, avec les différentes pratiques de mobilités associées aux IRIS, puis dans un deuxième temps, avec les caractéristiques de forme urbaine. Pour finir, la spatialisation de la pollution locale sur l'aire urbaine de Lyon, mise en œuvre séparément dans SIMBAD-ACV, va permettre d'identifier les zones où les émissions directes sont effectuées et de déterminer les principales populations exposées.

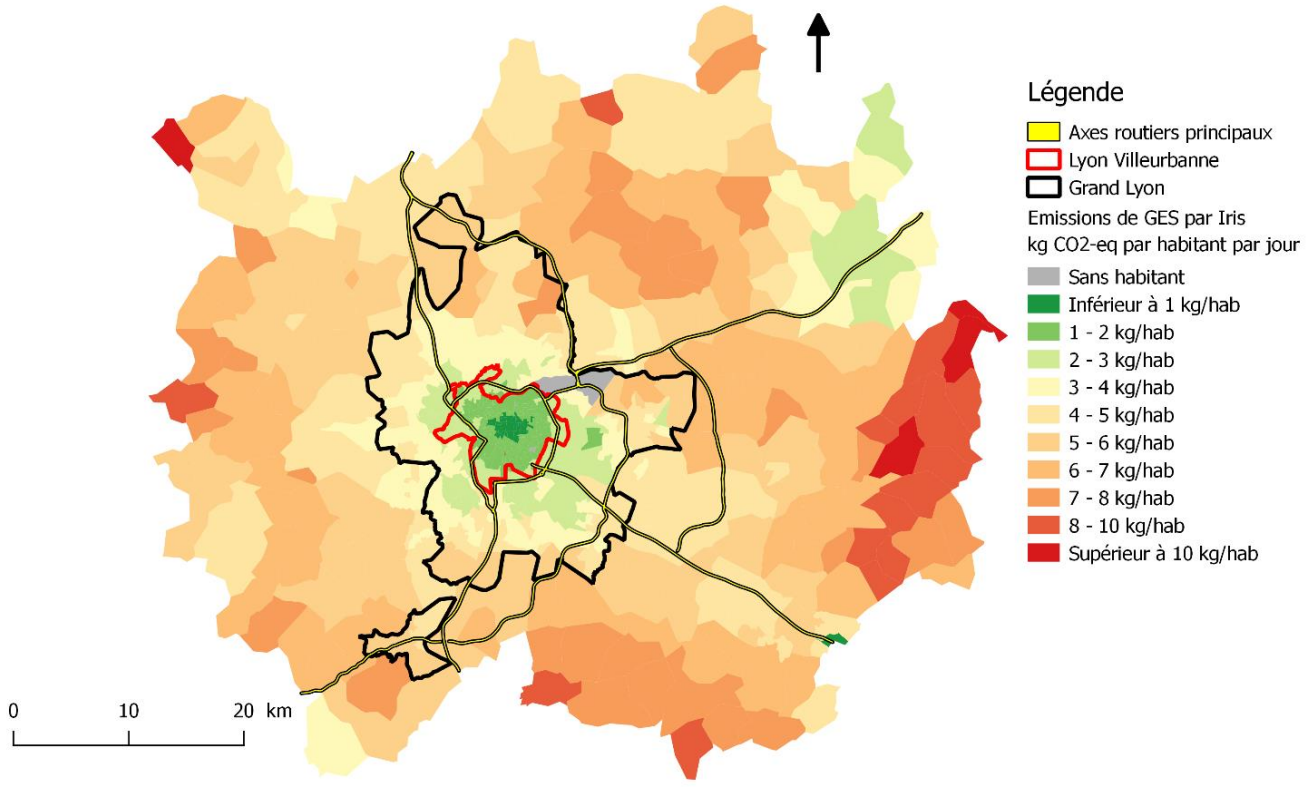
3.1. Localisation des émetteurs, deux approches possibles

L'utilisation des matrices Origines/Destinations, associées aux sorties des ménages, du modèle SIMBAD, permet d'estimer directement les différents impacts environnementaux en fonction des IRIS de résidence des ménages. De façon parallèle, ces matrices ont été utilisées pour estimer les impacts environnementaux en fonction des IRIS de destination des sorties de domicile.

3.1.1. Les zones émettrices, en fonction des résidences

La population et les ménages se répartissent dans les 777 IRIS de l'aire urbaine de Lyon (Figure III-4) et leurs niveaux d'impacts environnementaux sont calculés de façon distincte pour chacun de ces IRIS. La Figure IV-17 représente le niveau d'émissions de GES par habitant des 777 IRIS modélisés.

Figure IV-17 : Niveaux d'émissions de GES à l'IRIS associés à la mobilité quotidienne des habitants de l'aire urbaine de Lyon en 2009



Source : traitement auteur, données de SIMBAD-ACV

Dans l'aire urbaine de Lyon en 2009, on constate une grande hétérogénéité des impacts associés à la mobilité des territoires. Les émissions de GES par habitant sont les plus faibles pour les résidents du centre de l'aire urbaine alors que ceux des zones extérieures au Grand-Lyon éloignées des grands axes routiers ont des taux d'émissions par habitant beaucoup plus

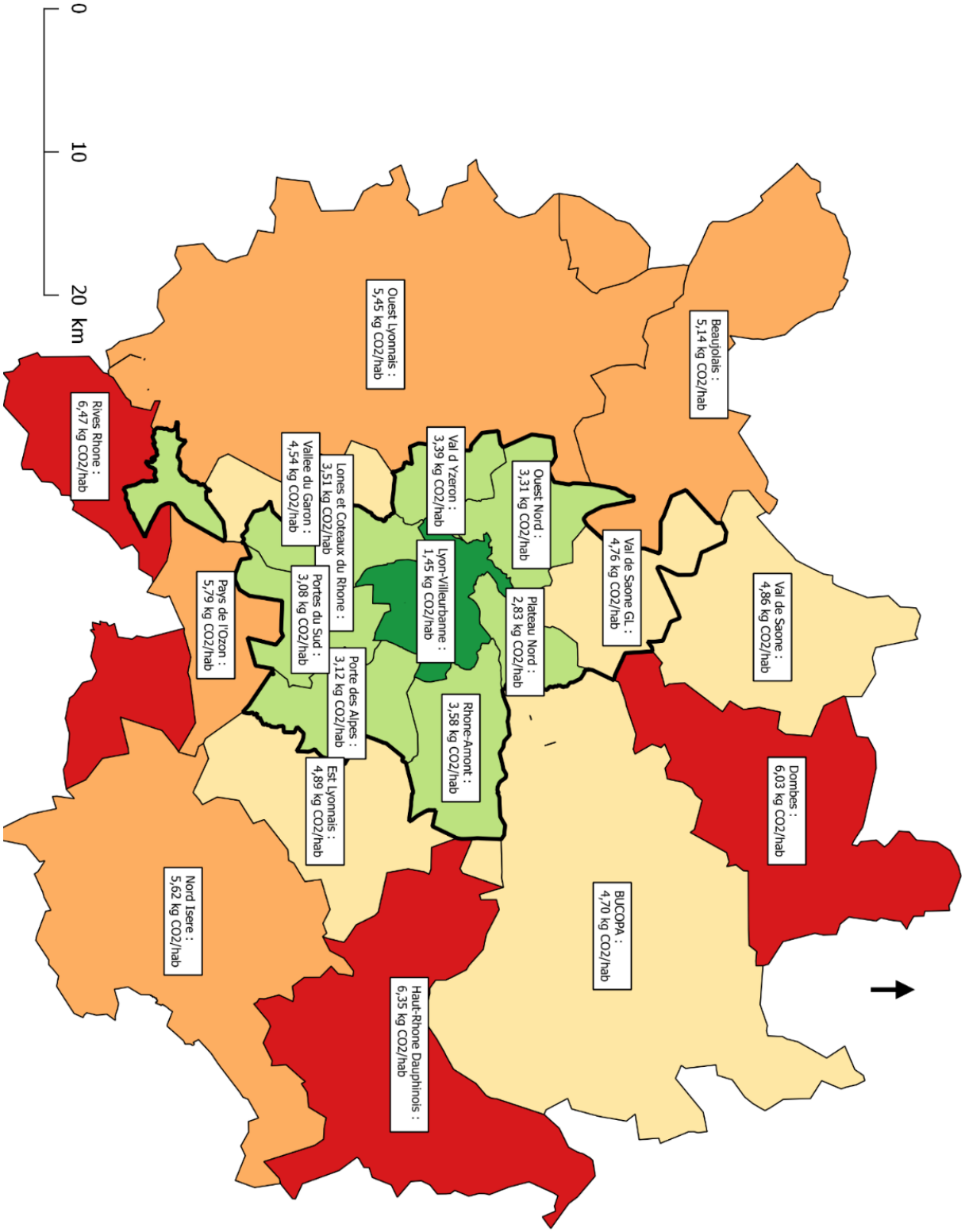
importants. La majorité des IRIS de l'aire urbaine de Lyon possèdent un taux moyen d'émissions de GES par habitant supérieur à la moyenne sur l'ensemble du territoire (3,22 kg CO2-eq / hab), seulement 8% de la surface de l'aire urbaine est en dessous de cette valeur moyenne.

On observe aussi, dans certains IRIS particuliers, l'influence des hypothèses de modélisation et d'analyse de la méthode SIMBAD-ACV : en effet, les zones situées en bordure de périmètre d'étude sont sujettes à des effets de bords liés aux choix de modélisation réalisés dans SIMBAD pour représenter les interactions de l'aire urbaine avec l'extérieur. Par ailleurs, d'un point de vue statistique, certaines valeurs par IRIS sont peu fiables du fait de la faible population présente : une vingtaine d'IRIS possède moins de 100 habitants.

Le choix du niveau de découpage territorial à réaliser apparait donc essentiel. Afin de remédier à certains des problèmes d'analyse et pour rattacher les différents niveaux d'impacts environnementaux à des territoires de décisions, un découpage agrégé en 20 zones est proposé. Dans le périmètre du Grand-Lyon, 9 territoires ont été choisis, correspondant aux 9 conférences des Maires du Grand-Lyon. Ces territoires ont été mis en place afin de faciliter les mises en œuvre locales d'actions métropolitaines ainsi que pour procéder à des consultations locales pour l'élaboration des politiques Métropolitaines[31]. Le reste de l'aire urbaine se partage entre trois communautés de communes (Vallée du Garon, Pays de l'Ozon et Est Lyonnais) et les 8 SCoTs qui intersectent l'aire urbaine de Lyon (Figure III-3). La Figure IV-18 et le Tableau IV-13 présentent les niveaux d'impacts environnementaux par habitant et par jour de ce découpage.

[31] Les instances territoriales de la Métropole de Lyon : www.grandlyon.com/metropole/les-instances-territoriales.html

Figure IV-18 : Niveaux d'émissions de GES par habitant suivant le découpage en 20 zones de l'aire urbaine de Lyon



Source : traitement auteur, données de SIMBAD-ACV

Tableau IV-13 : Impacts environnementaux des habitants suivant le découpage en 20 zones

	Par jour et par habitant	Population	GES	$PM_{2,5}$	Ozone	Acide	Métaux	Sol	Non-Renouv.	Nucléaire	Renouv.	Énergie primaire
	Unités	habitants	kg CO_2	g $PM_{2,5}$	g COVNM	g SO_2	g Fer	m².an	kWh	kWh	kWh	kWh
	Lyon-Villeurbanne	642 410	1,46	0,81	6,16	5,45	143	29,2	5,7	1,93	0,43	8,05
Grand Lyon	Plateau Nord	77 542	2,83	1,57	11,7	10,55	276	60,5	11,15	2,79	0,78	14,72
Grand Lyon	Rhône-Amont	97 657	3,59	2	14,81	13,27	357	76	14,17	2,85	0,96	17,98
Grand Lyon	Porte des Alpes	97 869	3,13	1,77	13,04	11,62	317	66,9	12,35	2,83	0,86	16,04
Grand Lyon	Portes du Sud	92 762	3,09	1,76	12,98	11,51	314	65	12,13	3,41	0,88	16,42
Grand Lyon	Lones et Coteaux du Rhône	125 028	3,52	1,96	14,21	12,99	353	76,6	13,91	3,36	0,97	18,25
Grand Lyon	Val d'Yzeron	52 482	3,4	1,86	13,55	12,4	336	73,6	13,49	2,63	0,91	17,03
Grand Lyon	Ouest Nord	50 277	3,32	1,83	13,44	12,25	332	74,2	13,18	2,93	0,91	17,02
Grand Lyon	Val de Saône GL	45 266	4,76	2,71	19,44	17,78	499	116	19,16	5,18	1,35	25,69
Grand Lyon	Grand Lyon	691 851	3,53	1,97	14,43	13,04	356	78	14,12	2,96	0,97	18,04
Périphérie	BUCOPA	68 842	4,7	2,75	19,74	17,85	513	119	19,1	5,14	1,35	25,59
Périphérie	Haut-Rhône Dauphinois	43 828	6,35	3,61	26,12	23,59	675	153	25,88	4,14	1,68	31,7
Périphérie	Est Lyonnais	35 940	4,9	2,74	19,48	17,8	506	107	19,6	2,87	1,27	23,75
Périphérie	Nord Isère	86 528	5,63	3,26	23,15	21,07	606	132	22,64	4,94	1,56	29,14
Périphérie	Pays de l'Ozon	22 656	5,8	3,25	22,38	21	606	122	23,05	4,03	1,55	28,63
Périphérie	Rives Rhône	17 094	6,47	3,76	26,91	24,51	702	162	26,22	6,72	1,84	34,78
Périphérie	Vallée du Garon	26 927	4,55	2,57	18,62	16,86	472	107	18,2	3,16	1,21	22,57
Périphérie	Ouest Lyonnais	90 566	5,45	3,15	22,69	20,52	591	140	22,26	4,9	1,51	28,67
Périphérie	Beaujolais	38 935	5,15	3,15	21,16	19,94	598	139	20,68	8,92	1,65	31,26
Périphérie	Val de Saône	27 120	4,86	2,8	20,37	18,21	524	127	20,01	3,57	1,3	24,88
Périphérie	Dombes	13 711	6,03	3,78	25,2	23,69	721	171	24,29	11,41	1,98	37,67
Périphérie	Périphérie	419 179	5,39	3,14	22,32	20,31	586	135	21,84	5,31	1,52	28,67
	Aire urbaine de Lyon	1 753 440	3,22	1,83	13,3	12,02	333	74,1	12,92	3,2	0,91	17,03

Source : traitement auteur, données de SIMBAD-ACV

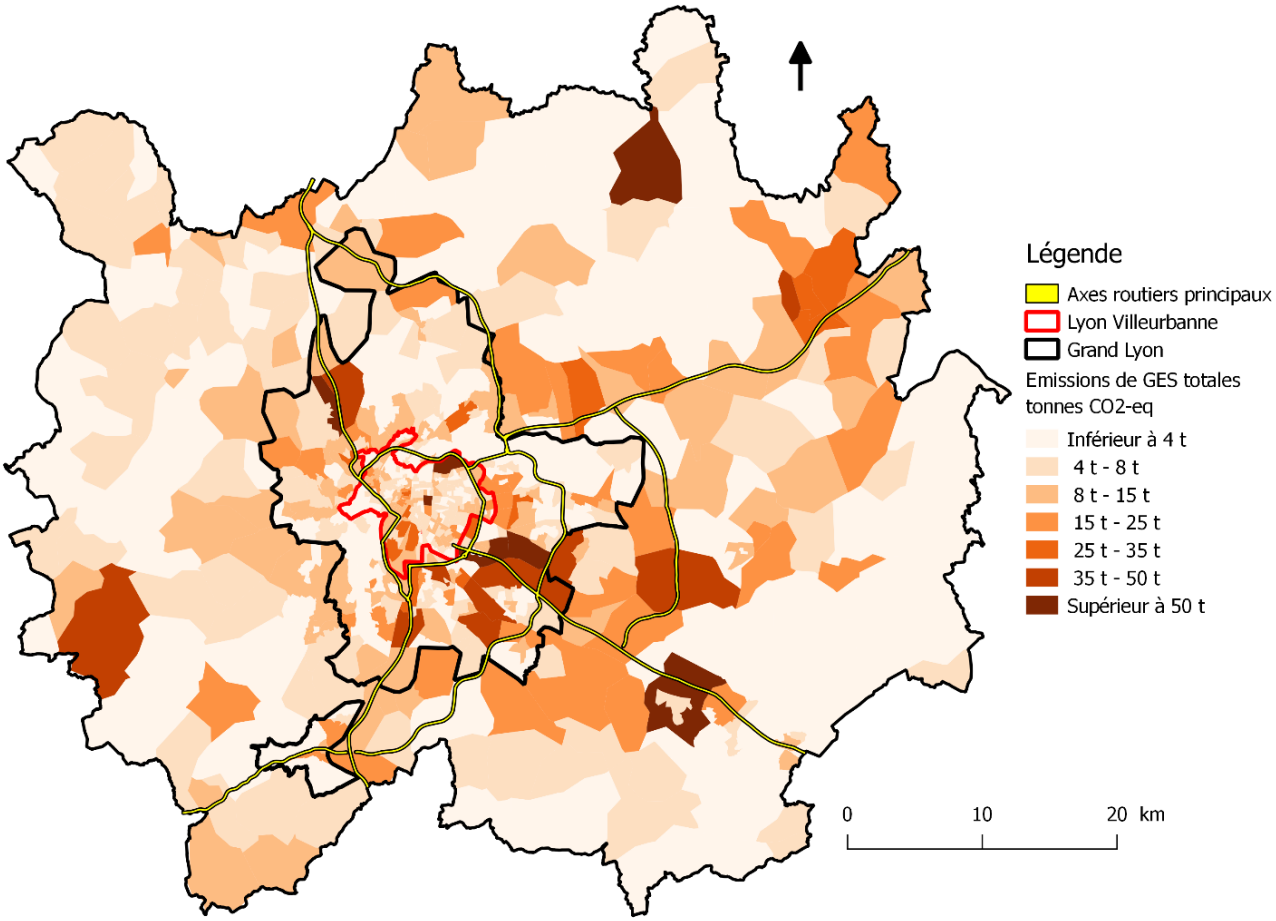
La comparaison des émissions des GES montre un rapport de plus de 4,4 entre la zone où la mobilité des habitants génère les émissions les plus élevées (Rives-Rhône : 6,47 kg CO2-eq/hab /jour) et celle dont les émissions sont les plus faibles (Lyon-Villeurbanne : 1,46 kg CO2-eq/hab/jour). Ce ratio varie légèrement en fonction de l'indicateur environnemental observé, le rapport le plus important est obtenu pour l'occupation du sol avec un rapport de 5,9 entre les deux valeurs extrêmes.

Les différences d'impacts environnementaux au sein des 20zones de l'aire urbaine de Lyon résultent d'usages différents du système de transport dans chaque zone (nombres de sorties, distances parcourues, parts modales, taux de remplissage des voitures et du parc automobile). L'Annexe 6 décrit les différentes pratiques de mobilité ainsi que certaines caractéristiques socio-économiques liées aux ménages de chacune des 20 zones étudiées. On observe ainsi des choix et des logiques de localisation des ménages variés entre les différents découpages, mettant en lumière la complexité d'analyse de la mobilité quotidienne qui résulte des interactions entre les caractéristiques socio-économiques des ménages et avec les caractéristiques de la forme urbaine.

3.1.2. Les zones d'attraction, liées à l'emploi et aux activités

L'analyse par motifs de sorties de ménages (2.3) a révélé des pratiques de mobilité et des impacts environnementaux différents en fonction des activités réalisées (*travail*, *achat-service*, *éducation*, *autres*). Afin de compléter l'analyse au niveau des activités, cette sous-partie cherche à spatialiser les zones attractrices de déplacements et donc génératrices d'externalités environnementales. L'ensemble des emplois et des activités étant réparti de façon hétérogène sur le territoire (Figure III-5), la Figure IV-19 présente la répartition spatiale des émissions totales de GES en fonction des lieux d'activités de l'aire urbaine de Lyon en 2009.

Figure IV-19 : Émissions de GES quotidiennes à l'IRIS liées aux lieux d'activités de l'aire urbaine de Lyon en 2009



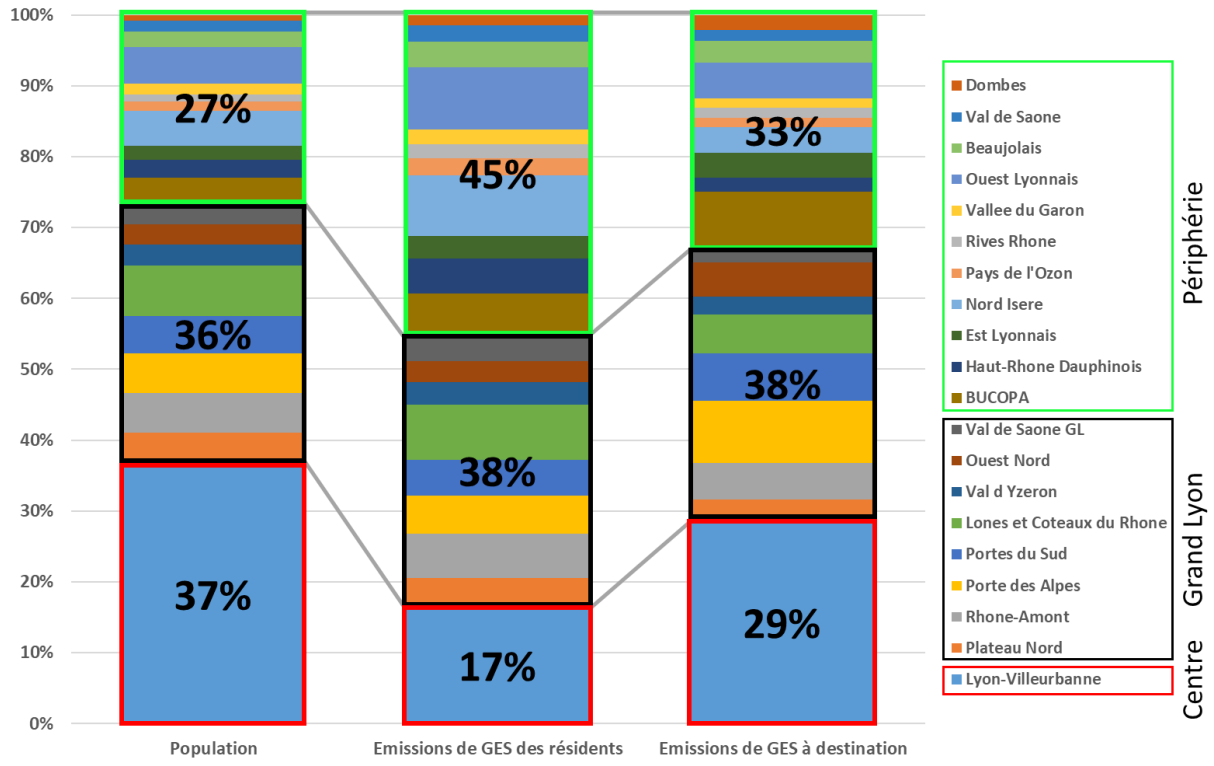
Source : traitement auteur, données de SIMBAD-ACV

La représentation cartographique des zones dont les activités génèrent des émissions de GES met en lumière les espaces à enjeux pour la gestion des mobilités dans les entreprises et les commerces. On observe aussi une répartition inégale des émissions liées aux zones d'attraction entre l'Est et l'Ouest de l'aire urbaine, avec davantage d'émissions produites réalisées à destination des zones de l'Est, notamment au niveau de Porte des Alpes et de la plaine de l'Ain (BUCOPA). Cette observation soulève la question de la cohérence territoriale entre les zones résidentielles, les zones d'activités et les zones commerciales.

Pour les autres impacts environnementaux, la répartition spatiale, associée aux activités, est similaire à celle présentée pour les émissions de GES.

Afin de synthétiser les différentes observations réalisées à partir de la spatialisation des impacts environnementaux en fonction des lieux de résidence des ménages ou de leurs lieux d'activités, la Figure IV-20 présente la contribution aux émissions totales de GES de chacune des 20 zones administratives étudiées, au regard de leurs poids démographiques dans l'aire urbaine de Lyon.

Figure IV-20 : Contribution aux émissions totales de GES liées à chacune des 20 zones administratives, en fonction de l'origine et de la destination des sorties de résidence



Source : traitement auteur, données de SIMBAD-ACV

On constate qu'en fonction du type d'allocation réalisée, en fonction du lieu de résidence ou du lieu d'activité, les impacts environnementaux associés à chaque zone varient. Les habitants du centre de l'aire urbaine (Lyon-Villeurbanne) génèrent 17% des émissions de GES alors que les activités de cette même zone en génèrent 29%, soit une contribution 75% plus forte. Ce constat est opposé pour les zones de périphérie qui, par ménage, contribuent à 45% du bilan carbone total lié à la mobilité quotidienne des personnes alors que, par activité, elles ne contribuent plus qu'à 33%. Cette variation des résultats en fonction du point de vue adopté

dans SIMBAD-ACV est aussi bien marquée en observant les impacts environnementaux par sortie de ménage, puisqu'une sortie d'un habitant du centre émet environ 1,05 kg CO_2-eq, contre 4,11 kg CO_2-eq en périphérie, alors qu'une sortie à destination du centre émet 1,54 kg CO_2-eq, contre 3,74 kg CO_2-eq en périphérie.

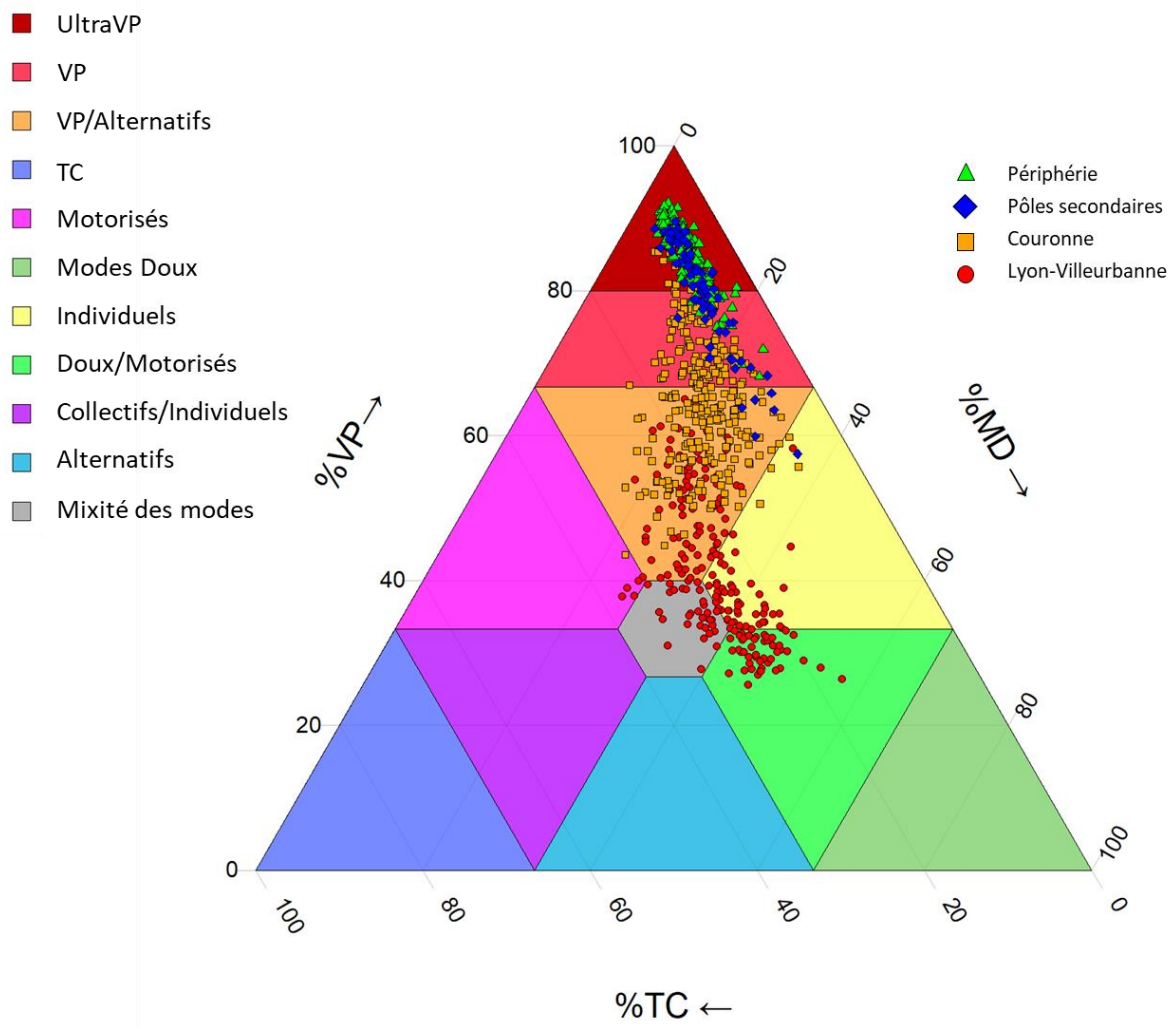
3.2. Spatialisation et évaluation des pratiques de mobilité quotidienne

Pour l'ensemble des ménages et des IRIS de résidence, les pratiques de mobilité constituent un facteur central dans le niveau d'impacts environnementaux. L'objectif de cette partie est de différencier les pratiques de mobilité des IRIS par classe pour ensuite spatialiser ces classes de pratiques et estimer leurs impacts environnementaux.

La typologie de pratiques utilisée repose sur 11 classes déterminées à partir des parts modales, en nombre de sorties, des trois modes principaux du modèle SIMBAD (Véhicules Personnels (VP), Transport en Commun (TC) et les Modes Doux (MD)). Cette typologie reprend la logique mise en œuvre dans le projet de recherche VILMODES qui représente les différentes classes dans un triangle permettant de croiser les trois modes de transport (Antoni *et al.*, 2015). Une classe supplémentaire a été rajoutée afin de différencier les grands utilisateurs de la voiture (>66% de part modale) avec ceux ayant un usage intensif de la voiture (>80% de part modale), qualifiés ici de « UltraVP ».

La Figure IV-21 représente les 11 classes de pratiques de mobilité ainsi que l'ensemble des IRIS différencier en fonction de leurs localisations (Lyon-Villeurbanne, Couronne, pôles secondaires et périphérie, cf. : Figure III-6).

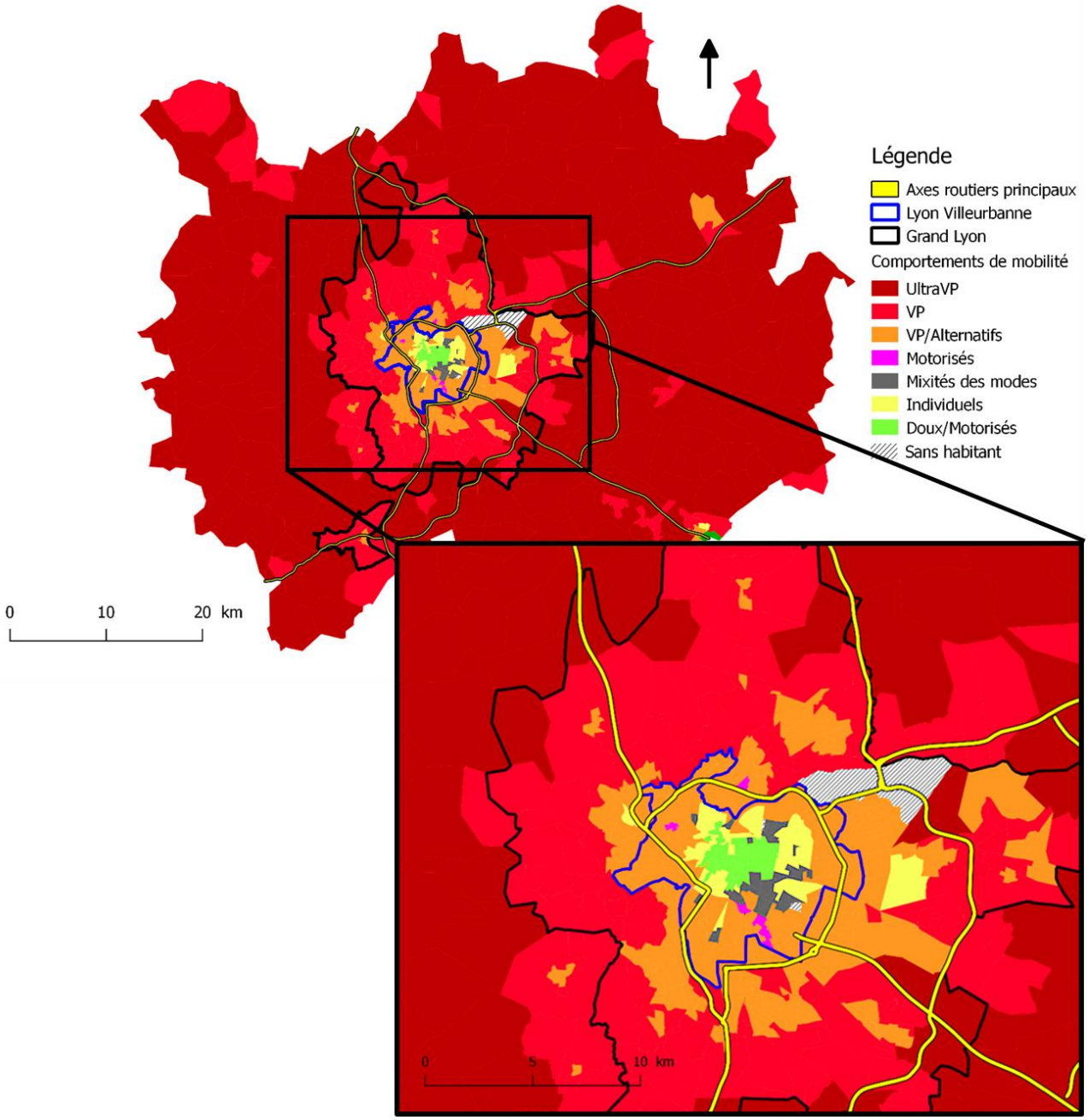
Figure IV-21 : Parts modales moyennes des résidents des IRIS de l'aire urbaine de Lyon en 2009



Source : traitement auteur, données SIMBAD, d'après Antoni et al. *(2015)*

La Figure IV-22 reprend l'ensemble des classes déterminées précédemment pour les spatialiser sur l'aire urbaine de Lyon. On observe ainsi la grande dépendance à la voiture des ménages de la périphérie, alors que ceux des communes du Grand-Lyon, et plus encore ceux du centre, ont recours à plus de modes alternatifs pour leurs mobilités quotidiennes.

Figure IV-22 : Comportements modaux au sein de l'aire urbaine de Lyon en 2009



Source : traitement auteur, données SIMBAD

Pour chacun des comportements modaux déterminées et spatialisées dans la Figure IV-21 et la Figure IV-22, la méthode SIMBAD-ACV associe des niveaux d'impacts environnementaux différents. Le Tableau IV-14 présente les moyennes par habitant des impacts environnementaux pour les classes de pratiques de mobilités présentes sur l'aire urbaine de Lyon.

Tableau IV-14 : Impacts environnementaux des différents comportements de mobilité de l'aire urbaine de Lyon

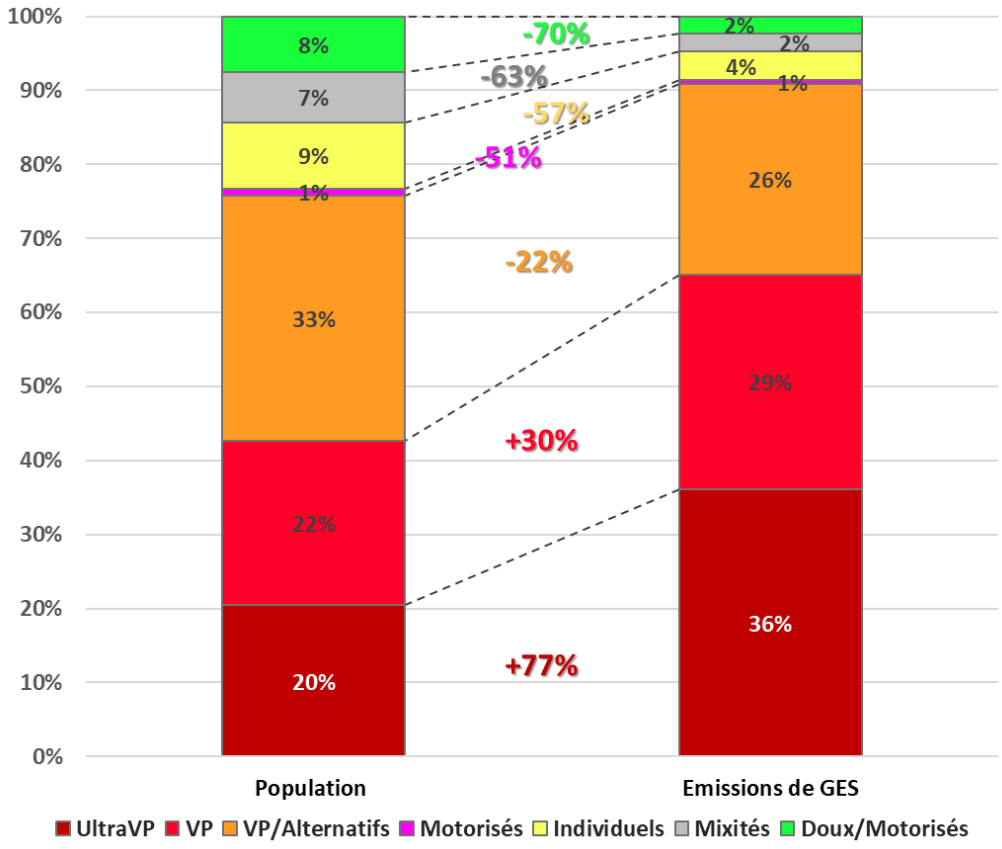
Par habitant	GES	$PM_{2,5}$	Ozone	Acide	Métaux	Sol	Non-Renouv.	Nucléaire	Renouv.	Énergie primaire
unité	kg CO_2	g $PM_{2,5}$	g COVNM	g SO_2	g Fer	m².an	kWh	kWh	kWh	kWh
UltraVP	**5,69**	**3,28**	**23,5**	**21,3**	**613**	**141**	**23,11**	**5,05**	**1,57**	**29,73**
VP	**4,19**	**2,38**	**17,0**	**15,5**	**435**	**95**	**16,68**	**3,75**	**1,16**	**21,59**
VP/ Alternatifs	**2,50**	**1,40**	**10,5**	**9,4**	**248**	**52**	**9,82**	**2,89**	**0,72**	**13,43**
Motorisés	**1,56**	**0,89**	**7,2**	**6,1**	**155**	**32**	**6,02**	**2,86**	**0,49**	**9,37**
Individuels	**1,40**	**0,77**	**5,8**	**5,2**	**138**	**28**	**5,48**	**1,66**	**0,40**	**7,54**
Mixités	**1,19**	**0,66**	**5,1**	**4,5**	**118**	**24**	**4,61**	**1,92**	**0,36**	**6,89**
Doux/ Motorisés	**0,97**	**0,53**	**4,0**	**3,6**	**96**	**19**	**3,78**	**1,36**	**0,29**	**5,43**

Source : traitement auteur, données de SIMBAD-ACV

La catégorisation des comportements modaux révèle un facteur d'environ 6 entre les impacts environnementaux de la classe d'IRIS la plus émettrice, « UltraVP », et la moins émettrice, « Doux/Motorisés ». Les deux classes représentant les grands utilisateurs de la voiture (« UltraVP » et « VP ») ont des impacts environnementaux moyens supérieurs à ceux observés à l'échelle de l'aire urbaine alors que les autres classes se situent en dessous. On observe aussi très peu de variation entre les différents impacts environnementaux. Cependant, la part d'énergie nucléaire varie entre les classes, cette part est minimale pour les « UltraVP » avec 17% et elle est maximale pour les « Motorisés » avec 30,5% de l'énergie primaire.

La Figure IV-23 fournit une image globale de ces différentes catégories de mobilité en présentant le poids démographique de chaque catégorie et sa contribution dans le bilan carbone total pour la mobilité quotidienne des habitants de l'aire urbaine de Lyon.

Figure IV-23 : Répartition de la population et des émissions de GES par comportements modaux au sein des IRIS



Source : traitement auteur, données de SIMBAD-ACV

En dépit de la grande couverture spatiale des IRIS avec des pratiques de mobilité très orientées voiture (« VP » et « UltraVP ») (94% de la surface de l'aire urbaine de Lyon), ces dernières ne représentent que 42% de la population de 2009. En revanche, les émissions de GES associées aux déplacements quotidiens de leurs habitants constituent la majorité du bilan total avec 65% des émissions.

Ces résultats mettent en lumière à la fois le rôle central de l'usage de la voiture dans les bilans environnementaux, mais aussi la grande dépendance de l'aire urbaine de Lyon vis-à-vis de ce mode de transport individuel. La Figure IV-22 montre les grandes inégalités d'accès aux modes alternatifs de l'aire urbaine de Lyon et soulève la question de l'influence de la forme urbaine sur les comportements de mobilité et donc sur les impacts environnementaux.

3.3. Évaluation environnementale au regard des formes urbaines

Les résultats cartographiques de la Figure IV-17 et de la Figure IV-23 témoignent de l'influence des éléments spatiaux sur les comportements de mobilité quotidienne et leurs impacts environnementaux. Cette influence est issue de la modélisation urbaine réalisée par SIMBAD-ACV, qui intègre les interactions entre la forme urbaine et la mobilité quotidienne. Cette partie s'intéresse aux relations entre les résultats environnementaux de la mobilité quotidienne des personnes et les caractéristiques de formes urbaines des différents IRIS de l'aire urbaine de Lyon.

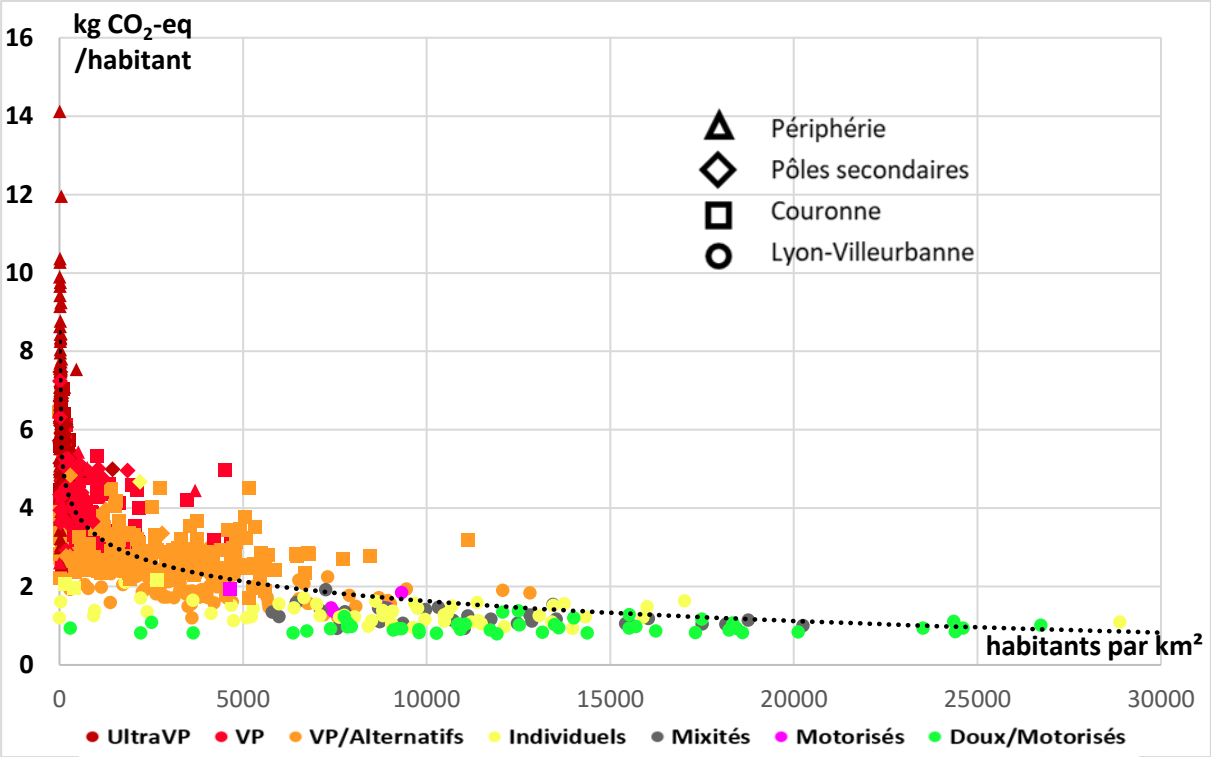
3.3.1. Influence des caractéristiques de forme urbaine :

Dans le cadre de cette thèse, la forme urbaine ne peut pas être caractérisée pour l'ensemble des composantes que cette notion peut inclure (Chap I 2.2.3). L'échelle associée à l'aire urbaine de Lyon et l'utilisation du modèle LUTI SIMBAD excluent la majorité des aspects locaux et de design pouvant être associés à la forme urbaine. Ainsi, cette dernière se décrit ici par ses caractéristiques morphologiques et fonctionnelles.

Pour l'ensemble des 777 IRIS constituant l'aire urbaine de Lyon, les niveaux d'impacts environnementaux par habitant ainsi que certaines des caractéristiques de forme urbaine sont estimés et calculés par la méthode SIMBAD-ACV. À partir de données disponibles (Tableau III-4), les IRIS peuvent être caractérisés par leurs densités (de population et d'emplois), leur degré de mixité résidence-emplois, leurs accessibilités (à la population, à l'emploi et aux infrastructures de transports), leur prix de foncier et par leur centralité (en distance ou temps au centre).

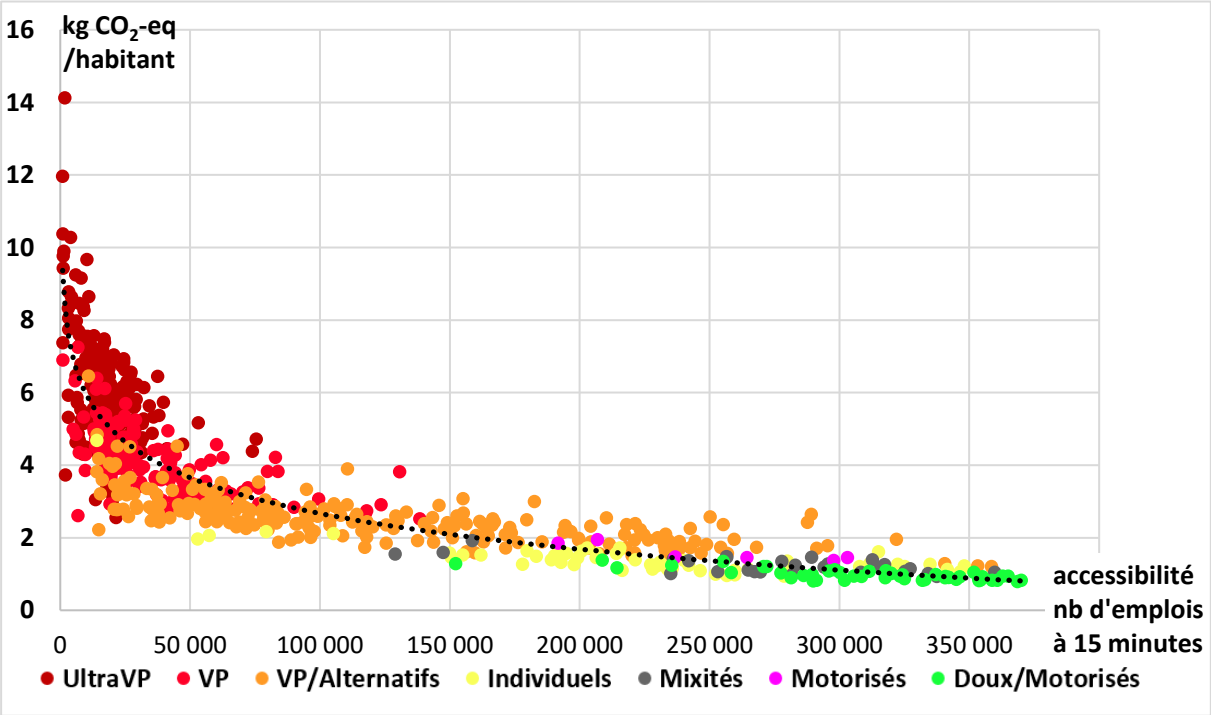
Les relations entre les niveaux d'émissions de GES par habitant et les variables de formes urbaines sont présentées dans la Figure IV-24, la Figure IV-25, la Figure IV-26 et la Figure IV-27 pour respectivement la densité de population, l'accessibilité isochrone à l'emploi de 15 minutes (nombre d'emplois accessibles en 15 minutes de transports), pour le temps d'accès au centre de l'aire urbaine (référence : préfecture du Rhône) et pour l'accessibilité aux transports en commun (avec l'indicateur PTAL présenté dans la Figure IV-3). Les niveaux d'émissions de GES et les résultats pour les autres indicateurs environnementaux étant similaires, les observations réalisées pour le premier pourront être généralisées aux autres enjeux.

Figure IV-24 : Émissions de GES en fonction de la densité de population des IRIS



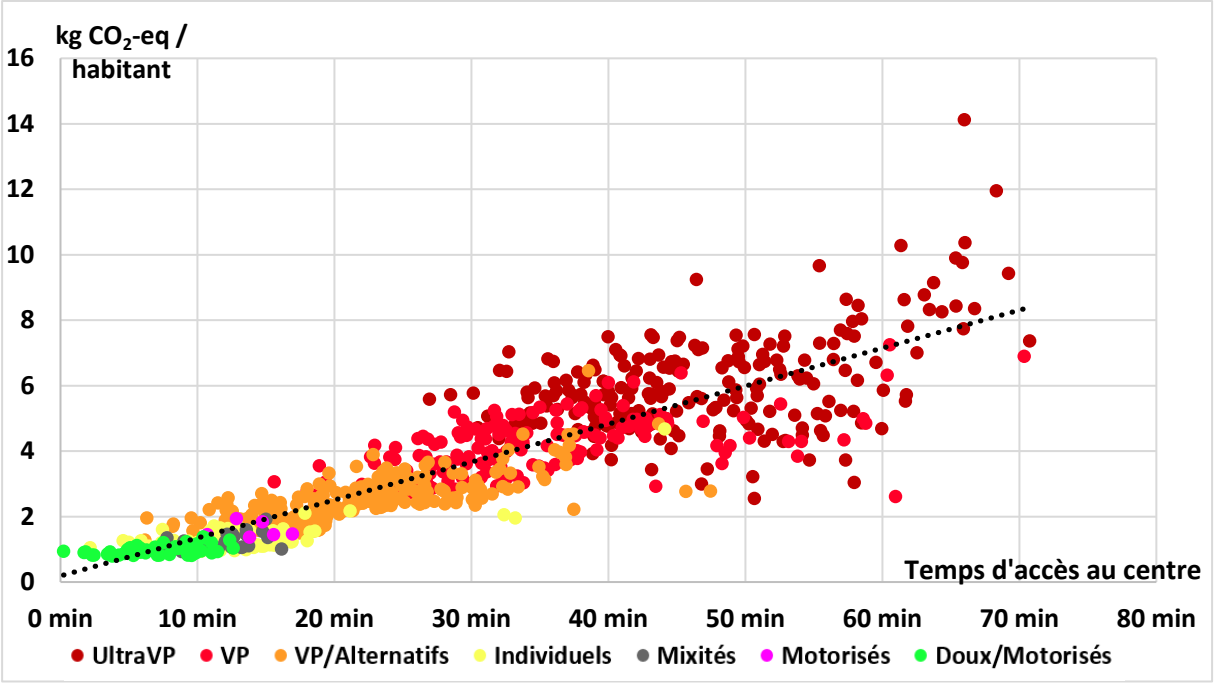
Source : traitement auteur, données de SIMBAD-ACV

Figure IV-25 : Émissions de GES en fonction de l'accessibilité isochrone à l'emploi des IRIS (15 minutes)



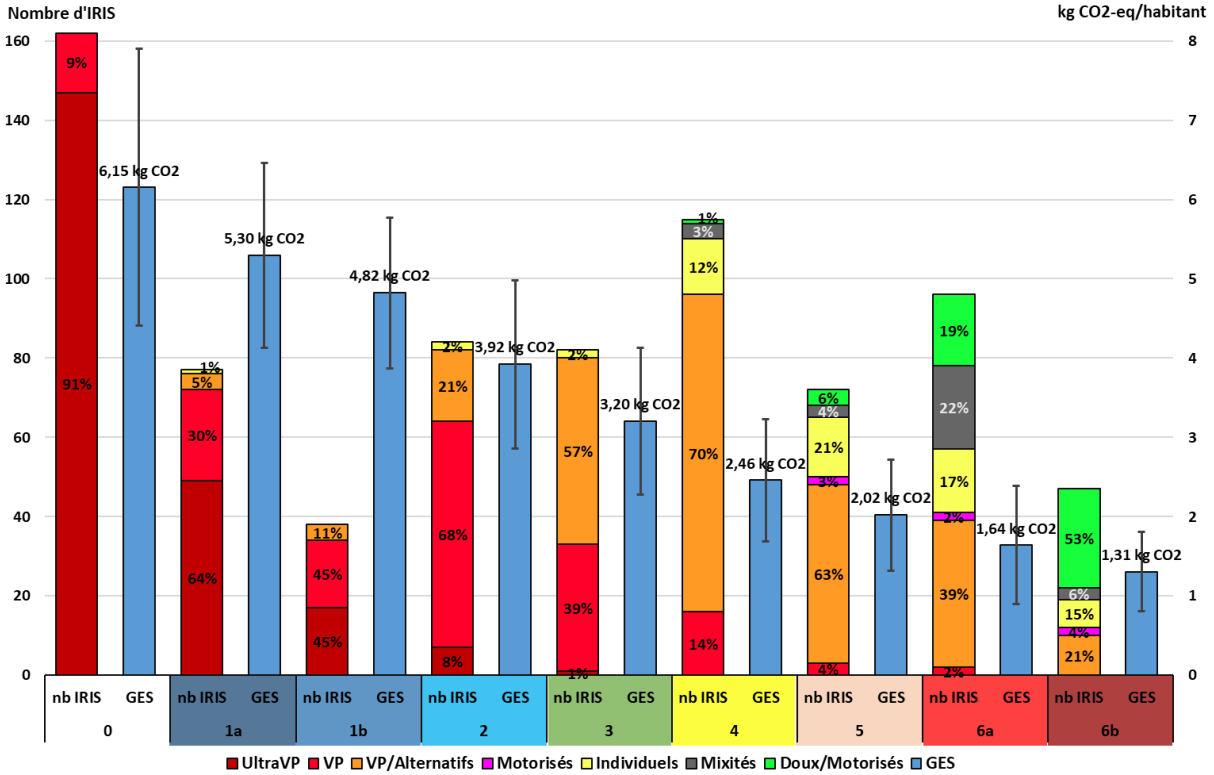
Source : traitement auteur, données de SIMBAD-ACV

Figure IV-26 : Émissions de GES en fonction du temps d'accès au centre en voiture des IRIS



Source : traitement auteur, données de SIMBAD-ACV

Figure IV-27 : Émissions moyenne de GES et comportement modal en fonction de l'accessibilité en transport en commun (PTAL) des IRIS



Source : traitement auteur, données de SIMBAD-ACV, cf. Figure IV-3

Pour les quatre variables de forme urbaines analysées, l'influence sur les émissions de GES et les impacts environnementaux associés à la mobilité quotidienne des personnes est remarquable. Les relations observées entre forme urbaine et mobilité quotidienne, ici traduite en émissions de GES, sont cohérentes avec d'autres études réalisées sur des terrains différents que ce soit par des enquêtes ou par modélisation (Milakis *et al.*, 2008; Naess, 2012; Stead & Marshall, 2001).

Par exemple, l'analyse des niveaux de GES par IRIS en fonction de la densité de population révèle une relation similaire à celle observée par Newman et Kenworthy (1999) pour l'énergie, c'est-à-dire une baisse en fonction de la hausse de la densité. Cependant, pour une même densité de population, on observe des niveaux d'émissions différents, notamment avec des niveaux d'émissions inférieurs pour les IRIS localisés dans le centre de l'aire urbaine. On peut notamment retrouver des IRIS du centre qui contiennent des parcs ou des zones d'activités parmi les IRIS peu denses avec de faibles émissions. Concernant les pratiques modales, on constate que les comportements sont majoritairement orientés voitures pour les zones à faibles densités, alors que ce type de comportements tend à disparaitre avec l'augmentation de la densité de population.

La relation entre les niveaux d'émissions de GES et l'accessibilité à l'emploi montre une relation comparable à la densité, plus l'accessibilité est grande, moins les impacts environnementaux associés à la mobilité quotidienne sont importants. Les catégories de pratiques de mobilité se hiérarchisent clairement en fonction du niveau d'accessibilité avec un usage de modes alternatifs croisant avec le niveau d'accessibilité à l'emploi. Cependant, pour les faibles niveaux d'accessibilité, on observe une grande variabilité du niveau d'impacts environnementaux (de 2,6 à 14 kg CO_2-eq par habitant pour les IRIS qui ont accès à moins de 10 000 emplois à 15 minutes de transport).

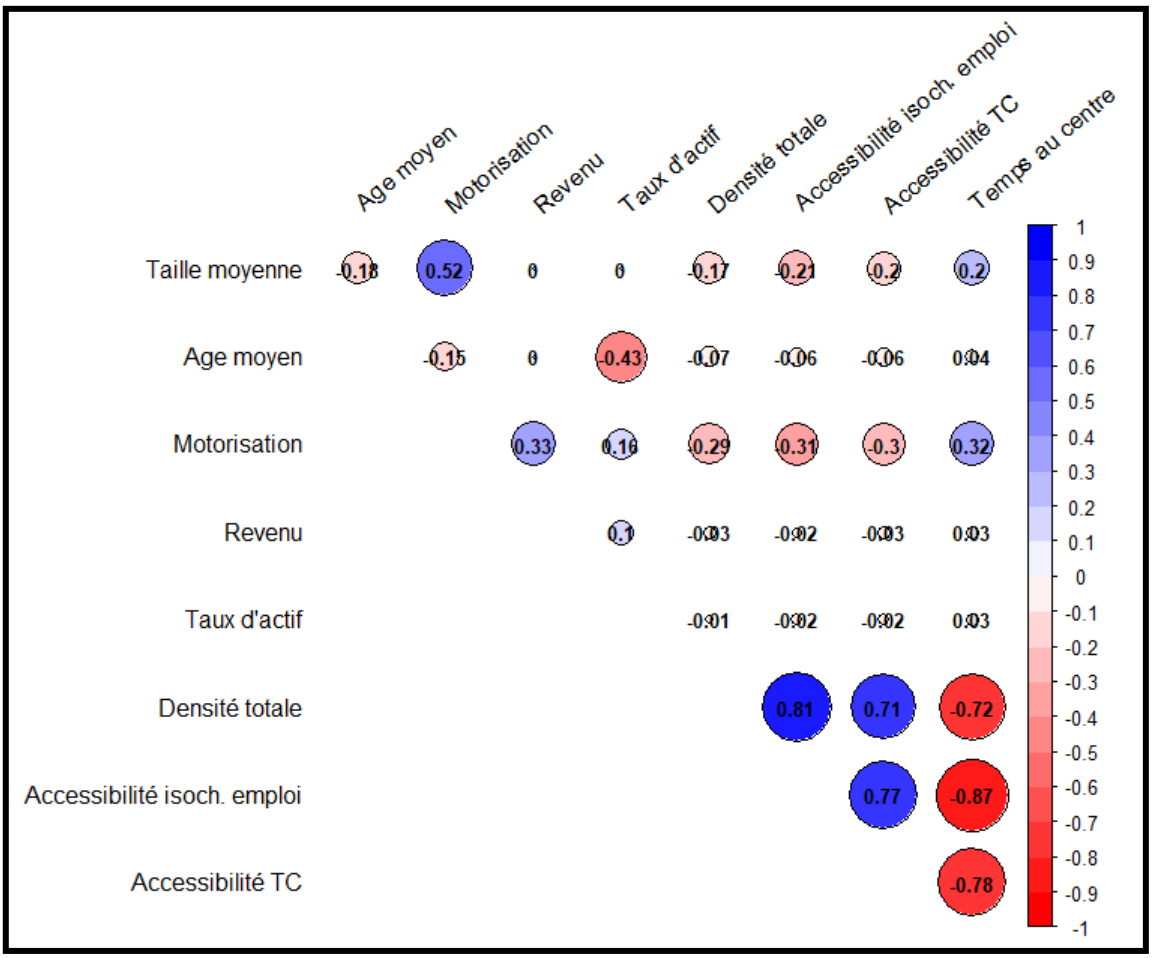
Les niveaux émissions de GES par habitant des IRIS et les temps de déplacement en voiture jusqu'au centre de l'aire urbaine de Lyon décrivent une relation plutôt linéaire, mettant ainsi en lumière le caractère monocentrique de l'aire urbaine de Lyon. On observe aussi la grande dépendance des IRIS éloignés à l'automobile.

La Figure IV-27 met en avant l'influence du réseau de transport en commun sur la mobilité quotidienne et ses impacts afférents. Ainsi, les émissions de GES vont décroitre plus l'indice d'accès aux TC va s'améliorer. Parallèlement, l'accès aux réseaux de transport en commun réduit l'usage de la voiture au profit des autres modes alternatifs. Les zones non

desservies par les TC représentent 13% de la population de l'aire urbaine de Lyon ainsi que 23% des émissions de GES totales pour la mobilité quotidienne des personnes.

Les quatre variables de forme urbaine analysées par SIMBAD-ACV sont fortement corrélées entre elles, comme dans beaucoup d'étude urbaine (Stead & Marshall, 2001). La Figure IV-28 représente les niveaux de corrélation des différentes variables de forme urbaine analysées, ainsi que leurs niveaux de corrélation avec les variables socio-économiques associées à chaque IRIS. Ainsi, on note que les ménages prennent en considération les facteurs de forme urbaine pour choisir leur résidence. Par exemple, les ménages seront plus grands et plus motorisés dans les zones périphériques peu denses.

Figure IV-28 : Matrice de corrélation des variables socio-économiques et de forme urbaine en 2009



Source : traitement auteur, données SIMBAD

Les observations réalisées sur les quatre paramètres de forme urbaine illustrent l'influence de la forme urbaine sur la mobilité quotidienne des personnes et sur les impacts environnementaux associés et elles correspondent à des analyses similaires réalisées par ailleurs (Milakis *et al.*, 2008; Naess, 2012; Stead & Marshall, 2001). Les effets estimés par SIMBAD-ACV de la forme urbaine sur la mobilité et ses impacts environnementaux résultent directement des interactions transport-urbanismes modélisées dans SIMBAD, mettant ainsi en avant la pertinence du couplage avec l'ACV afin d'évaluer de façon systémique les impacts de la mobilité quotidienne des personnes sur l'environnement.

3.3.2. Résultats par déciles de densité

Les variables de forme urbaine étant fortement corrélées entre elles, une analyse des IRIS en déciles de densité est proposée afin d'examiner plus finement les choix de localisation des ménages, les usages du système de transport et les impacts environnementaux associés. Afin d'inclure dans des catégories communes les zones denses en population et en emplois, la densité humaine utilisée pour cette typologie est calculée en prenant la somme des habitants et des emplois qui se trouvent dans chaque IRIS ramenée à sa surface. Ainsi, 10 classes d'IRIS contenant chacune 10% de la population ont été construites.

Le Tableau IV-15 synthétise les différentes informations relatives à chaque décile de densité d'IRIS. Les caractéristiques des ménages sont représentées par les niveaux de revenus, la taille moyenne des ménages et le taux de motorisation moyen de chaque classe. La centralité des déciles est décrite par le temps d'accès moyen à la préfecture. L'usage du système de transport est illustré par le nombre de sorties moyen par habitant, les parts modales, la catégorie de mobilité correspondante, la distance parcourue en moyenne par habitant ainsi que le taux de remplissage moyen des voitures de chacun des déciles de densité.

Tableau IV-15 : Variables socio-économiques et de mobilité de 10 niveaux de densité en 2009

	1er décile	**2e décile**	**3e décile**	**4e décile**	**5e décile**	**6e décile**	**7e décile**	**8e décile**	**9e décile**	**10e décile**
Seuils hab+emploi/km²	Inférieur à 259	259 - 589	589 – 1 400	1 400 – 3 597	3 597 – 6 130	6 130 – 9 700	9 700 – 14 072	14 072 - 22 432	22 432 - 35 273	Supérieur à 35 273
Bas revenu	14%	13%	15%	18%	22%	22%	26%	26%	20%	21%
Moyen revenu	62%	62%	62%	61%	62%	61%	59%	59%	59%	57%
Haut revenu	24%	24%	23%	21%	17%	17%	15%	15%	21%	23%
Taille du ménage	2,67	2,69	2,62	2,56	2,39	2,25	2,2	2,14	2	1,91
Taux de motorisation	1,52	1,49	1,41	1,26	1,16	1,03	0,92	0,82	0,83	0,8
Temps au centre	48 min	40 min	35 min	30 min	28 min	21 min	21 min	18 min	12 min	8,2 min
Sorties par habitant	1,3	1,31	1,33	1,37	1,37	1,39	1,38	1,39	1,38	1,38
Part modale VP	87%	83%	77%	70%	65%	57%	53%	45%	37%	32%
Part modale TC	6%	7%	8%	11%	13%	18%	20%	25%	26%	26%
Part modale MD	7%	10%	15%	19%	21%	25%	27%	30%	36%	43%
Comportement de mobilité	UltraVP	UltraVP	VP	VP	VP/ Alternatifs	VP/ Alternatifs	VP/ Alternatifs	VP/ Alternatifs	Individuels	Doux/ Motorisés
Distance par habitant	27,2 km	23,9 km	21,4 km	18,3 km	16,3 km	13,6 km	12,7 km	10,8 km	8,2 km	6,7 km
Taux remplissage des voitures	1,28	1,26	1,25	1,26	1,25	1,26	1,25	1,26	1,23	1,22

Source : traitement auteur, données SIMBAD pour 2009

La description des ménages pour chacun des déciles de densité permet de mettre en évidence les liens entre leurs choix de localisation dans l'aire urbaine de Lyon et leurs caractéristiques socio-économiques. Par exemple, les ménages de grande taille privilégient les zones peu denses, alors que les ménages modestes se localisent moins dans ces espaces et vont plutôt s'installer dans des zones moyennement denses (du 5e à 8e déciles de densité). On observe aussi une décroissance de la taille et des taux de motorisation des ménages avec la densité.

Pour l'usage du système de transport, on observe que les habitants des zones peu denses réalisent moins de sorties que le reste de l'aire urbaine de Lyon. Ils ont par ailleurs beaucoup plus recours à la voiture pour leurs déplacements. La part modale de la voiture décroit avec les niveaux de densité, alors que les parts modales des TC et des modes doux croissent avec la densité. Les distances parcourues pour la mobilité quotidienne décroissent fortement avec la densité puisque l'on observe un facteur 4 entre les distances parcourues par les deux déciles de densité opposés. Pour finir, les taux de remplissage des voitures ne varient que légèrement avec la densité passant de 1,28 à 1,22 passager par véhicule entre le 1er et le 10e décile des IRIS de l'aire urbaine de Lyon.

Les impacts environnementaux associés aux usages du système de transport, pour la mobilité quotidienne des personnes de chacun des déciles de densité, sont présentés dans le Tableau IV-16.

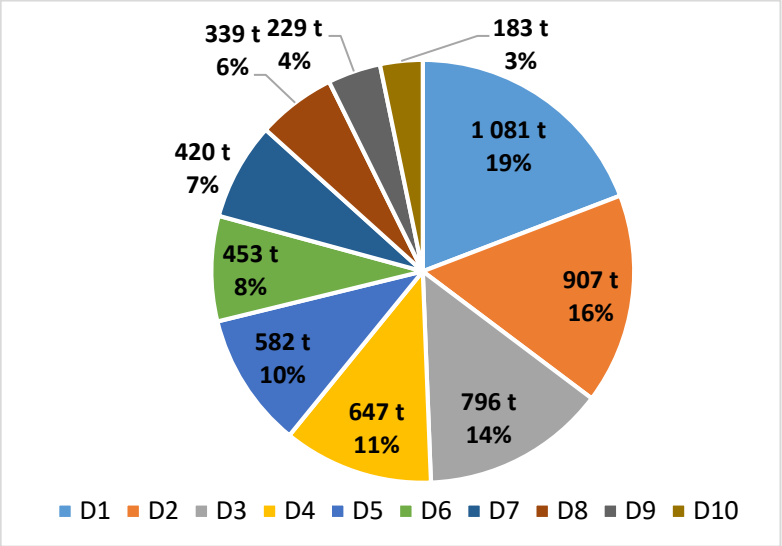
Tableau IV-16 : Impacts environnementaux des déciles de densité des IRIS de l'Aire Urbaine de Lyon

Par habitant	GES	$PM_{2,5}$	Ozone	Acide	Métaux	Sol	Non-Renouv.	Nucléaire	Renouv.	Énergie primaire
unité	kg CO_2	g $PM_{2,5}$	g COVNM	g SO_2	g Fer	m².an	kWh	kWh	kWh	kWh
1er décile	6,12	3,58	25,8	23,2	672	163	25,2	6,1	1,7	33,0
2e décile	5,19	2,96	21,0	19,2	550	122	20,9	4,1	1,4	26,4
3e décile	4,49	2,56	18,1	16,7	471	102	17,9	4,4	1,3	23,5
4e décile	3,71	2,09	14,9	13,7	381	81	14,7	3,2	1,0	19,0
5e décile	3,32	1,86	13,6	12,3	336	71	13,1	3,1	0,9	17,2
6e décile	2,60	1,45	10,8	9,7	258	54	10,2	2,7	0,7	13,6
7e décile	2,39	1,33	10,1	9,0	235	50	9,4	2,8	0,7	12,9
8e décile	1,91	1,08	8,3	7,2	190	40	7,5	2,7	0,6	10,7
9e décile	1,33	0,73	5,6	4,9	130	26	5,2	1,7	0,4	7,3
10e décile	1,05	0,58	4,4	3,9	103	21	4,1	1,5	0,3	5,9

Source : traitement auteur, données de SIMBAD-ACV

Pour l'ensemble des indicateurs environnementaux, les niveaux d'impacts diminuent avec la densité, avec un facteur d'environ 6 entre les zones peu denses et celles les plus denses. Ce facteur atteint un maximum de 7,9 pour l'enjeu d'usage du sol, notamment dû à un usage des infrastructures routières moins efficaces (cf. Figure IV-7). La Figure IV-29 résume la contribution au bilan global d'émissions de GES de chacun des déciles de densité analysés.

Figure IV-29 : Contribution de chaque décile de densité aux émissions totales de GES (5 640 tonnes de CO2-eq par jour)



Source : traitement auteur, données de SIMBAD-ACV

La moitié des émissions de GES de la mobilité quotidienne des habitants de l'aire urbaine de Lyon provient des 30% d'habitants des zones peu denses (D1, D2 et D3), c'est-à-dire avec une densité d'habitants et d'emplois inférieure à 1 400 par km². Les 40% des habitants des 4 déciles d'IRIS les plus denses (densité d'habitants et d'emplois supérieure à 9 700 par km²) ne représentent, en revanche, que 20% des émissions de GES.

Dans l'intention de juger davantage de l'aspect systémique de la méthode SIMBAD-ACV, un croisement entre la typologie de territoire par densité et la typologie des ménages en fonction de leurs caractéristiques socio-économiques est réalisé. Ce croisement permet à la fois d'illustrer les choix de localisation des ménages ainsi que de mettre en lumière les grandes variabilités au sein de chacune des classes analysées jusqu'à présent. Le Tableau IV-17 décrit les choix de localisation de chacune des 10 catégories de ménages entre les différents déciles de densité de l'aire urbaine de Lyon.

Tableau IV-17 : Répartitions démographiques de chaque catégorie de ménages entre les différents déciles de densité

	1er décile	2e décile	3e décile	4e décile	5e décile	6e décile	7e décile	8e décile	9e décile	10e décile
Retraité >75ans	8%	7%	8%	8%	10%	12%	11%	12%	11%	12%
Seul inactif	4%	4%	5%	6%	8%	10%	12%	13%	16%	19%
Couple/Famille inactif	9%	10%	11%	10%	10%	11%	10%	10%	10%	10%
Seul actif	6%	5%	6%	7%	9%	10%	12%	13%	15%	17%
Couple 1 actif	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%
Couple biactif	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	11%	11%
Famille sans ou un véhicule	3%	5%	7%	9%	9%	11%	14%	16%	13%	13%
Famille de 3 personnes multimotorisée	16%	16%	15%	11%	10%	8%	7%	5%	6%	5%
Famille de 4 personnes multimotorisée	17%	16%	14%	12%	11%	8%	7%	5%	5%	5%
Famille de 5+ personnes multimotorisée	17%	15%	14%	13%	12%	9%	7%	5%	4%	4%

Source : traitement auteur, données SIMBAD

On constate, comme dans le Tableau IV-17, que les familles privilégient les zones peu denses pour s'installer. Les familles habitant en zones denses, qui ont moins besoin de la voiture, sont proportionnellement moins motorisées, soulignant l'influence de la localisation sur le taux de motorisation (Paulo, 2006; Pelé, 2018). Les personnes vivant seules sont, en revanche, localisées principalement dans les zones denses de l'aire urbaine de Lyon, quel que soit leur niveau d'activité. Les retraités privilégient aussi légèrement plus les zones denses du centre de l'aire urbaine de Lyon.

Le Tableau IV-18 présente les niveaux d'émissions de GES par personne des 100 types de ménages obtenus par le croisement des typologies de territoires et de ménages pour la mobilité quotidienne.

Tableau IV-18 : Émissions de GES par habitant en fonction des catégories de ménages et du décile de densité

Émissions de GES par habitant (kg CO_2-eq)	1er décile	2e décile	3e décile	4e décile	5e décile	6e décile	7e décile	8e décile	9e décile	10e décile	Moyenne par type de ménage
Retraité >75ans	3,49	2,76	2,33	1,95	1,75	1,46	1,37	1,01	0,72	0,51	1,59
Seul inactif	3,68	2,76	2,37	1,59	1,75	1,42	1,28	0,98	0,65	0,49	1,28
Couple/Famille inactif	4,05	3,31	2,7	2,24	2,05	1,71	1,54	1,21	0,85	0,61	2,01
Seul actif	8,45	7,4	6,54	4,92	4,45	3,39	2,95	2,14	1,61	1,34	3,41
Couple 1 actif	6,27	5,33	4,6	3,76	3,54	2,72	2,56	1,96	1,37	1,07	3,33
Couple biactif	8,75	7,63	6,68	5,64	5,24	3,94	3,62	2,77	2,01	1,7	4,75
Famille sans ou un véhicule	5,84	4,78	4,17	3,63	3,16	2,58	2,4	2,06	1,38	1,08	2,6
Famille de 3 personnes multimotorisée	6,91	6	5,24	4,38	4,03	3,23	3,03	2,38	1,71	1,41	4,55
Famille de 4 personnes multimotorisée	6,13	5,3	4,69	3,97	3,58	2,79	2,62	2,18	1,45	1,17	4,07
Famille de 5+ personnes multimotorisée	5,62	4,66	4,06	3,38	2,95	2,35	2,21	1,94	1,17	0,92	3,55
Moyenne par décile d'IRIS	6,12	5,19	4,49	3,71	3,32	2,6	2,39	1,91	1,33	1,05	3,22

Source : traitement auteur, données de SIMBAD-ACV

Les résultats du croisement entre déciles de densité et classes de ménages révèlent la grande hétérogénéité entre les ménages au regard de leurs émissions de GES dans l'aire urbaine de Lyon. Un facteur de près de 18 existe entre les émissions par habitant d'un couple biactif d'une zone peu dense et celles d'une personne sans activité vivant seule dans une zone fortement dense.

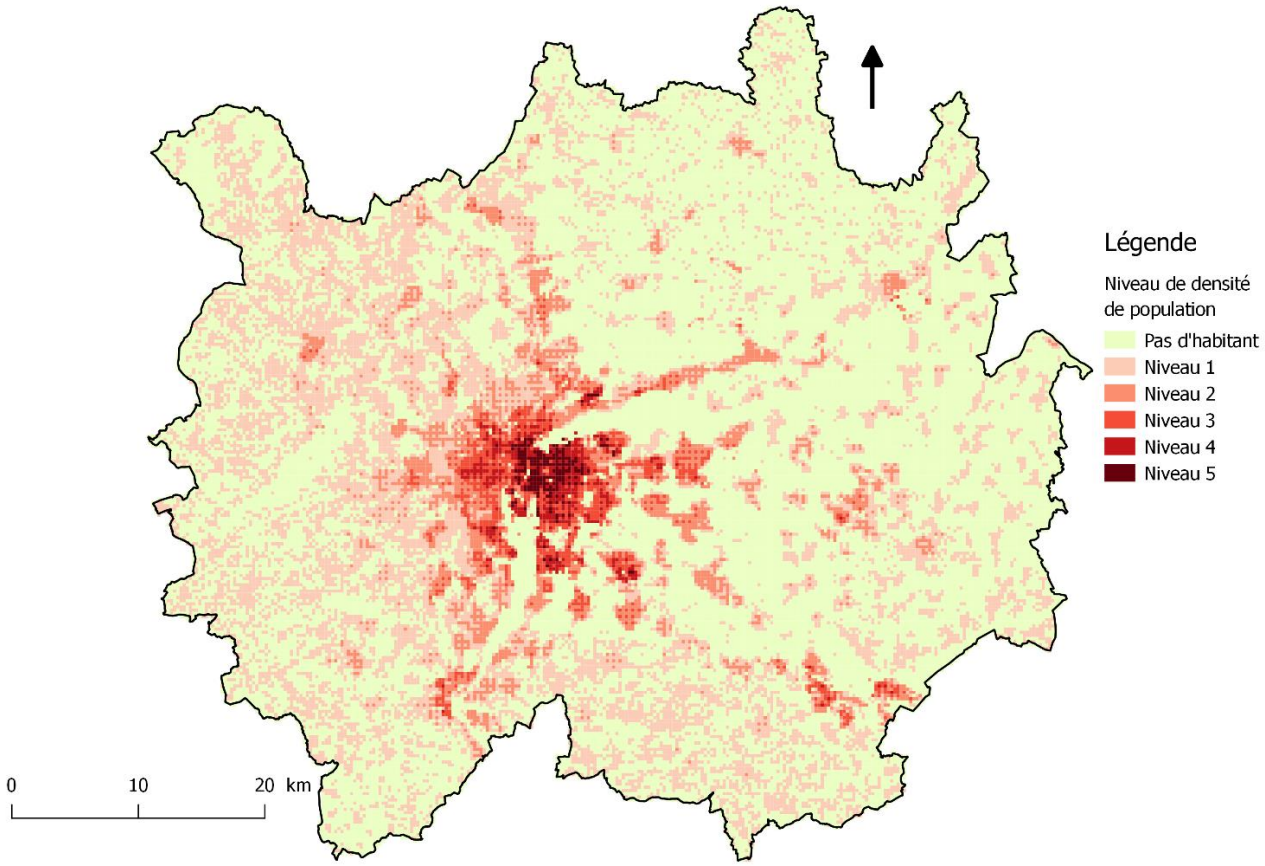
Les différents niveaux d'émissions de GES présentés dans le Tableau IV-18, en fonction du type socio-économique du ménage et de la localisation, illustrent pleinement la double influences de la mobilité quotidienne par les caractéristiques socio-économiques et de forme urbaine (Chap I 2.2.4). Sans chercher à comparer le niveau d'impact de la localisation des ménages par rapport à celui des caractéristiques socio-économiques, cette analyse croisée a permis de montrer que la méthode SIMBAD-ACV intègre les mécanismes liés à ces variables.

3.4. Exposition de la population aux émissions de NOx

Après avoir analysé les différents types d'émetteurs de l'aire urbaine de Lyon, en fonction de leurs caractéristiques socio-économiques, de leurs zones de localisation, de leurs pratiques de mobilité et du type d'activités qu'ils réalisent, cette sous-partie s'intéresse à l'exposition de la population aux NOx émis sur le territoire pour la mobilité quotidienne des personnes. La spatialisation fine des impacts environnementaux d'ACV et le croisement avec les conditions locales (population, biodiversité) sont rares dans les approches en ACV même si elles se développent dans certaines études territorialisées (Loiseau, 2014). Cette partie cherche donc à contribuer au développement d'approches spatialisées pour l'ACV, mais aussi à répondre aux enjeux de pollutions locales repérés auprès des acteurs du territoire lors des entretiens (Chap III 3.2.1).

La Figure IV-30 et la Figure IV-31 représentent respectivement la répartitions de la population sur l'aire urbaine par quintile de densité et la distribution spatiale des émissions directes de NOx en quintile de densité d'émissions (émissions par surface). Chaque niveau de densité de population et d'émissions regroupe 20% de la population ou 20% des émissions de NOx de l'aire urbaine de Lyon en 2009. Les seuils de densité de population et de densité d'émissions de NOx de chacun des niveaux utilisés sont présentés dans le Tableau IV-19.

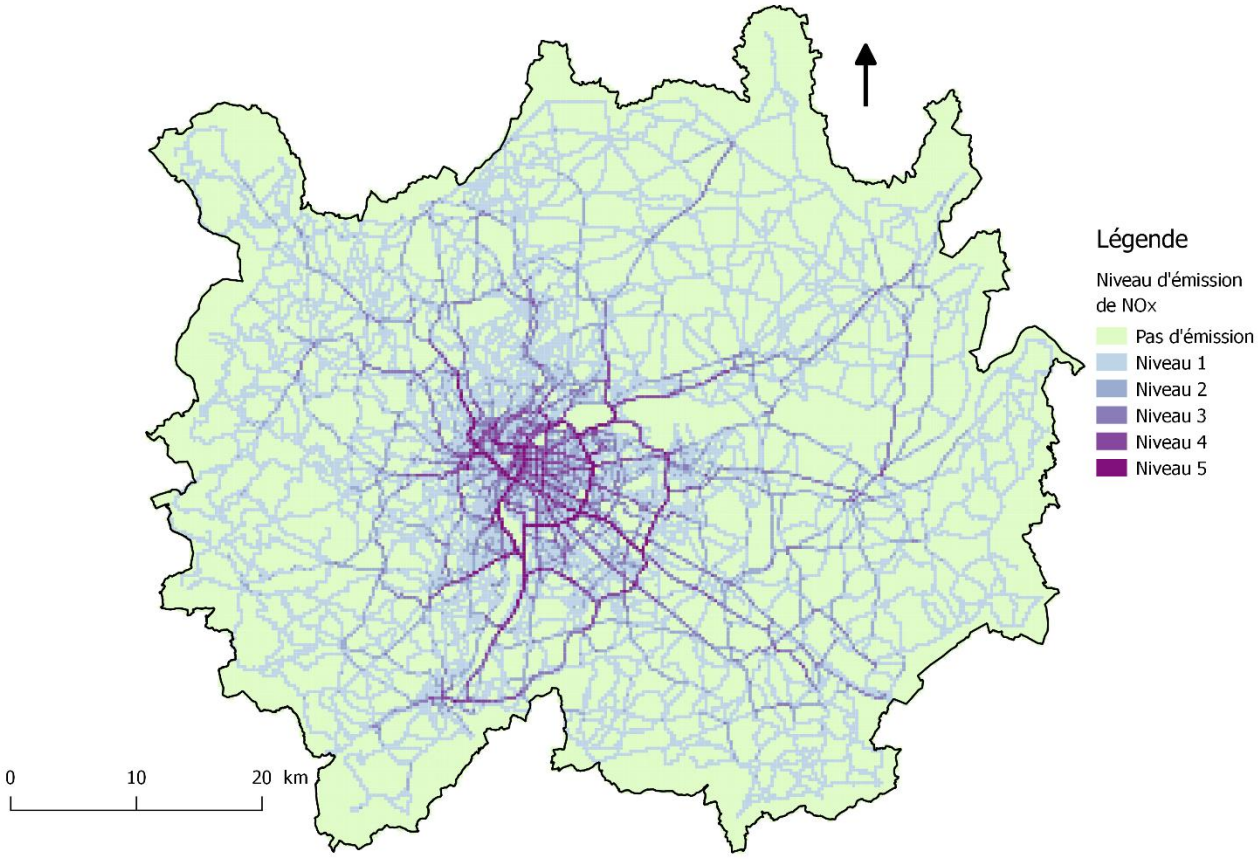
Figure IV-30 : Quintiles de densité de population de l'aire urbaine de Lyon en 2009 (résolution 250m x 250m)



Source : traitement auteur, données de SIMBAD-ACV

La carte précédente montre clairement les zones fortement denses, qui sont, en matière de pollutions locales, des espaces à fort enjeu de santé publique.

Figure IV-31 : Quintiles d'émissions directes de NOx de l'aire urbaine de Lyon en 2009 (résolution 250m x 250m)



Source : traitement auteur, données de SIMBAD-ACV

La distribution spatiale des émissions directes de NOx liées à la mobilité quotidienne des habitants de l'aire urbaine de Lyon suit naturellement les axes routiers, car les émissions directes de NOx proviennent des voitures et des bus qui circulent. Les niveaux de densité d'émissions sont donc les plus importants en bordure des très grands axes (périphériques, autoroutes, boulevards urbains). La version d'analyse développée ici n'inclut pas les phénomènes de dispersions et de transformations des polluants dans l'atmosphère. Cette simplicité dans la méthode permet, cependant, d'explorer dans un premier temps l'intérêt d'une méthode spatialisée en parallèle de la méthode d'ACV.

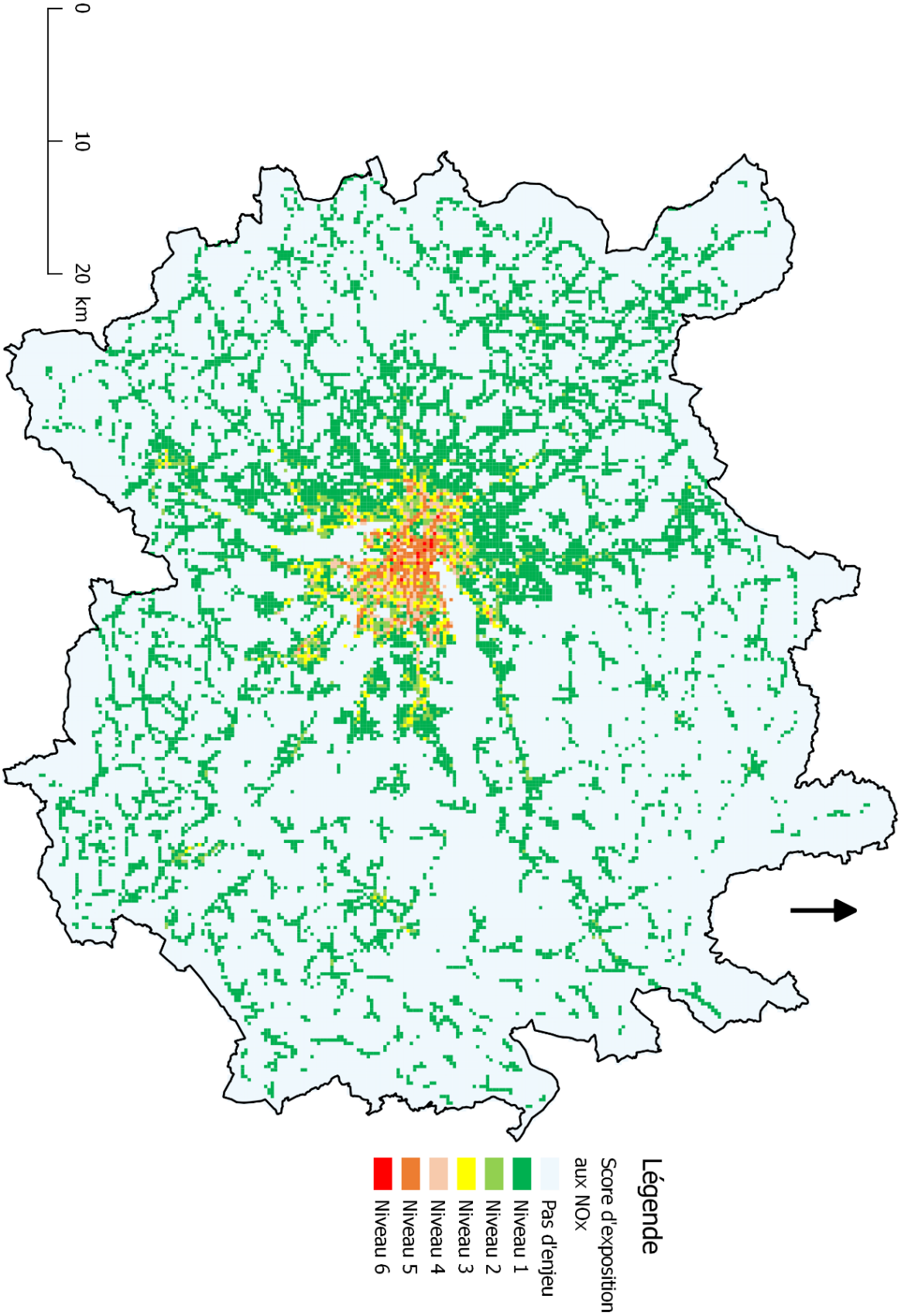
Tableau IV-19 : Quintiles de densités de population et d'émissions de NOx utilisées pour le calcul d'exposition

Densité de population (habitants par km²) \ Emissions de NOx (kg par km²)	0 < et < 6,83	6,83 <= et < 15,1	15,1 <= et < 30,7	30,7 <= et < 62,9	62,9 <=
0 < et < 1100	1	1	1	2	3
1100 <= et < 3167	1	1	2	3	4
3167 <= et < 7924	1	2	3	4	5
7924 <= et < 16990	2	3	4	5	5
16990 <=	3	4	5	5	6

Source : traitement auteur, données de SIMBAD-ACV

Les scores d'exposition de l'aire urbaine de Lyon sont estimés en croisant les quintiles d'émissions de NOx, qui constitue le danger, et les quintile de densité de population, qui constitue la probabilité d'occurrence du risque (Tableau IV-19). La Figure IV-32 représente les scores d'expositions de l'ensemble des cellules constituant l'aire urbaine de Lyon. Les cellules sans habitant ou sans émission de NOx sont considérées comme sans enjeu d'exposition à ce polluant.

Figure IV-32 : Score d'exposition de la population aux NOx liées à la mobilité quotidienne des personnes



Source : traitement auteur, données de SIMBAD-ACV

À partir du calcul d'exposition réalisé, la majorité de la surface l'aire urbaine de Lyon ne présente aucun enjeu d'exposition de la population au polluant local NOx. Cependant, les zones sans enjeu sont situées principalement en périphérie. Les zones situées dans le Grand-Lyon, et encore plus dans Lyon-Villeurbanne, sont quant à elles susceptibles de présenter des niveaux d'exposition élevés. Certaines zones de Lyon atteignent même le score maximal de 6 du fait de forte concentration de population et de polluants.

Cette représentation cartographique met en lumière les inégalités spatiales de l'aire urbaine de Lyon en matière d'exposition aux polluants locaux. Les habitants de la périphérie, pourtant fortement émetteurs, résident dans des zones à faible enjeu d'exposition contrairement aux résidants du centre qui sont fortement exposés aux polluants, malgré leurs pratiques de mobilité quotidienne plus vertueuse environnementalement. À noter que pour l'ensemble des résultats d'exposition seules les émissions de NOx associées à la mobilité quotidienne des résidents de l'aire urbaine de Lyon sont incluses. Les émissions générées par les autres voyageurs et les véhicules de marchandises sont ignorées dans cette approche.

Afin d'illustrer ce problème d'inégalité environnementale, le Tableau IV-20 représente la répartition démographique pour chaque score d'exposition en fonction des niveaux de revenus et de la localisation des ménages. Un score moyen d'exposition est aussi calculé en pondérant les niveaux d'exposition avec la population correspondante.

Tableau IV-20 : Répartition démographique en fonction du score d'exposition de la population aux NOx

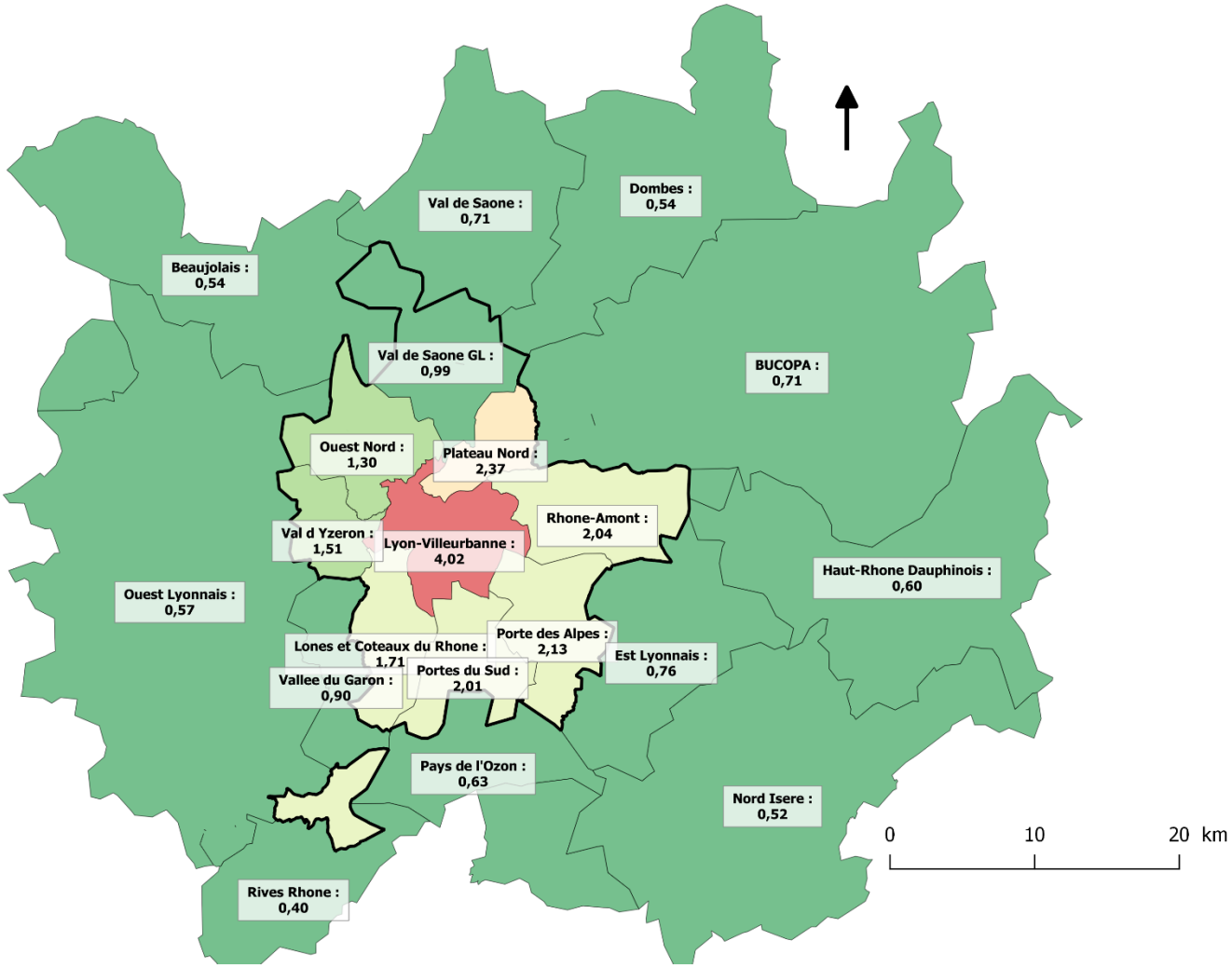
% de population	Aire urbaine de Lyon	Bas revenu	Moyen revenu	Haut revenu	Centre	Grand Lyon (hors centre)	Périphérie
0	15%	13%	16%	16%	1%	10%	43%
1	31%	25%	31%	34%	4%	43%	53%
2	12%	13%	12%	10%	11%	19%	3%
3	11%	14%	11%	9%	15%	15%	1%
4	11%	13%	11%	9%	20%	9%	0%
5	19%	21%	18%	19%	45%	5%	0%
6	2%	2%	2%	2%	5%	0%	0%
Score moyen	2,35	2,58	2,30	2,26	4,02	1,84	0,62

Source : traitement auteur, données de SIMBAD-ACV

La répartition démographique montre que 21% de la population de l'aire urbaine de Lyon habite dans une zone à fort enjeu d'exposition aux NOx (score de 5 et 6), dont la majeure partie se situe dans Lyon-Villeurbanne. Les scores d'exposition par niveau de revenus révèlent aussi une inégalité sociale puisque les bas revenus ont un score plus élevé que les autres tranches de revenus, c'est-à-dire qu'ils sont plus exposés aux émissions de NOx associées à la mobilité. Ces différents constats sur les inégalités territoriales et sociales face à ce risque de santé humaine peuvent justifier des politiques d'actions ciblées sur les zones à forts enjeux, telles qu'une zone à faibles émissions (ZFE) ou la requalification des axes majeurs dans le tissu urbain dense.

Afin de relier les niveaux d'exposition à des découpages territoriaux associés à des prises de décisions en termes de transports ou d'aménagement, les scores d'exposition des 20 principaux découpages administratifs de l'aire urbaine de Lyon ont été calculés. La Figure IV-33 présente les scores de ces territoires, dont les caractéristiques principales sont en Annexe 6.

Figure IV-33 : Score d'exposition de la population aux émissions NOx des transports quotidiens de personnes suivant le découpage en 20 zones de l'aire urbaine de Lyon



Source : traitement auteur, données de SIMBAD-ACV

Cette représentation permet d'afficher le niveau d'importance que représente l'enjeu de pollution locale pour les différents découpages territoriaux de l'aire urbaine de Lyon. Ainsi, cet enjeu apparait comme mineur dans l'ensemble des SCoTs et communautés de communes situés en dehors du Grand-Lyon. Au sein du Grand-Lyon, il se dessine, en revanche, une différence entre les territoires situés à l'Ouest du Rhône et de la Saône et ceux situés à l'Est, puisque ces derniers ont tous des scores supérieurs à 2, contrairement aux territoires de l'Ouest qui ont des scores bien inférieurs. Une partie de cette inégalité s'explique par la présence importante d'axes routiers majeurs à l'Est de Lyon (Périphérique et Rocade) et de la présence de grandes zones

d'activités qui attirent de nombreux flux routiers associés à la mobilité quotidienne de personne. Par ailleurs, L'Ouest de Lyon bénéficie d'un aménagement pavillonnaire, moins dense, plus important.

L'analyse de l'exposition de la population aux NOx réalisée dans cette partie révèle la dichotomie qui existe entre l'analyse des émetteurs de polluants et celle des exposés à ces mêmes polluants. De plus, à l'instar de l'étude spatialisée de Loiseau (2014), cette analyse ouvre des perspectives pour améliorer la caractérisation des impacts environnementaux en intégrant la sensibilité des milieux d'émissions, comme la densité humaine pour les risques sur la santé.

Conclusion de la partie 3 :

La construction et la mise en œuvre de la méthode SIMBAD-ACV a permis de relier les impacts environnementaux de la mobilité quotidienne des personnes avec les territoires qui constituent l'aire urbaine de Lyon. Cette spatialisation permet ainsi d'analyser les impacts sur différents découpages spatiaux, notamment des découpages administratifs, complétant ainsi les analyses de systèmes de transport et de ménages réalisées dans les parties précédentes. Par le biais de cette approche spatiale, les niveaux d'impacts environnementaux des IRIS ont pu être mis en relation avec leurs caractéristiques de formes urbaines locales. Ces relations résultent directement de la modélisation transport-urbanisme réalisée dans SIMBAD, mais la forte influence des paramètres de forme urbaine sur les niveaux d'impacts environnementaux appuie l'intérêt de modéliser ces interactions pour réaliser une évaluation systémique de la mobilité quotidienne des personnes.

Cependant, la spatialisation des impacts environnementaux liés à la mobilité quotidienne des personnes soulève la problématique de spatialisation des impacts puisqu'une sortie se définit par une origine, le lieu de résidence, une destination, le lieu d'activité, et par un vecteur de flux, les tronçons. Ainsi, l'utilisation du modèle LUTI SIMBAD, disposant des données nécessaires, permet de réaliser ces différents types de spatialisation et révèle des conclusions complémentaires en fonction du point de vue choisi. Les représentations par origine ou par destination permettent notamment de montrer certaines incohérences territoriales dans l'aire urbaine de Lyon, comme, par exemple, le centre comme destination quotidienne qui génère plus d'impacts environnementaux du fait de ses activités que ce que génèrent les résidents du centre, dû en partie au nombre important d'emplois dans cette zone par rapport à sa population.

Le modèle SIMBAD estime les pratiques de mobilité pour l'ensemble de l'aire urbaine de Lyon, et ces pratiques sont très hétérogènes dans les différents territoires de l'aire urbaine de Lyon. Cette approche par les pratiques a permis de repérer les grands types de comportements de mobilité présents dans l'aire urbaine de Lyon et d'estimer les impacts environnementaux associés à chacun de ces comportements.

La désagrégation spatiale et la désagrégation par ménage réalisées dans SIMBAD-ACV ont permis de construire une typologie de ménages croisant leurs caractéristiques socio-économiques et le niveau de densité de leur zone de résidence. L'analyse réalisée au moyen de cette typologie révèle une grande hétérogénéité des impacts environnementaux associés à la

mobilité quotidienne des personnes et souligne l'intérêt de considérer le système urbain dans son ensemble, avec ses aspects socio-économiques et spatiaux notamment.

Enfin, le changement de focale réalisé lors de l'analyse de l'exposition de la population aux émissions directes de NOx liées à la mobilité quotidienne des personnes permet de mettre en relation le danger (NOx) et les cibles (la population). Cette approche enrichit le champ d'analyse du couplage SIMBAD-ACV utilisé jusque-là avec des éléments sur la pollution locale et elle révèle aussi un certain nombre d'inégalités territoriales et sociales vis-à-vis de l'exposition à la pollution locale.

Synthèse du chapitre IV :

La méthode d'évaluation environnementale de la mobilité quotidienne des personnes SIMBAD-ACV a pu être testée à travers les trois grands types d'analyses réalisées dans ce chapitre : analyse du système de transport, analyse par types de ménages et analyse spatiale. Les différents choix méthodologiques et outils utilisés ont permis de montrer qu'un nombre important et varié d'analyses peut être réalisé pour rendre compte des mécanismes à l'origine des impacts environnementaux de la mobilité quotidienne des personnes. Diverses conclusions et observations ont ainsi pu être dressées.

Intérêts méthodologiques et complémentarité des outils utilisés :

L'utilisation de l'ACV pour évaluer le système de transport de l'aire urbaine de Lyon et la mobilité quotidienne associée a tout d'abord contribué à une prise en compte plus complète des enjeux liés aux technologies de transports, notamment en incluant les phases indirectes du cycle de vie des transports, c'est-à-dire le cycle de vie des carburants et surtout ceux des véhicules et des infrastructures, qui sont moins souvent intégrés.

Pour les analyses, l'approche en cycles de vie a été complétée par une approche multicritère afin d'aborder différents enjeux environnementaux associés à la mobilité et aux transports. Même si peu de données comparatives existent pour beaucoup d'indicateurs utilisés, il résulte des mécanismes d'impacts différents pour chaque enjeu étudié. Par exemple, l'usage du sol dépend fortement des infrastructures utilisées et de la production des carburants alors que les émissions de GES résultent davantage des gaz d'échappement et de la production des véhicules (Figure IV-11). En apportant des éléments de compréhension sur les enjeux multiples associés aux différents éléments du système de transport, la méthode SIMBAD-ACV valide une partie de l'hypothèse 1bis sur l'intérêt d'utiliser une ACV pour évaluer la mobilité quotidienne des personnes.

Si l'ACV permet de représenter le fonctionnement du système de transport avec ces différents processus technologiques, le modèle transport-urbanisme SIMBAD permet quant à lui de représenter finement l'usage de ce système et il s'est avéré être un outil indispensable dans l'évaluation de la mobilité quotidienne des personnes. Le couplage de ces deux outils a donc permis d'endogénéiser l'usage du système de transport dans l'évaluation, là où de nombreuses études environnementales considèrent cette phase comme exogène.

L'utilisation du modèle SIMBAD dans cette évaluation environnementale a donné accès, par le biais de diverses désagrégations, à des objets tels que les ménages et les territoires, peu abordés dans les études d'ACV. Avec ces nouveaux objets, les analyses environnementales peuvent intégrer les variables socio-économiques des ménages et les caractéristiques de forme urbaine des territoires. Les observations réalisées par SIMBAD-ACV pour ces différents éléments du système urbain ont ainsi pu confirmer le rôle central que joue l'ensemble du système urbain sur les différents impacts environnementaux associés à la mobilité quotidienne des personnes. L'influence du système urbain sur la mobilité valide ainsi une partie de l'hypothèse 2bis sur l'intérêt d'utiliser un modèle transport-urbanisme pour représenter et évaluer les impacts environnementaux de la mobilité quotidienne des personnes.

Enfin, le choix décalé d'intégrer un outil d'analyse de l'exposition de la population aux NOx s'avère prometteur puisque les premiers résultats permettent de caractériser plus finement les enjeux de pollutions locales que l'approche en ACV classique. De plus, de nouvelles discussions émergent de cette analyse spatialisée, notamment sur la dichotomie entre émetteurs et exposés, ainsi que sur les inégalités environnementales. Cet outil d'analyse local repose principalement sur la finesse du modèle SIMBAD et sur les calculs d'émissions réalisés par Copert. La mise en œuvre de cette analyse exploratoire de l'exposition de la population aux polluants locaux permet de tirer un apprentissage sur la réalisation d'une méthode d'évaluation environnementale de la mobilité quotidienne : **les spécificités locales et les enjeux d'équité territoriale liés à la pollution atmosphérique nécessitent une méthode d'évaluation plus fine que celle proposée actuellement par l'ACV**.

En fin de compte, la réalisation du couplage SIMBAD-ACV a permis de rassembler dans une même méthode les principaux mécanismes urbains et technologiques influant sur la mobilité quotidienne des personnes et leurs impacts environnementaux associés. Les résultats obtenus apparaissent cohérents avec d'autres études, soit en ACV pour le système de transport (Chester *et al.*, 2013; Le Féon, 2014), soit d'analyse de la mobilité quotidienne (Naess, 2012; Stead & Marshall, 2001). Ceci permet de valider en partie l'hypothèse principale sur la capacité

de représentation et d'évaluation de la méthode pour la mobilité actuelle et d'envisager sereinement dans le chapitre suivant l'aspect prospectif de la mobilité quotidienne.

Analyse environnementale de la mobilité quotidienne et validation des résultats obtenus :

Au-delà de la validation de la méthode SIMBAD-ACV, de nombreuses analyses ont été réalisées et différents enseignements ont pu être tirés sur les impacts environnementaux de la mobilité quotidienne des personnes. L'analyse des différents sous-systèmes de transport révèle la forte contribution pour l'ensemble des indicateurs des phases indirectes des cycles de vie des transports, soulignant ainsi l'importance d'une approche en cycles de vie pour l'évaluation environnementale des transports.

Cependant, on observe que malgré le rôle significatif des choix technologiques et des conditions de circulation sur la performance des systèmes de transport, l'usage du système de transport reste le facteur majeur dans l'évaluation environnementale de la mobilité quotidienne des personnes. En effet, les taux de remplissage des véhicules, les distances parcourues, les parts modales et les fréquences de sortie de ménages sont des leviers importants dans le bilan environnemental par habitant (Tableau IV-6).

Contrairement aux performances unitaires des véhicules, plutôt stables, l'usage du système de transport de l'aire urbaine de Lyon, dont découlent les impacts environnementaux, est fortement variable en fonction des caractéristiques socio-économiques et des types de ménages. La typologie de ménages proposée révèle un facteur variant de 3 à 4 entre les classes de ménage opposées en fonction de l'indicateur d'impacts suivi (Tableau IV-10). Une partie de cette variabilité s'explique par les activités réalisées par les membres du ménage, puisque les usages du système de transport et les impacts environnementaux sont clairement différenciables en fonction des motifs de déplacements. Ceci est notamment le cas pour des déplacements liés au travail qui apparaissent les plus émetteurs (Tableau IV-12).

La mise en œuvre de différentes typologies de territoires sur l'aire urbaine de Lyon, en fonction des découpages administratifs, des niveaux de densité et des pratiques de mobilité, souligne la grande variabilité spatiale des impacts environnementaux de la mobilité quotidienne de personnes. De plus, le croisement des typologies de territoires et de ménages met en évidence

le lien entre les caractéristiques socio-économiques et démographiques des ménages et leur choix de localisation. Finalement, le croisement effectué fait apparaitre une variabilité importante entre les différents profils de ménages évalués. Un facteur de près de 18 existe pour les émissions de GES par habitant entre les profils les plus émetteurs et les plus vertueux.

L'analyse réalisée pour caractériser les populations exposées aux émissions de NOx associées à la mobilité quotidienne de l'aire urbaine de Lyon fait ressortir aussi une grande hétérogénéité sur le territoire, en termes de santé publique. Par rapport aux analyses caractérisant les émetteurs, les conclusions sont pratiquement inversées puisque les zones à fort enjeu se situent dans le centre, alors que la périphérie, fortement émettrice, est préservée des problèmes de pollutions locales. Cette inégalité environnementale n'est pas que spatiale puisque les ménages modestes s'avèrent plus exposés au risque de pollution locale que les ménages plus aisés.

L'ensemble des constats réalisé permettent d'illustrer la richesse d'analyse permise par la méthode SIMBAD-ACV pour la mobilité quotidienne des habitants de l'aire urbaine de Lyon, en examinant les aspects associés aux technologies de transports, aux usages, à la forme urbaine ainsi qu'à l'exposition aux externalités. De plus, les enseignements qui ont pu être tirés des analyses peuvent nourrir les débats sur les orientations envisageables et souhaitables pour réduire les impacts environnementaux associés. Le rôle central du système urbain observé dans ce chapitre renforce l'intérêt, par la suite, de mettre en place dans la méthode SIMBAD-ACV des scénarios de nature différente pour simuler des orientations diversifiées pour la mobilité quotidienne des personnes (scénarios technologiques, de forme urbaine, de pratiques de mobilité …).

Chapitre V : Analyse exploratoire et prospective de la mobilité quotidienne des personnes

Contexte :

La méthodologie SIMBAD-ACV, qui a été développée en associant un modèle d'interaction transport-urbanisme, SIMBAD, avec les outils d'Analyse en Cycle de Vie, a permis de réaliser un bilan environnemental détaillé pour la mobilité quotidienne des habitants de l'aire urbaine de Lyon. La richesse de SIMBAD-ACV et des sorties qu'il fournit a permis dans le chapitre précédent tout à la fois de proposer des analyses variées répondant à différents types d'enjeux liés à la mobilité quotidienne urbaine et de vérifier que les résultats obtenus sont bien cohérents avec ce que l'on trouve dans la littérature. Afin de contribuer aux débats sur la mobilité de demain et de mettre en avant l'aspect stratégique de l'outil développé, ce chapitre conduit différentes analyses prospectives pour la mobilité quotidienne. À travers la mise en œuvre d'un large panel de scénarios de mobilité, notre démarche prospective permet de se rendre compte des possibilités offertes par SIMBAD-ACV et d'analyser les effets des hypothèses des scénarios sur le bilan environnemental. Ainsi les influences, séparées et combinées, de la forme urbaine, de la taille et de la composition de la population, des comportements de mobilité, des réseaux de transport, des technologies de véhicules et de l'approvisionnement en carburants sont explorées dans un objectif de réduction des impacts environnementaux.

Objectifs du chapitre :

- Présenter les différentes entrées possibles de la méthode SIMBAD-ACV pour une approche prospective, à travers un panel de scénarios large et représentatif des grands enjeux autour de la mobilité quotidienne
- Éprouver l'outil SIMBAD-ACV en simulant un ensemble de visions prospectives contrastées de la mobilité quotidienne et urbaine
- Borner les impacts environnementaux de la mobilité quotidienne de personnes à moyen terme
- Explorer l'efficacité de certaines alternatives de mobilité quotidienne pour en limiter les impacts environnementaux des déplacements

Plan du chapitre :

Pour répondre à ces objectifs, une première partie de ce chapitre présentera les choix réalisés en matière de prospective ainsi que l'ensemble des futurs scénarisés. En repartant tout à la fois des résultats précédents montrant les facteurs jouant fortement sur les impacts environnementaux et des débats actuels sur les enjeux en la matière, 4 grandes familles de scénarios seront introduites et décrites. Les scénarios exploreront différentes entrées possibles de SIMBAD-ACV qui couvrent des alternatives de natures diverses. Certains scénarios seront associés au système urbain modélisé, avec notamment la forme urbaine, l'évolution démographique, l'évolution des comportements et les réseaux de transports. D'autres scénarios seront plus directement affiliés à la démarche ACV et aux processus technologiques avec la modification du parc automobile et l'approvisionnement en carburants. En tout, 17 scénarios exploratoires seront ainsi proposés.

Dans la deuxième partie, les résultats environnementaux de chaque scénario seront présentés et remis en perspective par rapport à la situation de référence évaluée dans le chapitre IV. L'approche « toutes choses égales par ailleurs » retenue pour la construction des scénarios permettra d'isoler les effets associés à chaque mesure et ainsi d'apporter des connaissances sur les effets potentiels de chaque alternative.

À travers les différentes analyses, certains mécanismes pourront être décomposés et examinés en fonction du scénario appliqué. Ainsi, en complément des enseignements sur la

capacité de réduction des impacts environnementaux associés à chaque alternative, la méthode des scénarios permettra de juger de la pertinence de SIMBAD-ACV pour représenter les mécanismes influant sur la mobilité quotidienne des personnes et ses impacts environnementaux.

Pour finir ce chapitre, la dernière partie proposera un scénario final regroupant plusieurs mesures de natures différentes. L'approche adoptée pour ce scénario sera exploratoire et les orientations retenues auront pour objectif de réduire significativement les impacts environnementaux. La mise en œuvre d'un scénario volontariste permettra dans un premier temps de borner les impacts environnementaux de la mobilité quotidienne de personnes de demain en estimant un seuil minimum. Dans un second temps, les analyses fourniront des éclairages sur les différents mécanismes en œuvre dans ce scénario pour réduire les impacts environnementaux.

Partie 1 : Présentation et construction des scénarios

« *Il n'est pas de vent favorable pour celui qui ne sait où il va* » Sénèque

« *L'avenir est une source d'incertitude pour la connaissance et de liberté pour l'action* » Bertrand de Jouvenel

De façon générale, l'Évaluation Environnementale Stratégique se déroule en deux temps. Dans un premier temps, l'évaluation de l'état initial présente le contexte de l'étude et permet de faire ressortir un certain nombre d'enjeux et points critiques pour le système analysé. Le Chapitre IV, à travers l'ensemble des analyses menées, a permis de réaliser cette évaluation initiale. Dans un deuxième temps, l'ÉES apporte des éléments d'analyse sur les différentes alternatives et visions prospectives abordées lors de la construction des Politiques, des Plans ou des Programmes (PPP). Afin de juger de la pertinence de l'outil SIMBAD-ACV pour réaliser une ÉES, un ensemble de 17 visions prospectives et de scénarios de mobilité quotidienne de personnes sont proposés avant d'être par la suite analysés.

1.1. Méthode des scénarios par une vision stratégique et prospective

Les exercices de prospective, quels qu'ils soient, sont portés sur l'action en présentant un ensemble de futurs possibles parmi lesquels quelques-uns sont souhaitables. En éclairant les diverses questions actuelles et futures, les démarches prospectives permettent de construire des projets collectifs, autour desquels peuvent être mobilisées différentes ressources humaines et techniques, tout en repérant des faits porteurs d'avenir. Les exercices prospectifs peuvent prendre des formes différentes, qualitatives, avec par exemple la méthode de Delphes, ou quantitatives, avec la construction de modèles (Godet, 2007b).

La méthode des scénarios permet aussi d'analyser différents futurs possibles et les scénarios se différencient entre eux en fonction de leur portée prédictive, exploratoire ou

normative. Les scénarios normatifs (ou *backcasting*) partent d'une image souhaitée du futur pour ensuite reconstituer un cheminement permettant de l'atteindre. Les scénarios prédictifs sont construits à partir de la situation actuelle et des mécanismes passés pour fournir une image probable du futur en fonction des conditions imposées. L'horizon temporel de ces scénarios est souvent court. Les scénarios exploratoires ont une portée temporelle plus longue et cherchent à apporter des éclairages sur des évènements possibles et des ruptures (scénarios de rupture ou *cornerstone*). Ces scénarios ont pour principaux objectifs d'estimer le potentiel de différentes orientations et d'apporter différents éléments stratégiques à long terme pour des systèmes souvent complexes (Börjeson *et al.*, 2006; Pesonen *et al.*, 2000).

La scénarisation est largement utilisée dans les différents modèles LUTI existants, soit avec une approche prédictive pour justifier par exemple une politique d'aménagement ou le développement de réseaux de transport (modèles du Grand Paris Express) (Saujot *et al.*, 2015), soit avec une approche exploratoire afin d'estimer les potentielles retombées économiques, sociales et environnementales de politiques d'aménagement contrastées, par exemple en matière de formes urbaines (Antoni *et al.*, 2015; Nuzzolo *et al.*, 2014).

L'ACV peut être utilisée comme outil de comptabilité environnementale. Cependant, sa principale utilité est l'écoconception et l'aide à la décision vis-à-vis des technologies et des systèmes à venir. Ainsi le scénario est un moyen de représenter l'ensemble ou une partie du système analysé. L'utilisation de scénarios prédictifs est souvent associée aux processus technologiques d'arrière-plan, alors que les scénarios exploratoires permettent de décrire des développements possibles à plus long terme (Börjeson *et al.*, 2006). L'ACV peut aussi être associée à une démarche normative. L'utilisation de scénarios en ACV est aussi vue comme un moyen d'estimer les incertitudes en analysant la stabilité des résultats sous différentes contraintes contrastées (Finnveden *et al.*, 2009; Jolliet *et al.*, 2010).

L'objectif de cette thèse étant de construire un outil d'évaluation stratégique, la démarche exploratoire a été privilégiée, ce qui permet d'une part d'avoir un horizon temporel lointain et stratégique et aussi de soumettre l'outil SIMBAD-ACV à des situations de mobilité contrastées. La présentation, dans le chapitre IV, de différents facteurs explicatifs d'impacts environnementaux associés à la mobilité quotidienne des habitants de l'aire urbaine de Lyon, ainsi que de l'ensemble des éléments de contexte de la mobilité, laisse entrevoir un panel très large et varié de scénarios exploratoires permettant de réduire les impacts environnementaux.

À partir de la présentation de la méthode SIMBAD-ACV (Chap III) et des résultats pour la situation de référence (Chap IV), certains facteurs potentiellement influents ont pu être

repérés, nous les avons regroupés en quatre grandes familles. La première regroupe l'évolution de la composition et de la localisation de la population, afin de rendre compte de l'influence des caractéristiques socio-économiques des ménages et de leurs localisations dans l'aire urbaine de Lyon dont les rôles sont centraux, notamment sur les activités réalisées et les distances parcourues. La deuxième famille s'intéresse aux comportements de mobilité de demain, qui nécessitent d'explorer les évolutions possibles pour les taux de remplissage des véhicules et des parts modales qui représentent des objectifs importants dans les PDU (SYTRAL, 2017). La troisième famille explore le rôle des réseaux de transports sur la mobilité et ses impacts environnementaux. Ce groupe de scénarios explore les effets directs, sur les facteurs d'émissions, et indirects, sur les parts modales notamment, en modifiant les conditions de circulation des différents modes de transport modélisés. Finalement, la dernière famille de scénarios s'intéresse aux technologies mobilisées pour la mobilité quotidienne des personnes. Ainsi le rôle important des facteurs d'émissions et de consommation des véhicules sera interrogé pour les principales orientations en matière de motorisation des voitures.

À travers ces quatre familles d'enjeux, 17 scénarios sont proposés, permettant ainsi d'aborder une partie des interrogations autour de la problématique de la réduction des impacts environnementaux de la mobilité quotidienne des personnes. De plus, deux choix méthodologiques ont été adoptés pour la construction des scénarios : une recherche de contrastes entre les différentes alternatives et une approche « toutes choses égales par ailleurs ». Ceci permet d'une part d'explorer les impacts environnementaux potentiels des différentes options et ainsi borner les impacts environnementaux de la mobilité quotidienne de l'aire urbaine de Lyon de demain. D'autre part, les mécanismes mis en œuvre seront clairement séparés, facilitant ainsi leur analyse et leur compréhension.

1.2. Localisation et évolution des acteurs

La première entrée pour l'analyse prospective de la mobilité quotidienne de personnes passe par les acteurs, avec à la fois leurs localisations et leurs évolutions. Lors de l'analyse du scénario de référence dans le chapitre IV, les paramètres des ménages et la localisation de ces derniers se sont avérés très influant sur les impacts environnementaux de la mobilité. Cette

partie s'intéresse donc aux évolutions potentielles des ménages et de leurs localisations, en simulant différentes formes urbaines ainsi que différentes évolutions démographiques.

1.2.1. Scénarios de formes urbaines

Dans cette partie, nous exploiterons le potentiel du modèle LUTI SIMBAD afin de simuler l'évolution de l'aire urbaine de Lyon vers différentes formes urbaines. La question de la forme urbaine, ici abordée par ses aspects morphologiques et fonctionnels, peut se résumer par des dynamiques de densification et d'étalement combinées (Buisson *et al.*, 2001). Afin de rendre compte des effets de ces phénomènes sur les impacts environnementaux associés à la mobilité quotidienne, trois scénarios contrastés sont proposés : la forme urbaine étalée, la forme urbaine compacte et la forme urbaine polycentrique. Le choix de travailler « toutes choses égales par ailleurs » se traduit par une population identique à la situation de 2009 pour chacun des scénarios, ainsi seule l'organisation spatiale est variable.

Le premier des trois scénarios réalisés représente une forme urbaine étalée avec une relocalisation des logements et des emplois dans les zones périphériques de l'aire urbaine de Lyon. Cette relocalisation ne suit aucun phénomène particulier d'axe ou de pôle avec une diffusion générale des acteurs dans les zones éloignées du centre.

Le deuxième scénario mis en œuvre représente une forme urbaine compacte, en opposition au scénario précèdent, avec une relocalisation des logements et des emplois dans les zones centres. Afin d'éviter des niveaux de densité extrêmes, un seuil de 15 000 logements par km² a été fixé.

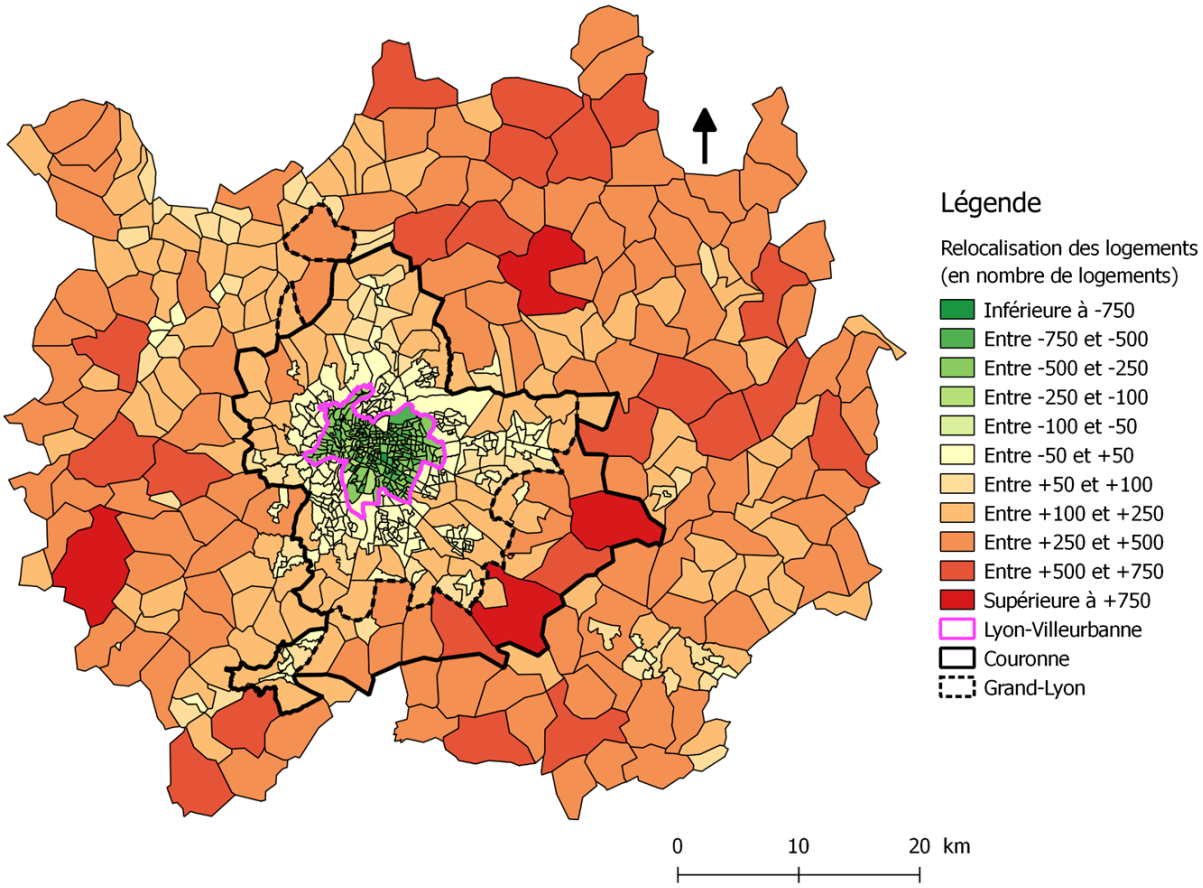
Le dernier scénario de forme urbaine polycentrique reprend la logique d'étalement des acteurs du scénario de forme urbaine étalée en favorisant cette fois la localisation des acteurs autour des axes ferroviaires et des pôles secondaires bien connectés au centre de l'aire urbaine. Ainsi seules les zones éloignées du centre et proches d'une gare ferroviaire sont développées.

La construction des scénarios repose sur trois choix méthodologiques majeurs, la conservation de la population et des emplois par rapport au scénario de référence présenté dans le chapitre précédent, permettant ainsi de séparer les effets liés à la relocalisation, des effets de croissance et de modification des caractéristiques de la population et des emplois, qui sont

simulés par ailleurs. Le deuxième choix réalisé est celui de modifier pour chacun des trois scénarios de forme urbaine 10% des logements, ainsi que 10% des emplois disponibles par rapport à la situation de référence. Ceci permet, d'une part, d'avoir un niveau de variation égal pour ces trois scénarios et, d'autre part, de faire varier significativement l'organisation spatiale pour faire ressortir des effets nettement différenciés. Enfin, la troisième hypothèse de construction des scénarios concerne le périmètre géographique de l'aire urbaine qui est constant alors que des phénomènes de compacification et d'étalement urbains sont simulés. Cette hypothèse est principalement attachée à l'utilisation du modèle SIMBAD, construit pour un périmètre unique.

L'ensemble des hypothèses de travail posées pour la réalisation de ces trois scénarios sont présentées dans l'Annexe 7 et ont été construites dans le cadre de travaux collaboratifs (Pelé, 2018; Pelé et al., 2018). Les trois scénarios de forme urbaine ont donc été construits en traitant l'ensemble des 777 IRIS de l'aire urbaine de Lyon, tout en gardant en tête les différentes contraintes propres au modèle SIMBAD, notamment les aspects spatiaux et dynamiques. L'ensemble des relocalisations des logements réalisées dans les trois scénarios sont illustrées dans les figures suivantes (Figure V-1 : Forme urbaine étalée, Figure V-2 : Forme urbaine compacte, Figure V-3 : Forme urbaine polycentrique).

Figure V-1 : Relocalisation des logements par IRIS pour le scénario de forme urbaine étalée par rapport au scénario de référence

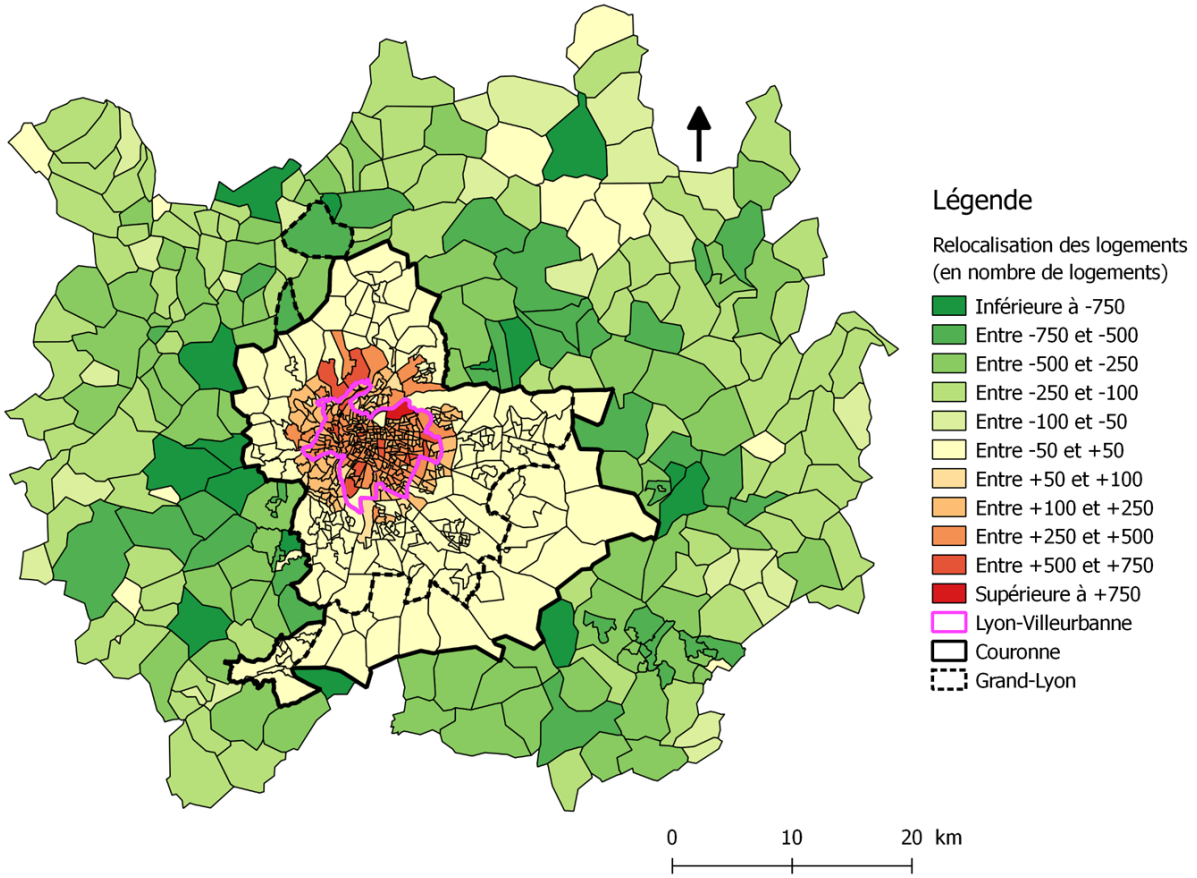


Source : traitement auteur, à partir des données des scénarios simulés dans SIMBAD

Les effets de ces scénarios sur la relocalisation de la population et des emplois sont différents pour les 20 découpages administratifs utilisés (Annexe 8). En fonction du scénario, la population du centre (Lyon-Villeurbanne) est réduite ou augmentée de 25% soit environ 150 000 personnes. Celle de la première couronne ne varie que peu (entre +2% et +5%).

Même si la densité totale des trois scénarios est identique (530 hab/km²), les distances entre les acteurs sont significativement différentes. La Figure V-4 représente la distribution des logements en fonction de la distance au centre (préfecture du Rhône). Les valeurs pour chaque scénario des distances moyennes, médianes et nonantaines (90%) des logements au centre sont aussi présentées dans cette figure, tout comme la distance moyenne séparant deux logements qui mesure l'éloignement moyen pour l'ensemble des logements de l'aire urbaine de Lyon. Cette dernière mesure permet de quantifier le niveau de centralité d'une organisation spatiale (Le Néchet, 2015).

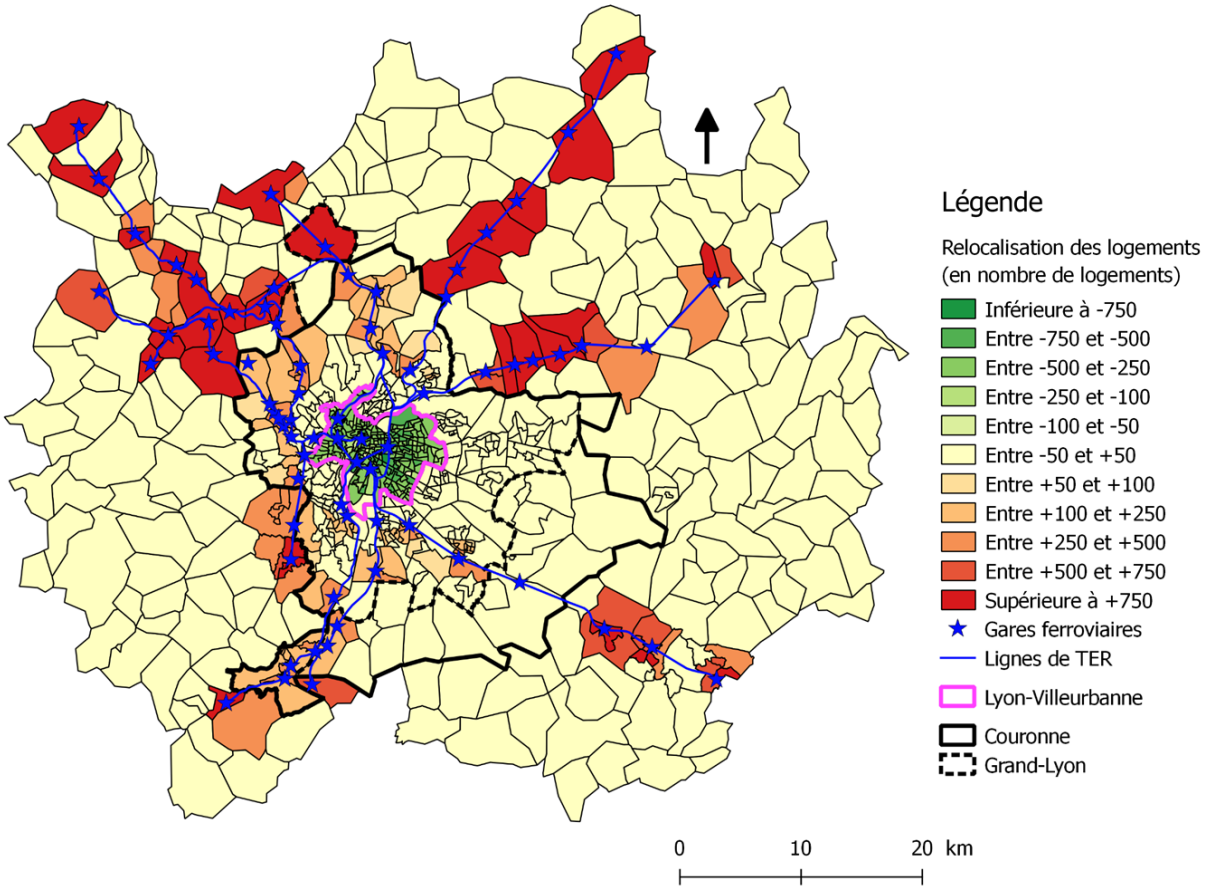
Figure V-2 : Relocalisation des logements par IRIS pour le scénario de forme urbaine compacte par rapport au scénario de référence



Source : traitement auteur, à partir des données des scénarios simulés dans SIMBAD

Au niveau global, les formes urbaines étalée et polycentrique sont comparables avec une distribution des logements par rapport au centre très proche (Figure V-4). Les logements des scénarios étalé et polycentrique sont en moyenne 2 km plus loin du centre, comparé au scénario de référence. Les logements du scénario compact sont en revanche 2 km plus proches du centre. Le travail de Pelé (2018) présente d'autres indicateurs pour caractériser ces trois scénarios, notamment le gradient de densité qui illustre aussi la forte ressemblance à l'échelle de l'aire urbaine de Lyon des scénarios étalé et polycentrique.

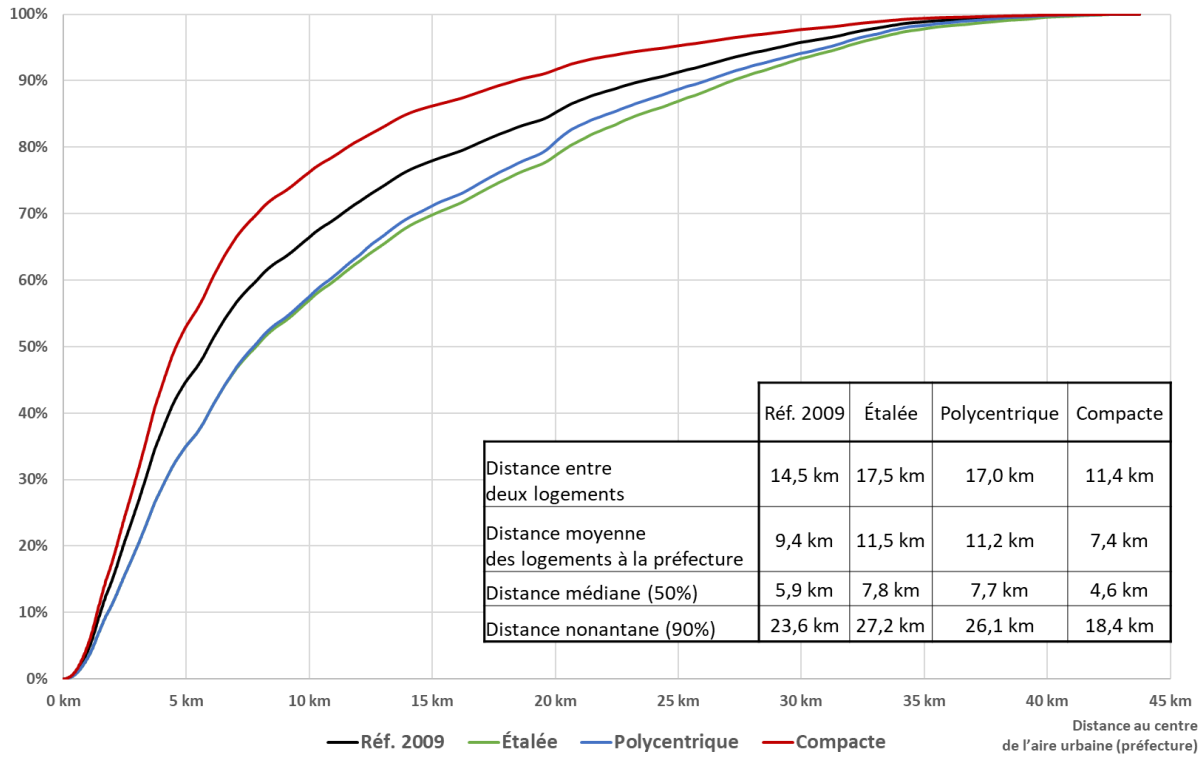
Figure V-3 : Relocalisation des logements par IRIS pour le scénario de forme urbaine polycentrique par rapport au scénario de référence



Source : traitement auteur, à partir des données des scénarios simulés dans SIMBAD

Ces trois scénarios de formes urbaines sont implémentés dans la plateforme LUTI SIMBAD avec les ajustements de localisation des logements et des emplois comme contraintes exogènes. La résolution spatiale associée au modèle SIMBAD ne permet pas de construire des scénarios au niveau infra-IRIS. Notamment, le scénario polycentrique ne détaille pas l'aménagement des quartiers de gare dans les IRIS périphériques qui peuvent correspondre à des communes relativement grandes, avec un centre-ville éloigné de la gare.

Figure V-4 : Distributions cumulées des logements de l'aire urbaine de Lyon en fonction de la distance au centre des scénarios réalisés



	Réf. 2009	Étalée	Polycentrique	Compacte
Distance entre deux logements	14,5 km	17,5 km	17,0 km	11,4 km
Distance moyenne des logements à la préfecture	9,4 km	11,5 km	11,2 km	7,4 km
Distance médiane (50%)	5,9 km	7,8 km	7,7 km	4,6 km
Distance nonantane (90%)	23,6 km	27,2 km	26,1 km	18,4 km

Source : traitement auteur, à partir des données des scénarios simulés dans SIMBAD

Les trois scénarios ainsi construits sont comparables en taille et vont permettre d'explorer l'influence de la forme urbaine à travers trois orientations d'aménagement et ceci toutes choses égales par ailleurs. Les résultats obtenus pour ces scénarios serviront à mieux comprendre une partie des mécanismes urbains influents sur les impacts environnementaux et pourront orienter les politiques d'aménagement présentes à l'échelle stratégique de l'aire urbaine de Lyon.

1.2.2. Scénarios d'évolution démographiques et économiques

Contrairement aux scénarios de formes urbaines qui modifient la répartition spatiale des logements et des emplois sur le territoire, les scénarios d'évolution démographique et

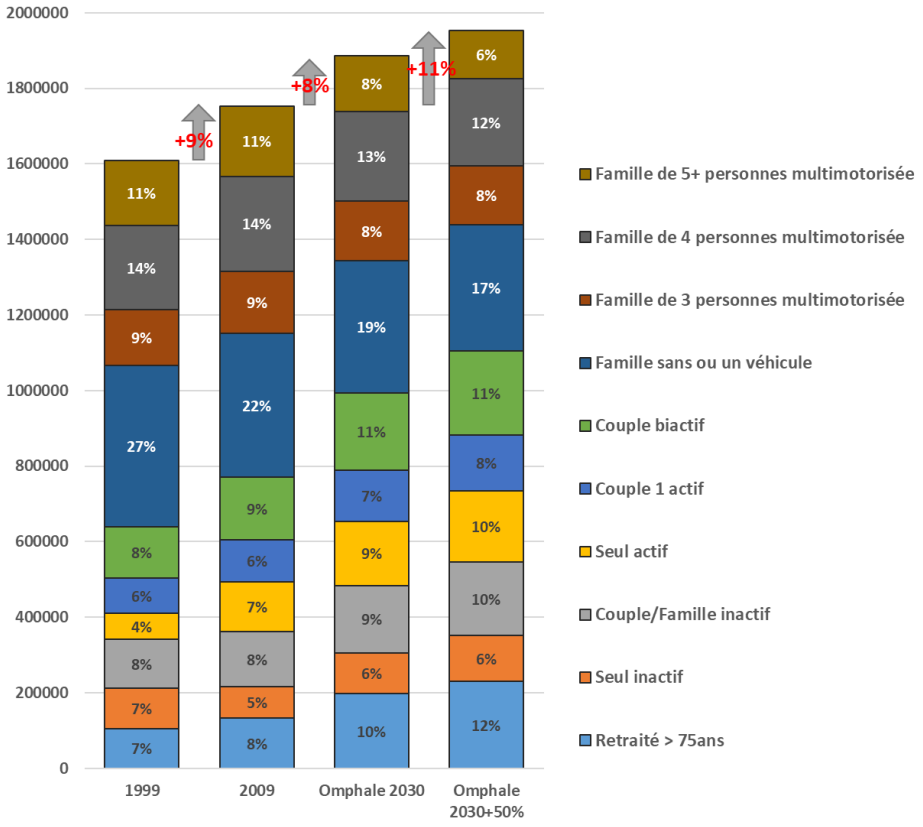
économique gardent fixe l'organisation spatiale du scénario de référence. Seuls le nombre et les caractéristiques des ménages et des emplois sont modifiés.

Deux scénarios ont été construits pour illustrer le rôle de l'évolution démographique et économique sur les impacts environnementaux de la mobilité quotidienne des personnes. Ils reposent sur les projections démographiques réalisés en 2009 par le modèle Omphale de l'INSEE qui décrit pour chaque année l'évolution des différentes classes de ménages[32]. Le premier scénario, « Omphale 2030 », correspond aux projections démographiques pour l'année 2030 et le deuxième scénario, « Omphale 2030 + 50% », correspond à la même projection, mais accentuée de 50%, c'est-à-dire que les taux d'évolution de chaque classe de ménages sont multipliés par 1,5. Si une catégorie de ménages décroit, comme pour les familles nombreuses (4 personnes ou plus), cette décroissance est aussi accentuée de 50% dans le scénario « Omphale 2030 + 50% ». Ce scénario permet à la fois de prendre en compte la croissance démographique plus forte que prévue par le modèle Omphale et d'accentuer les tendances. En 2014, la population du périmètre d'étude est recensée à 1 889 816 habitants (Tableau III.1), ce qui est supérieur à la projection Omphale pour 2030. La Figure V-5 présente la taille et la composition des populations modélisées de l'aire urbaine de Lyon pour 1999, 2009, et pour les deux scénarios réalisés. Pour ces quatre situations, la population est respectivement de 1 609 055 habitants, 1 753 440 habitants, 1 886 245 habitants et 1 952 923 habitants.

Un scénario prédictif pour les emplois à l'horizon 2030 existe déjà pour l'aire urbaine de Lyon (Nicolas *et al.*, 2009), il a été repris tel quel pour le scénario « Omphale 2030 ». Pour le scénario « Omphale 2030 +50% », le nombre d'emplois supplémentaires a été calculé à partir du nombre d'actifs potentiels dans la population, déterminé à partir de la composition de la population (un nombre d'actif moyen est associé aux ménages en fonction de leur taille et de leur âge). Au final, le scénario « Omphale 2030 » présente une croissance du nombre d'emplois de +7,3% par rapport à 2009, contre +11,3% pour le scénario « Omphale 2030 + 50% ».

[32] Projections démographiques Omphale de l'INSEE : https://www.insee.fr/fr/information/1303412

Figure V-5 : Taille et composition des populations de l'aire urbaine de Lyon en 1999, 2009 et pour les deux scénarios réalisés



Source : traitement auteur, à partir des projections Omphale de 2009, INSEE

À travers l'analyse de ces deux scénarios de croissance démographique et économique, deux effets pourront être discutés, l'effet taille puisque la population va croître significativement dans les deux scénarios, ainsi que l'effet de composition démographique. En effet, dans les deux scénarios proposés, la taille des ménages va décroitre, avec plus de personnes vivant seules, mais aussi plus de personnes âgées (Figure V-5).

De façon analogue aux scénarios de formes urbaines, ces deux scénarios sont implémentés à partir de la plateforme SIMBAD qui permet l'introduction de paramètres d'évolutions démographique et économique exogènes. La structure des logements et des emplois reste identique à celle de la situation de référence.

1.3. Comportements de mobilité

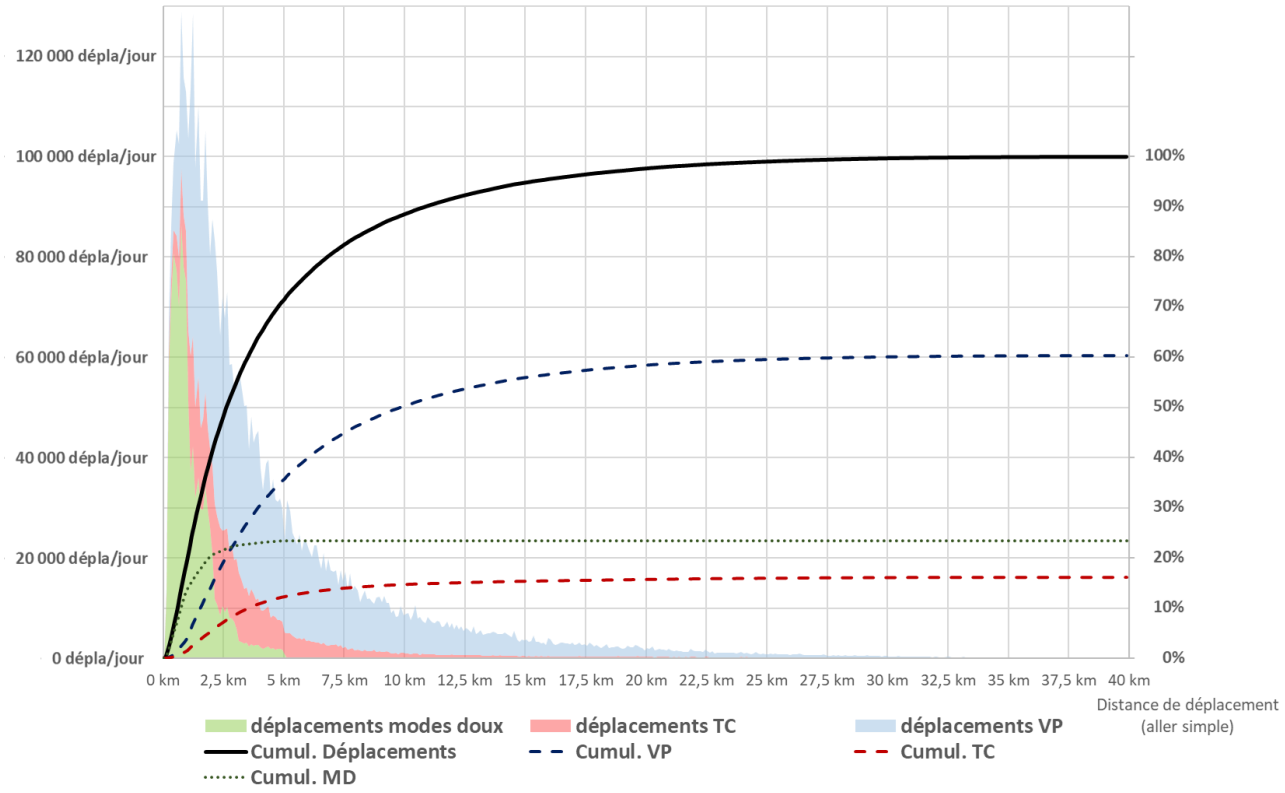
Lors de la construction du modèle SIMBAD (cf. Chap III Partie 2), plusieurs hypothèses ont été formulées pour représenter les différentes pratiques de mobilité des habitants de l'aire urbaine de Lyon. Deux d'entre-elles seront modifiées afin de créer deux nouveaux scénarios qui auront pour objectif d'explorer l'influence et le potentiel d'une pratique renforcée des modes doux et du covoiturage sur les impacts environnementaux de la mobilité quotidienne des personnes.

1.3.1. Scénario « potentiel vélo »

Le développement de l'usage des modes doux, comprenant la marche à pied et le vélo, est devenu un enjeu majeur de la mobilité urbaine et quotidienne. Le PDU de la métropole de Lyon s'est posé comme objectif en 2030 d'une part de 43% des déplacements de son territoire réalisés en modes actifs (35% à pied et 8% en vélo) avec un fort développement du vélo entre 2015 et 2030 (SYTRAL, 2017).

L'analyse du scénario de référence estime que 24% des sorties de ménages sont réalisées en modes doux dans l'aire urbaine de Lyon. Cependant, la Figure V-6, qui représente la distribution des déplacements en fonction de leur longueur et de leur mode, montre que 71% d'entre eux font moins de 5 km aller. Parmi ces déplacements seulement un tiers est réalisé en modes doux et la moitié est réalisée en véhicules personnels. À partir de ce constat, un scénario de potentiel sur le vélo a été construit pour explorer les impacts potentiels de ce mode sur l'environnement.

Figure V-6 : Distribution des déplacements du scénario de référence en fonction des trois modes principaux et de la distance



Source : traitement auteur, à partir des données de SIMBAD pour le scénario de référence

La construction du scénario « potentiel vélo » repose en partie sur une méthodologie déjà existante développée à Montréal (Godefroy, 2011). La première étape de cette méthode consiste à déterminer les distances seuils de report vers le vélo constatées suivant les principaux motifs de déplacements. Ces seuils sont calculés à partir des données de l'EMD 2015 de l'aire urbaine de Lyon et ils correspondent, pour chaque motif, au seuil de distance à l'intérieur duquel 80% des cyclistes enquêtés ont réalisés leurs déplacements. L'échantillon de cyclistes de l'EMD a permis de différencier 3 motifs différents dont les seuils sont présentés dans le Tableau V-1. En utilisant ces seuils tels quels, on estime que 66% des déplacements quotidiens des habitants de l'aire urbaine de Lyon sont réalisables en vélo. Cette estimation est légèrement supérieure à l'estimation réalisée sur Montréal de 61,2% (Godefroy, 2011).

Tableau V-1 : Seuils de distance et potentiel de la pratique du vélo par motifs de l'aire urbaine de Lyon

	Travail	Achats et services	Éducation et Autres	Tous motifs
Seuil vélo (EMD 2015) pour un aller	5,3 km	3,0 km	4,2 km	-
Déplacements réalisables en vélo	56%	65%	72%	66%

Source : traitement auteur, à partir de l'EMD de Lyon 2015

Certains critères supplémentaires de report vers le vélo sont appliqués dans l'étude montréalaise, notamment sur le genre, l'âge de la personne et sur le type de chaine de déplacement, que le modèle SIMBAD ne permet pas d'introduire. Le choix est fait de transférer vers les modes doux 80% des déplacements dont les distances sont inférieures aux seuils calculés.

Le scénario de « potentiel vélo » consiste donc à modifier certains paramètres du choix modal entre mode doux et modes motorisés en introduisant les seuils de pratique de vélo déterminés précédemment. Dans le modèle SIMBAD, le développement du vélo se fait au détriment à la fois de la voiture et des transports en commun. Les résultats de ce scénario permettront de juger de l'impact maximum d'une politique vélo sur les différents enjeux environnementaux des transports.

1.3.2. Scénario « covoiturage »

Le développement du covoiturage constitue aussi un volet important des politiques de mobilité, notamment dans la Métropole de Lyon où l'objectif pour 2020 est d'atteindre 1,4 passager par véhicule (SYTRAL, 2017). Le scénario de référence estime le taux de remplissage à 1,26 passager par véhicule à partir de paramètres utilisés dans le modèle SIMBAD pour l'aire urbaine de Lyon. Afin d'estimer l'impact sur l'environnement d'une politique de covoiturage, l'ensemble des paramètres de remplissage des véhicules personnels, discriminés par

localisation et par motifs sont modifiés pour représenter une augmentation de 0,1 passager par véhicule. Les taux de remplissage par motif sont présentés dans le Tableau IV-11 pour la situation de référence.

1.4. Caractéristiques des réseaux et de l'offre de transport

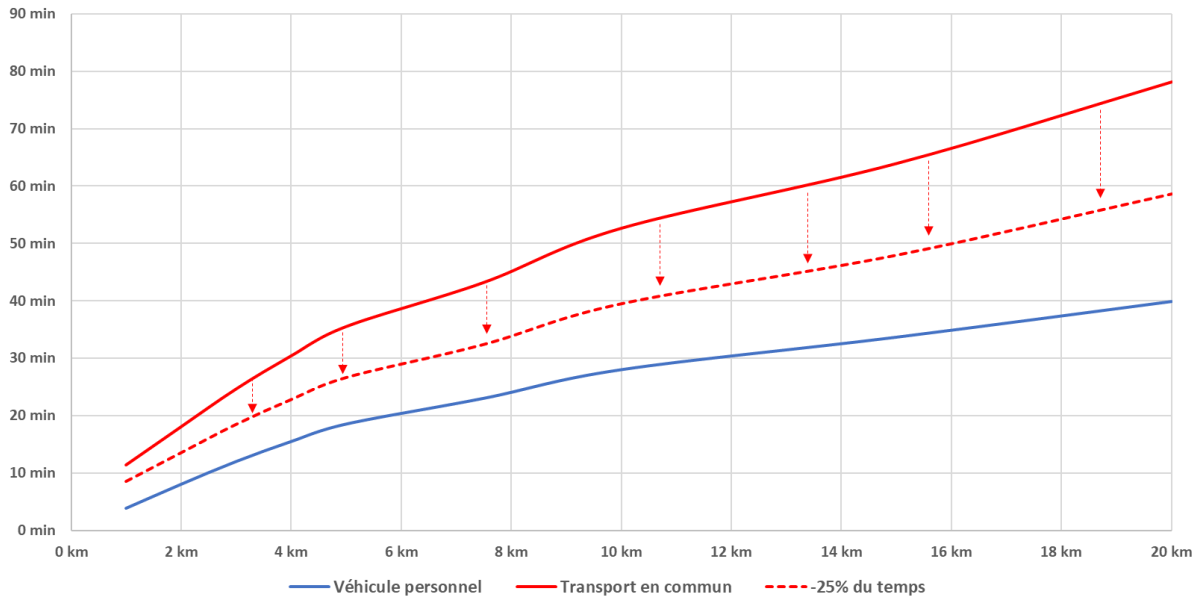
Les deux scénarios précédents, qui explorent l'évolution des comportements de mobilité quotidienne, considèrent le réseau de transport comme constant. Les deux scénarios suivants conservent à l'identique les paramètres du modèle caractérisant les comportements de mobilité. En revanche, des modifications sont apportées sur les réseaux de transports soit en améliorant les transports en commun soit en contraignant la circulation des voitures afin de réduire l'usage des véhicules personnels fortement contributeurs aux impacts environnementaux.

1.4.1. Scénario « Amélioration des transports en commun »

Le premier des scénarios de modification du réseau de transport consiste à améliorer les transports en commun afin de les rendre plus concurrentiels par rapport aux véhicules personnels. Dans le scénario de référence, 16% des sorties sont réalisées en transports en commun contre 60% en voiture. Dans le modèle de choix modal (Chap III 2.1.2), les temps inter-zones de la voiture et des transports en commun sont utilisés pour répartir les flux entre ces deux modes. Le scénario mis en œuvre pour illustrer une amélioration de l'offre de TC consiste à améliorer les temps en TC de 25%, sans modifier le reste de réseau de transport et sans induire d'impacts supplémentaires pour les TC.

La Figure V-7 présente les temps moyens de déplacement pour les véhicules personnels et les transports en commun en fonction de la distance du déplacement, ainsi que l'effet direct d'une amélioration de 25% des temps en TC. On constate qu'en moyenne sur l'aire urbaine de Lyon les transports en commun sont 2 fois plus lents que la voiture. Le scénario « amélioration des transports en commun » réduit d'environ de moitié la différence des temps de déplacements entre ces deux modes.

Figure V-7 : Temps de déplacement en voiture et en transports en commun en fonction de la distance

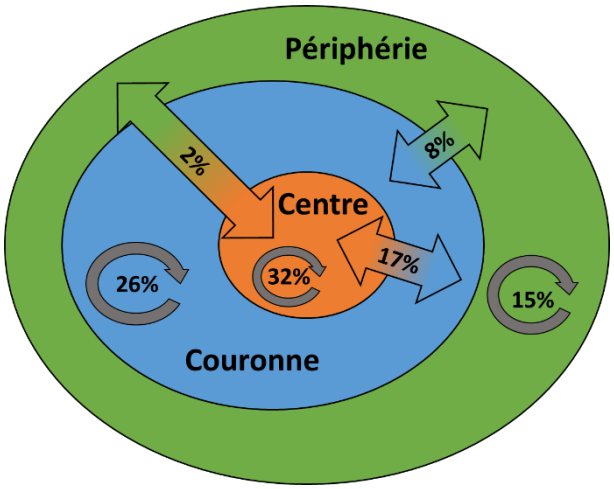


Source : traitement auteur, à partir des données de SIMBAD pour le scénario de référence

1.4.2. Scénario « Zone 30 km/h »

Afin de susciter un report modal sur les transports en commun, il est aussi possible de contraindre l'usage de la voiture et d'en pénaliser l'usage. Le choix réalisé ici pour restreindre la voiture est de mettre en place une zone 30 km/h sur la majeure partie du centre de l'aire urbaine de Lyon (dans Lyon et Villeurbanne). Certains quartiers de Lyon font déjà partie d'une réglementation zone 30 km/h, notamment sur la presqu'ile et le vieux Lyon. La Figure V-8 montre l'intérêt majeur de cette zone 30 km/h étendue au centre pour la mobilité quotidienne de personnes de l'aire urbaine puisque 51% des déplacements de l'aire urbaine de Lyon partent ou se rendent dans le centre. La mise en place d'une politique d'apaisement de la circulation dans le centre aura ainsi un effet global.

Figure V-8 : Flux de déplacements de l'aire urbaine de Lyon dans le scénario de référence

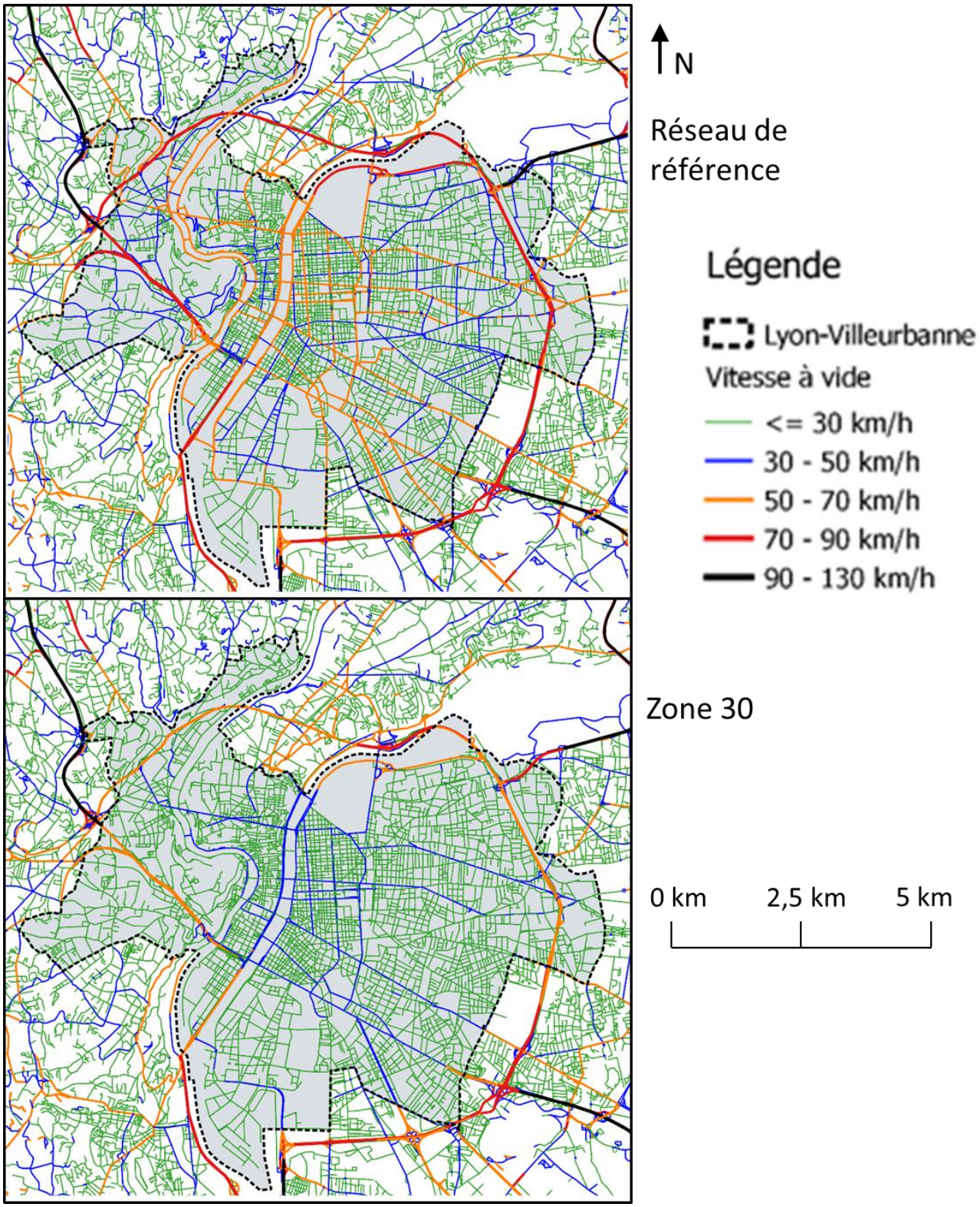


Source : traitement auteur, à partir des données de SIMBAD pour le scénario de référence

Afin de réaliser ce scénario de zone 30 km/h, une partie du réseau de voirie a été modifié dans le modèle VISUM de SIMBAD avant d'être réintroduit dans le modèle. Après modification du réseau, 87% des tracés de voiries du centre sont limités à 30km/h, 8,5% sont limités à 50 km/h, ces tronçons correspondent aux pénétrantes de Lyon, enfin 4,5% sont limités à 70 km/h, il s'agit des axes périphériques, notamment les périphériques Est et Nord (Figure V-9). Le reste du réseau est gardé intact.

Dans ce scénario, la seule hypothèse modifiée par rapport à la situation de référence est la réduction des vitesses de circulation des voitures, avec pour objectif de susciter un potentiel report modal. En revanche, les conséquences sur les comportements de mobilité, notamment liées aux modes actifs, ne sont pas modifiées malgré l'effet positif qu'offre une zone de circulation apaisée (type zone 30 km/h) sur certaines pratiques. Le réaménagement de l'espace public en réponse à la mise en œuvre d'une zone 30 km/h n'est pas pris en compte puisque l'usage du sol reste identique au scénario de référence. Les conflits d'usage entre les modes qui se relâchent dans les zones de rencontre ne sont pas intégrés non plus (Fédération nationale des agences d'urbanisme, 2014; Wiel, 2008).

Figure V-9 : Modifications apportées au réseau de voirie pour le scénario « Zone 30 km/h »



Source : traitement auteur, données SIMBAD

1.5. Amélioration du système technologique

Le dernier groupe de scénarios utilisés dans cette partie prospective s'intéresse directement aux processus technologiques associés aux parcs automobiles des habitants de l'aire urbaine de Lyon. L'analyse du scénario de référence a mis en avant le rôle important des facteurs d'émissions et de consommations des véhicules personnels dans le bilan environnemental de la mobilité quotidienne de personnes. De plus, la chaine d'approvisionnement en carburant s'est aussi avérée être une phase générant de nombreux impacts sur l'environnement.

L'objectif des scénarios suivants est donc d'explorer les effets potentiels de différentes politiques d'évolution du parc automobile ainsi que d'approvisionnement en énergie. Pour bien mesurer les effets de technologies automobiles, les technologies associées aux transports en commun sont conservées à l'identique de celles utilisées dans le scénario de référence.

1.5.1. Scénarios de parc automobile

Le parc automobile utilisé dans le scénario de référence a été construit à partir de l'EMD 2015 de l'aire urbaine de Lyon et il distingue les véhicules en fonction de leur carburation, leur taille et de leur année d'immatriculation (et donc en norme EURO correspondante). Les parcs prospectifs utilisés dans cette partie s'intéressent alors à l'influence de chacun de ces trois paramètres sur l'environnement.

Scénario « petit gabarit »

Le poids du véhicule est un facteur central pour la construction d'un parc automobile puisqu'il influence à la fois la consommation de carburants et la quantité de matières premières à extraire pour concevoir le véhicule. Ces dernières années, le poids des véhicules vendus en Europe a significativement augmenté : entre 2001 et 2015 les véhicules ont grossi de 10% environ, lié notamment aux fortes ventes de véhicules SUV (ICCT, 2017).

Afin d'estimer l'impact d'un parc significativement plus petit sur les émissions de polluants, le scénario « petit gabarit » redimensionne l'ensemble des véhicules du parc de référence tout en gardant la carburation et l'âge des véhicules constants. Le parc automobile est caractérisé par quatre tailles de véhicule (*Large*, *Medium*, *Small* et *Mini*). Le parc construit dans ce scénario est constitué à deux tiers de véhicules *Small* et à un tiers de véhicules *Mini* qui pèsent respectivement 1 200 kg et 1 000 kg, soit un poids moyen de 1 133 kg. Le parc ainsi créé est donc 14% plus léger que le parc de référence (1 325 kg[33]).

Scénario « EURO 6 »

La mise en place de mesures de plus en plus contraignantes sur les émissions unitaires de polluants atmosphériques (norme EURO) et le développement de nouvelles technologies de dépollution ont permis de réduire drastiquement les émissions polluantes de véhicules mis en services. Les véhicules récents apparaissent donc plus propres que les modèles anciens, c'est pour cela que certaines villes, dont Lyon, ont adopté la vignette Crit'Air pour restreindre l'usage de vieux véhicules pendant les épisodes de pollution et ainsi encourager le renouvellement des véhicules âgés.

Un scénario « EURO 6 » a été construit pour analyser l'influence de l'âge des véhicules sur les impacts environnementaux de la mobilité quotidienne des personnes. Il a consisté à modifier l'âge de l'ensemble du parc automobile de référence pour amener toutes les voitures à la norme EURO 6 de 2015, sans changer leur carburation ni leur taille. Le parc ainsi créé est alors 7,5 ans plus récent que le parc de référence.

Motorisations alternatives

Les deux derniers parcs automobiles explorés dans cette approche prospective introduisent de façon significative des motorisations alternatives aux carburants liquides traditionnels. Le premier scénario examine l'influence de la motorisation électrique sur

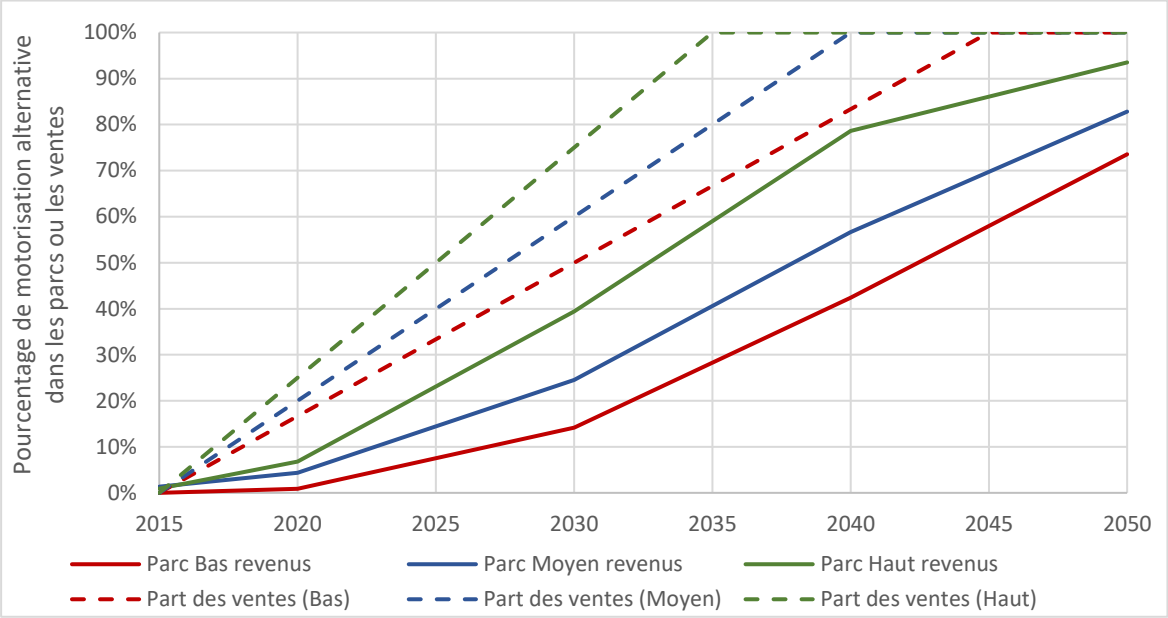
[33] Le parc de référence est constitué de : *Mini* 0,2% ; *Small* 48% ; *Medium* 44% ; *Large* Essence 1% ; *Large* Diesel 5% et le reste de motorisations alternatives (soit 1,2%)

l'environnement alors que le deuxième explore une orientation de la motorisation automobile vers le gaz naturel. La vente de véhicules électriques commence à croître ces dernières années, et même si seulement 1,2% des véhicules neufs étaient électriques en 2017, 3,9% étaient hybrides électriques[34]. La vente de véhicules personnels à gaz naturel est encore insignifiante en 2017, ce type de motorisation restant plus présent pour les véhicules de logistiques ou de transports en commun.

La construction des scénarios de motorisations alternatives est identique pour les deux énergies considérées et repose sur quatre hypothèses. La première consiste à fixer un horizon temporel à 2030. La deuxième hypothèse considère l'âge du parc automobile comme constant par rapport à l'âge de référence, c'est-à-dire 7,5 ans, ce qui implique à l'horizon 2030 le renouvellement d'une partie du parc automobile. La troisième hypothèse introduit la part de véhicules à motorisation alternative parmi les véhicules renouvelés chaque année. Cette part est considérée comme croissante entre 2015 et 2040, date à laquelle tout nouveau véhicule est à motorisation alternative. Cette hypothèse correspond à des objectifs de fin de la vente de véhicules Diesel et Essence en 2040, annoncés en France par Nicolas Hulot en juillet 2017 et par le gouvernement Espagnol en novembre 2018. Enfin, la dernière hypothèse discrimine l'accès aux nouvelles motorisations en fonction du niveau de revenu des ménages en fixant à 2035 la fin de la vente de véhicule à carburants traditionnels pour les ménages les plus aisés et à 2045 pour les ménages les plus modestes. Les taux d'intégration annuels des véhicules à motorisations alternatives dans les ventes et dans le parc automobile sont présentés dans la Figure V-10 pour les trois niveaux de revenu.

[34] Données du CGDD, 2017, http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/transports/s/vehicules-routiers-immatriculations.html

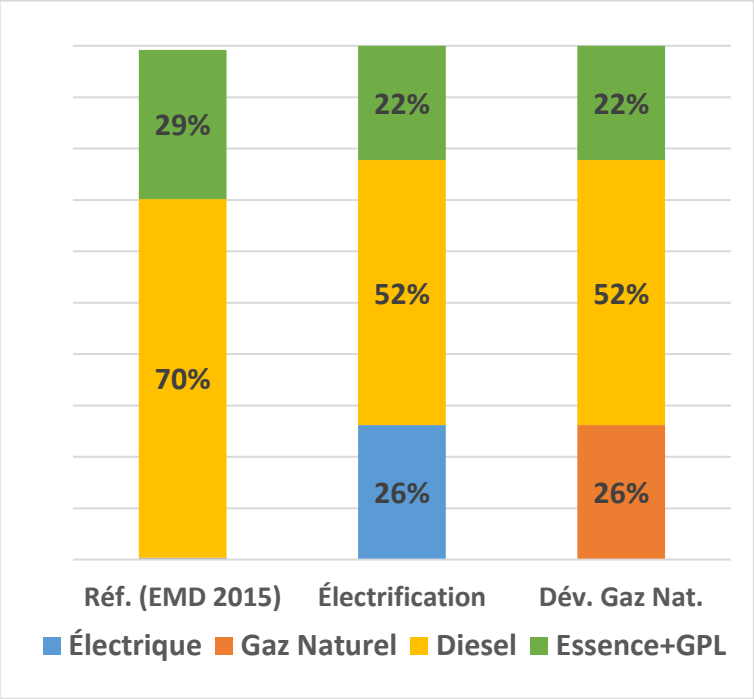
Figure V-10 : Hypothèse d'évolutions du parc et des ventes de véhicules à motorisation alternative en fonction du revenu des ménages



Source : traitement auteur

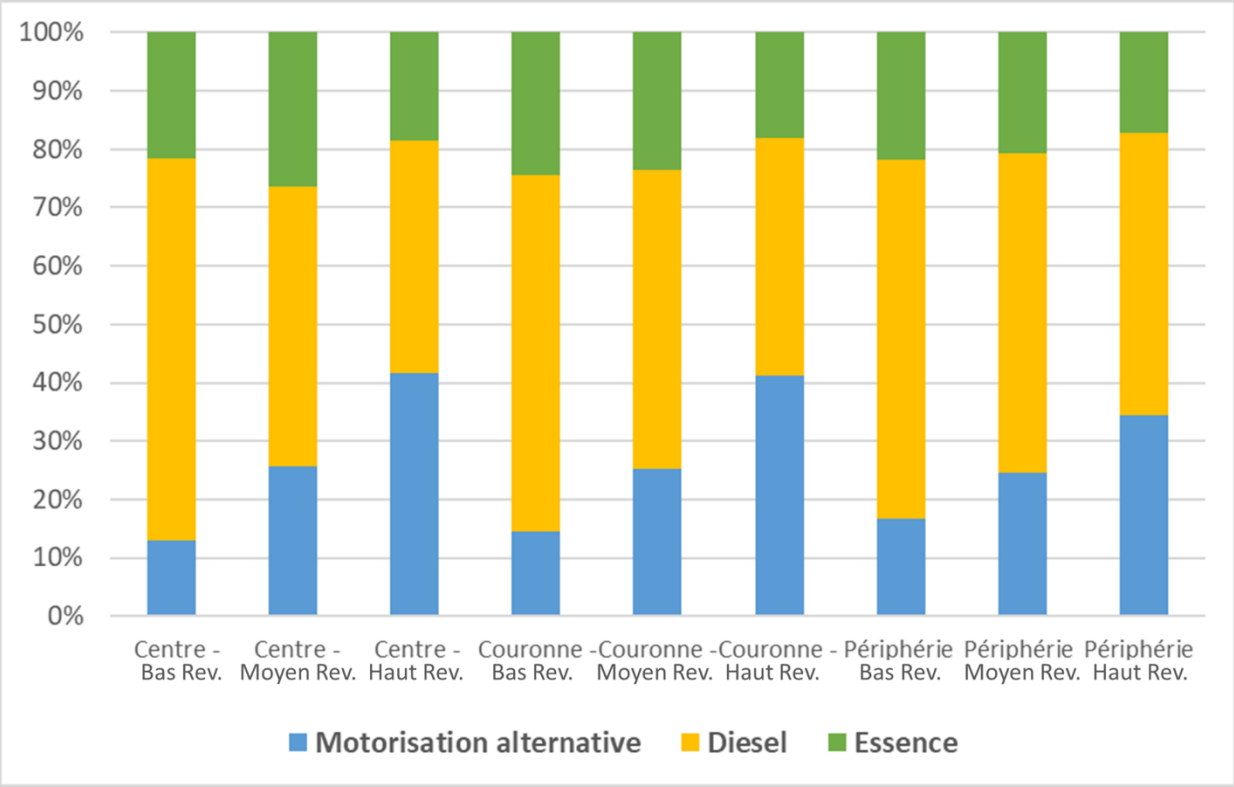
En appliquant ces quatre hypothèses, le parc moyen à l'horizon 2030 est constitué à 26% de véhicules à motorisations alternatives (Figure V-11). L'hypothèse de discrimination de l'accès aux motorisations alternatives combinée à la différence d'âge des véhicules en fonction du type de ménages amplifie les différences entre les parcs automobiles des différents types de ménages. Par exemple, le parc automobile roulant associé aux ménages modestes du centre de l'aire urbaine n'est alors composé qu'à 13% de véhicules alternatifs contre 42% pour le parc associé aux ménages aisés du centre (Figure V-12).

Figure V-11 : Constitution par énergies du parc automobile roulant de référence et des parcs de motorisation alternative à l'horizon 2030



Source : traitement auteur

Figure V-12 : Parcs automobiles par classes de ménages pour les scénarios de motorisations alternatives à l'horizon 2030



Source : traitement auteur

Au final, les deux scénarios construits introduisent de façon significative deux nouvelles énergies de carburation dans le parc automobile roulant, permettant ainsi d'analyser l'impact sur l'environnement du développement des deux technologies correspondantes. De plus, l'introduction de nouvelles technologies de motorisation a été différenciée par niveau de revenu afin de refléter la difficulté d'accès à ces nouvelles technologies pour les ménages les plus modestes. Malgré les nouvelles contraintes d'aménagement et de mobilité qui découlent du développement de la mobilité électrique et à gaz, les paramètres du modèle LUTI sont conservés identiques à ceux du scénario de référence.

1.5.2. Scénarios de vecteurs énergétiques

Au-delà du type de motorisation utilisée dans les véhicules, le carburant utilisé et sa production constituent un deuxième facteur important d'impacts environnementaux des systèmes de transports. Il joue à la fois sur les gaz d'échappement émis et sur les émissions et impacts associés à la production des carburants. Dans la situation de référence, 15% des émissions de GES sont associées à la production et à l'acheminement des carburants.

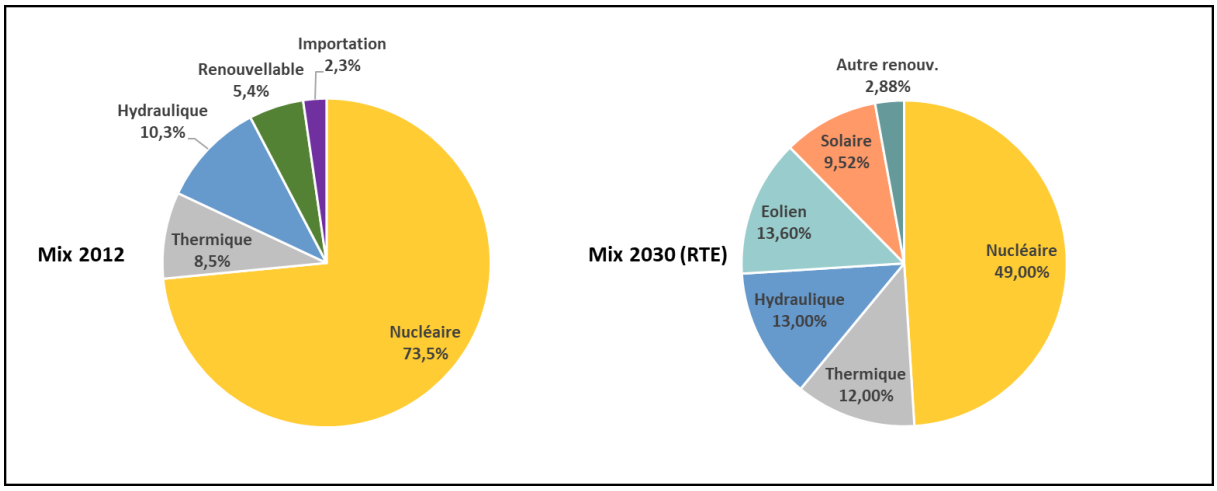
L'approche prospective proposée dans cette partie sur l'approvisionnement énergétique s'intéresse uniquement à deux vecteurs d'énergie, l'électricité et le gaz naturel. À partir des deux parcs automobiles introduisant des véhicules électriques et à gaz, différentes chaines de production énergétique ont été simulées. Par contre, la production et l'incorporation de biocarburants dans les carburants traditionnels (Essence et Diesel) ne feront pas l'objet d'analyse prospective ici. En effet, de nombreuses publications documentent les effets sur l'environnement de la production des différentes générations de biocarburants, en révélant, notamment, une grande variabilité associée aux paramètres techniques et spatiaux (ADEME, 2010; Hill, 2013; Menten, 2013).

Approvisionnement électrique

L'usage de véhicules électriques supprime les émissions de gaz d'échappement associées aux moteurs à combustion interne. En revanche, des émissions polluantes ont lieu sur les divers sites de production électrique. Afin d'illustrer les impacts environnementaux de différentes logiques d'approvisionnement en électricité, trois systèmes de production ont été envisagés.

Dans le premier scénario, la production d'électricité correspond à la vision prospective de RTE (Réseau de Transport d'Électricité) réalisée à l'horizon 2030 (RTE, 2015). Le mix énergétique simulé, présenté en Figure V-13, introduit de façon significative les énergies renouvelables tout en réduisant la part du nucléaire.

Figure V-13 : Mix énergétiques utilisés pour la production électrique de référence et du scénario « 2030 »

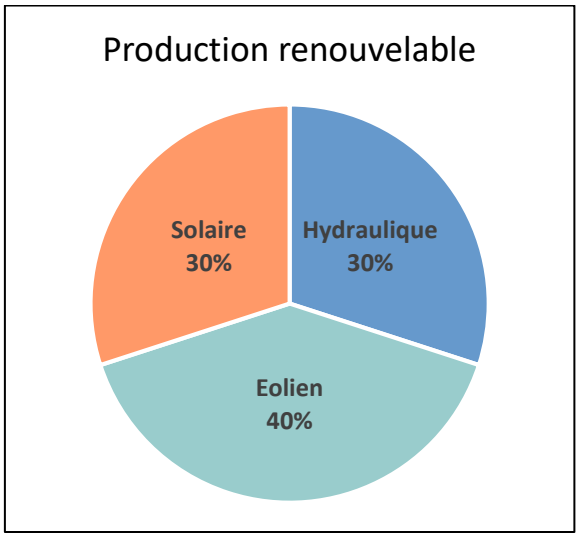


Source : Ecoinvent v3.3 et RTE (2015)

Le deuxième scénario réalisé estime l'approvisionnement électrique comme étant assuré à 100% par des sources de production renouvelable. Le transfert de 26% du parc automobile de l'aire urbaine de Lyon vers une motorisation électrique entraine une demande électrique d'environ 1 GWh par jour[35], soit, pour les 227 jours représentant la mobilité quotidienne, 3% de la consommation annuelle électrique actuelle du Grand Lyon. L'hypothèse d'un recouvrement total de la consommation électrique associé aux véhicules électriques par des sources renouvelables est donc envisageable. Pour ce scénario, la production électrique est répartie entre les productions hydroélectriques, éoliennes et solaires (Figure V-14). Cela impliquerait des systèmes de gestion intelligente de l'électricité qui permettrait d'utiliser les véhicules électriques comme outils de stockage de l'électricité produite au moment où les systèmes d'énergies renouvelables fonctionnent à leur pleine puissance (Lund & Kempton, 2008).

[35] Environ 18 millions de véhicules.km sont parcourus par jour dans le scénario de référence et la consommation unitaire d'un véhicule électrique et estimé à 0,2 kWh / km (EcoInvent 3.3)

Figure V-14 : Mix énergétique pour la production d'électricité renouvelable



Le troisième scénario de production électrique construit dans ce travail prospectif, interroge la capacité du système de production électrique à fournir l'énergie et la puissance nécessaire pour recharger l'ensemble des nouveaux véhicules électriques introduits dans le parc. En effet, les véhicules électriques sont branchés aux bornes de recharge après leur utilisation, c'est-à-dire, pour une grande partie, lors des périodes de pointes, qui correspondent aussi à des périodes de fortes consommations électriques. Lors de ces périodes, le fournisseur électrique a recours aux centrales thermiques et aux réserves hydrauliques pour répondre rapidement à cette hausse de consommation. De plus, la puissance nécessaire à la recharge des véhicules est un deuxième problème pour le gestionnaire du réseau électrique. En effet, la puissance d'une borne de recharge fluctue entre 3kW et 50 kW (pouvant atteindre 120/150 kW pour les superchargeur de Tesla) et plus de 200 000 véhicules électriques sont intégrés au parc automobile Lyonnais simulé (sur environ 900 000 véhicules). Ceci représente un potentiel de puissance compris entre 600 MW et 10 GW, soit l'équivalent de 0,4 à 6 réacteurs nucléaires de type EPR en construction à Flamanville si tous les véhicules sont rechargés au même moment.

Afin de répondre à ces problématiques de pointes et de puissance, les sources renouvelables d'électricité ne sont pas appropriées, ou nécessiteraient un système de gestion intelligente basé sur la présence de points de recharge pour le stationnement de jour et de nuit. C'est pour cela qu'un scénario d'approvisionnement électrique à partir de centrale à gaz naturel est proposé dans l'analyse.

Les trois scénarios ainsi créés permettent d'explorer trois horizons différents pour la production électrique et l'approvisionnement des véhicules électriques. Le premier scénario reprend la vision prospective de l'exploitant du réseau électrique (RTE), le deuxième scénario analyse une orientation vers le tout renouvelable dans la production électrique, alors que le troisième scénario considère un approvisionnement en électricité des véhicules électriques à partir de centrales à gaz naturel. Pour chacun de ces scénarios, les impacts environnementaux associés aux bornes de recharges électriques ne sont pas inclus.

Approvisionnement en gaz

Dans le cas du développement du véhicule personnel au gaz naturel, l'approvisionnement est aussi un paramètre important qui est l'objet de deux scénarios dans cette partie. À partir des distances parcourues en voitures dans le scénario de référence, un transfert de 26% de ce trafic vers des véhicules à gaz naturel implique une consommation d'environ 3,7 GWh de gaz naturel par jour[36].

La première filière d'approvisionnement utilisée dans le premier scénario est le gaz naturel disponible dans le réseau national. La majeure partie de ce gaz provient de gisements fossiles. Cependant, l'injection de biométhane dans le réseau est de plus en plus importante, et l'objectif, présenté par la Loi de Transition Énergétique pour la Croissance Verte (LTECV), d'atteindre en 2030 10% de gaz consommés d'origine renouvelable repose notamment sur le développement de la méthanisation. Ainsi, le choix réalisé dans ce scénario sera d'intégrer 5% de biométhane avec du gaz naturel d'origine fossile.

Le deuxième scénario illustre un développement des filières de méthanisation pour l'approvisionnement des véhicules personnels à gaz. Dans ce scénario, 100% du gaz consommé par les véhicules est produit par des méthaniseurs, sans considérer les potentiels conflits avec d'autres usages du biogaz (chauffage, énergie, industrie …).

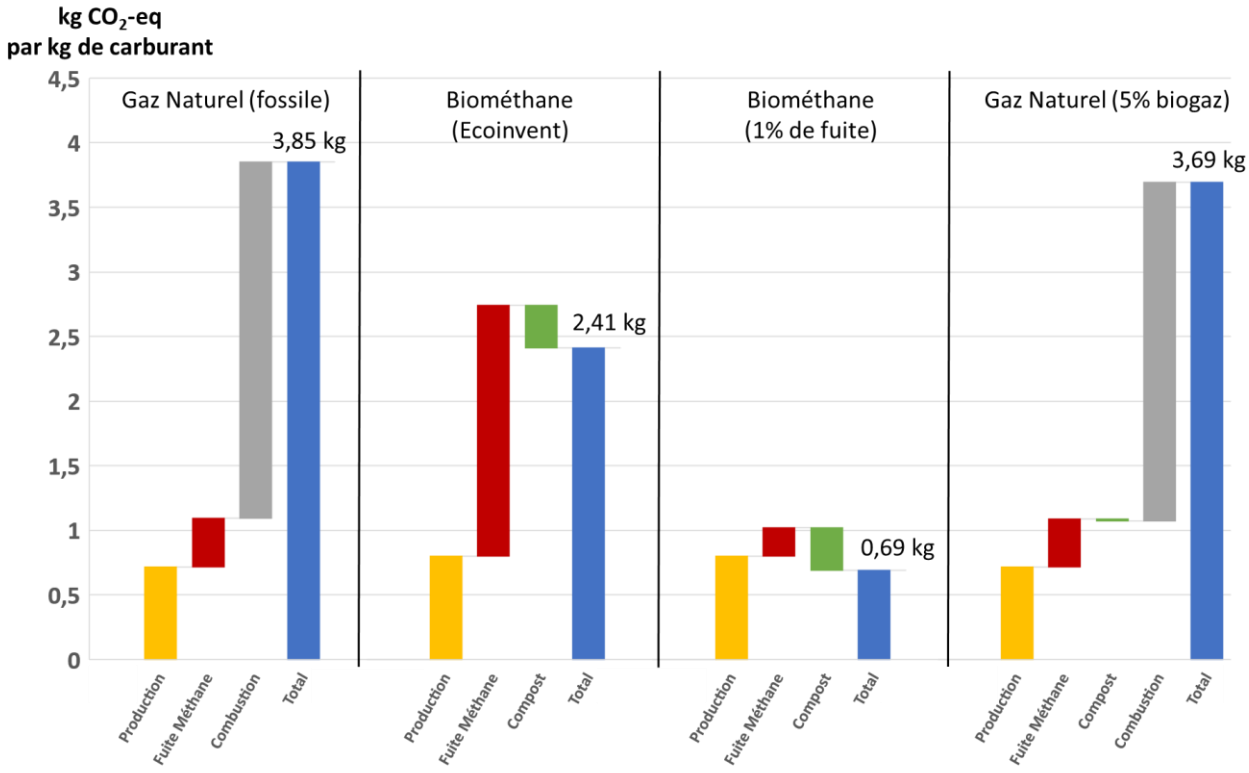
Les données relatives aux impacts environnementaux de la méthanisation sont récupérées dans la base de données Ecoinvent. Le processus de production utilisé regroupe quatre processus de méthanisation différents, production à partir de lisiers agricoles, de boues d'épuration, de biodéchets et d'huiles végétales. Le compost produit lors de la méthanisation

[36] Estimation réalisée en considérant une consommation de 0,8 kWh/km (valeur du modèle Copert)

est réutilisé comme engrais et permet une réduction des impacts environnementaux par substitution aux engrais industriels.

Afin de contraster les deux scénarios d'approvisionnement en gaz, les fuites de méthane qui ont lieu lors de la production et l'acheminement du biométhane sont réduites. Les fuites méthaniques associées au processus initial de production décrit dans EcoInvent sont estimées à 8,7, ce qui a pour effet d'alourdir grandement le bilan carbone. Le niveau de fuite est fixé pour le deuxième scénario à 1%. Dans la littérature, les taux de fuites des processus de méthanisation sont très variables, de 0% à 10%, mais elles jouent un rôle important dans le bilan carbone (Aissani *et al.*, 2013). La Figure V-15 présente les bilans carbones des différents gaz utilisés en spécifiant le rôle de la production, des fuites de méthanes, du compost et de la combustion de carburant fossile.

Figure V-15 : Bilan carbone de la production de gaz naturel et de biométhane



Source : traitement auteur, à partir des données de Ecoinvent v3.3

Les deux scénarios ainsi créés vont permettre d'estimer l'influence de la production de gaz naturel dans le cas d'un développement significatif des véhicules personnels à gaz pour la mobilité quotidienne des personnes.

Conclusion de la partie 1 :

En conclusion, les quatre familles de scénarios ont été développées dans cette partie prospective, et les scénarios retenus permettent d'illustrer 7 grands enjeux associés à la mobilité quotidienne de demain : l'aménagement du territoire, à travers la localisation des différents acteurs ; l'évolution démographique et économique de l'aire urbaine de Lyon ; les nouvelles pratiques de mobilité avec le vélo et le covoiturage ; la modification des réseaux de transports (transports en commun et voirie) ; l'évolution du parc automobile ; l'électrification du parc automobile ; et l'introduction de véhicules à gaz. Au final, 17 scénarios ont été retenus et construits pour représenter ces enjeux, le Tableau V-2 synthétise l'ensemble des scénarios et propose de les classifier par plausibilité. Ainsi, l'objectif des scénarios retenus n'est pas de prévoir ce qu'il va se passer ni d'envisager des mesures et des évolutions forcement réalistes, mais d'explorer différentes entrées possibles de l'outil SIMBAD-ACV et d'analyser leurs capacités à réduire les impacts environnementaux de la mobilité quotidienne.

La mise en œuvre de ces scénarios dans SIMBAD-ACV varie en fonction de leur nature. Les scénarios de parcs automobiles et d'énergies ne modifient pas la mobilité quotidienne des habitants de l'aire urbaine de Lyon, qui reste identique à celle décrite par le modèle LUTI SIMBAD dans le scénario de référence. En revanche, les autres scénarios induisent de nouvelles mobilités qui sont recalculées à travers de nouvelles simulations avec SIMBAD.

Pour la majorité des scénarios présentés, l'approche adoptée est exploratoire en introduisant des variations marquées afin de contraster les scénarios les uns par rapport aux autres. De plus, la démarche « toutes choses égales par ailleurs » permet tout à la fois de différencier clairement les effets et d'apporter de la transparence sur l'outil d'évaluation environnementale, SIMBAD-ACV, montrant l'ensemble des degrés de liberté disponibles pour représenter la mobilité quotidienne des personnes.

Tableau V-2 : Synthèse des scénarios de mobilité quotidienne de personnes

Enjeux	Scénarios	Description	Probabilité
Aménagement du territoire	Forme urbaine étalée	Relocalisation de 10% des logements et des emplois du centre urbain en périphérie	Forte
	Forme urbaine polycentrique	Relocalisation de 10% des logements et des emplois du centre urbain vers les communes périphériques reliées au réseau TER	Modéré
	Forme urbaine compacte	Relocalisation de 10% des logements et des emplois de la périphérie vers le centre	Modéré
Évolutions démographique et économique	Évolution démographique et économique Omphale 2030	Accroissement et évolution de la population et des emplois à l'horizon 2030 (+8% de pop / 2009)	Très forte
	Évolution démo. et éco. Omphale 2030 + 50%	Accroissement et évolution amplifiés de 50% par rapport au scénario précédent (+11% de pop.)	Forte
Nouvelles pratiques de mobilité	Potentiel de la pratique du vélo	Réalisation de 80% des déplacements en vélo en fonction des distances seuils en vélo	Faible
	Covoiturage : +0,1 passager par véhicule	Augmentation du nombre de passagers par véhicule de 0,1	Forte
Réseaux de transports	Amélioration des temps TC	Réduction de 25% des temps de déplacement en TC	Modéré
	Zone 30 dans Lyon et Villeurbanne	Réduction de la vitesse règlementaire dans le centre	Modéré
Évolution du parc automobile	Véhicules petits gabarits	Parc automobile constitué uniquement de petits véhicules, 1 133kg en moyenne	Faible
	Véhicules Euro 6	L'ensemble des véhicules thermiques sont certifiés EURO 6	Modéré
Motorisation électrique et Production électrique	Électrification/production électrique de référence	Introduction de véhicules électriques dans le parc (26%)	Modéré
	Électrification/production électrique mix 2030 (RTE)	Utilisation du mix énergétique proposé par RTE en 2030 pour alimenter les véhicules électriques	Modéré
	Électrification/production électrique renouvelable	Électricité 100% renouvelable pour les véhicules électriques	Faible
	Électrification/production électrique à partir de gaz	Électricité produite à partir de gaz naturel pour les véhicules électriques	Modéré
Motorisation à gaz naturel et Production de gaz	Véhicules à gaz naturel	Introduction de véhicules à gaz naturel dans le parc (26%)	Faible
	Véhicules au biogaz	Approvisionnement en gaz assuré à 100% par la méthanisation	Faible

Partie 2 : Analyse des résultats des scénarios

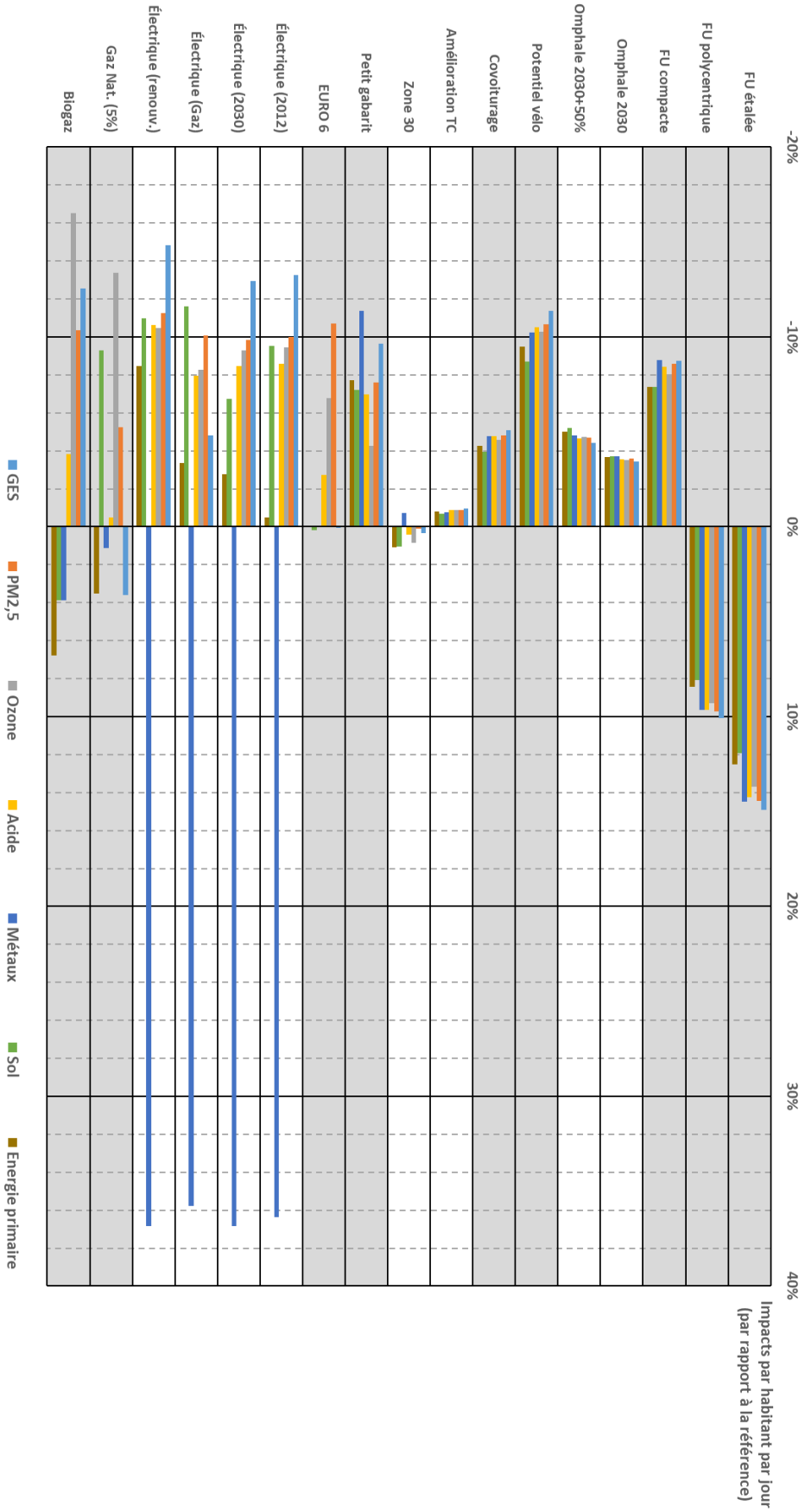
L'ensemble des scénarios construits dans la partie précédente couvre un spectre élargi d'orientations pour la mobilité quotidienne des habitants de Lyon et ses impacts environnementaux associés. L'analyse des différents scénarios permet d'une part de comparer les différentes alternatives les unes par rapport aux autres afin de discuter leurs impacts sur l'environnement. D'autre part, cette analyse éclaire le fonctionnement de SIMBAD-ACV en révélant la sensibilité des résultats aux différents leviers testés.

Après avoir présenté les résultats globaux des impacts environnementaux des 17 scénarios, différentes analyses plus fines sont exposées afin de discuter la capacité de l'outil à décrire les différents mécanismes influençant les impacts environnementaux de la mobilité dans un cadre prospectif.

2.1. Analyse globale des impacts environnementaux

L'implémentation des différents scénarios dans SIMBAD-ACV a permis d'évaluer l'ensemble des orientations testées pour les différents indicateurs environnementaux retenus pour évaluer la mobilité quotidienne des personnes. La Figure V-16 compare les impact environnementaux par habitant des 17 scénarios à la situation de référence qui a été décrite dans le chapitre IV.

Figure V-16 : Impacts environnementaux par habitant des scénarios par rapport à la situation de référence



Source : traitement auteur, à partir des résultats de SIMBAD-ACV

L'analyse comparative des résultats d'ACV des scénarios montre des mécanismes différents en fonction de la nature du scénario. En effet, pour les scénarios modifiant les technologies des véhicules, on observe que les impacts varient en fonction de l'indicateur observé. Par exemple, l'électrification du parc automobile, avec la production d'électricité de référence, améliore significativement les émissions de GES et de polluants atmosphériques, tout en réduisant l'usage du sol. En revanche, le gain en énergie primaire est quasi nul et la consommation en ressources métalliques est grandement impactée (+36%).

Les scénarios de formes urbaines modifient fortement la mobilité quotidienne des habitants de l'aire urbaine de Lyon et les impacts environnementaux associés puisque les variations sont significatives (supérieur à 7%) pour une variation de 10% de la localisation des logements. La forme urbaine compacte est la seule des trois formes simulées à présenter des gains environnementaux, ceci est notamment dû au rapprochement des acteurs et à la réduction des distances parcourues (la distance moyenne quotidienne est réduite de 8%). Entre les deux scénarios de périurbanisation, l'arrangement polycentrique autour des gares ferroviaires impacte moins l'environnement que l'habitat plus diffus du scénario d'étalement urbain (par exemple, les émissions de GES sont 4% plus faibles). Cette différence s'explique par des distances parcourues plus courtes ainsi qu'une utilisation plus forte des modes alternatifs à la voiture, découlant d'une localisation des ménages dans les pôles secondaires plus accessibles, plus denses et possédant des emplois et des services.

Les résultats globaux montrent un gain environnemental par habitant dans le cas d'un développement démographique et économique de l'aire urbaine de Lyon. L'accroissement progressif de la densité a pour effet de réduire les distances parcourues et l'usage de la voiture par habitant. On constate ainsi pour l'ensemble de l'aire urbaine de Lyon que les scénarios « Omphale 2030 » et « Omphale 2030 +50% » ont des émissions de GES respectivement 3,9% et 6,4% plus importantes que la situation de référence, mais avec respectivement une croissance démographique de 7,6% et 11,4%.

Les gains environnementaux sont plus francs dans le cas de modification des comportements de mobilité (Vélo et covoiturage). Cependant, au regard des modifications apportées, les gains restent modérés, notamment pour le scénario « potentiel Vélo » dans lequel 60% des sorties sont réalisées en modes alternatifs à la voiture (40% dans la situation de référence) pour environ 10% de gain environnemental. Les déplacements les plus longs restent captifs de l'automobile.

Les scénarios de modification des réseaux de transports ne présentent pas de variations significatives pour les impacts environnements globaux associés à la mobilité quotidienne. Ce constat soulève des interrogations à plusieurs niveaux différents, notamment sur de potentiels effets localisés peu visibles à l'échelle globale utilisée ici, sur l'efficacité environnementale des politiques de management de trafic et enfin sur la capacité du modèle SIMBAD à bien capter toutes les composantes de ce type de modifications sur les adaptations des usagers, par exemple dans le cas d'une zone 30 km/h.

Parmi les différents scénarios de parcs automobiles simulés et évalués, seule la réduction du poids des véhicules apporte des gains environnementaux pour l'ensemble des indicateurs analysés. L'effet de l'âge du parc, et de son niveau de norme EURO, améliore uniquement les impacts associés aux polluants atmosphériques locaux.

Pour la plupart des indicateurs évalués, l'électrification des voitures réduit les impacts sur l'environnement, cependant, des variations importantes existent en fonction du type du parc de production électrique utilisé. Les gains les plus stables sont ceux associés aux polluants locaux et à l'usage du sol qui sont tous compris entre -7% et -11%. La surconsommation de ressources métalliques est aussi stable en fonction de l'origine de l'électricité consommée, environ +36%. En revanche, les émissions de GES et la consommation d'énergie primaire sont fortement associées à la production de l'électricité. Ainsi, l'usage de centrales à gaz pour alimenter les véhicules électriques réduit significativement le bénéfice en matière d'émissions de GES réalisé dans le cas d'une électrification associée au mix électrique de référence (respectivement -5% et -13% d'émissions de GES). En revanche, l'alimentation des véhicules électriques en électricité renouvelable n'apporte qu'un faible gain supplémentaire en matière d'émissions de GES, lié à la présence importante de centrales nucléaires dans le mix énergétique Français. Le moindre usage d'énergie nucléaire dans les trois systèmes prospectifs de production électrique simulés permet cependant d'améliorer l'efficacité énergétique et ainsi de réduire la consommation d'énergie primaire totale. À noter que certains impacts et risques associés à la production nucléaire ne sont pas intégrés dans l'outil d'analyse, notamment sur les radiations ionisantes (Le Féon, 2014).

L'usage du gaz naturel dans les véhicules particuliers présente des résultats très contrastés en fonction de l'indicateur observé et de la quantité de biogaz utilisée. En effet, la motorisation au gaz naturel avec 5% de biogaz ne présente que des améliorations pour les émissions de particules fines, la formation d'ozone troposphérique et l'usage du sol. En revanche, on constate

une surconsommation d'énergie primaire (+4%) et des surémissions de GES (+4%). La production de biogaz et son usage dans les véhicules réduisent significativement les émissions de GES et des autres polluants locaux. En revanche, le système consomme davantage de métaux, de sol et d'énergie primaire que dans la situation de référence et que dans le scénario au gaz naturel classique.

Sans aller plus loin dans l'analyse comparative des impacts environnementaux liés à la mobilité quotidienne des personnes, on constate déjà des effets différents en fonction des scénarios. Certains de ces effets sont attendus et reflètent ce qui a été démontré par ailleurs dans d'autres études, par exemple que la forme urbaine compacte est moins consommatrice d'énergie ou sur l'effet de la taille d'une agglomération (Camagni *et al.*, 2002; Le Néchet, 2010; Wegener & Fürst, 2004).

Certains effets attendus associés aux réseaux de transports n'apparaissent pas dans les résultats. Ceci amène à s'interroger sur la difficulté pour un modèle transport d'intégrer tous les changements de mobilité en cas de modification importante des propriétés d'un réseau. Par exemple, la généralisation de la vitesse de 30 km/h sur tout le réseau viaire du centre de l'agglomération apporte un sentiment de sécurité et de plaisir propice aux modes doux que les valeurs de paramètres du modèle ne prennent pas en compte pour calculer les choix modaux. Cependant, pour prendre complétement en compte les impacts de telle mesure, il est nécessaire de connaitre l'ampleur de ces phénomènes.

Les scénarios de technologies de véhicules sont sujets à de nombreux transferts d'impacts, notamment entre les différents indicateurs évalués. De plus, le rôle important de l'ensemble du cycle de vie de technologie de transports a été démontré, notamment avec l'influence de la fabrication des véhicules et de l'origine des carburants dans les différents scénarios d'électrification.

2.2. Analyses des mécanismes d'impacts environnementaux de la mobilité quotidienne

La méthode d'évaluation SIMBAD-ACV utilise différents indicateurs environnementaux au niveau global de l'aire urbaine de Lyon, mais fournit aussi de nombreux éléments de compréhension sur les divers mécanismes impliqués dans le système représenté. Les scénarios étudiés étant de natures diverses, la mise en œuvre d'analyses comparatives pour différents mécanismes est sources d'information à la fois sur l'influence des scénarios étudiés, mais aussi sur le fonctionnement de la méthode utilisée.

Dans cette partie, les scénarios sont étudiés en fonction de leurs influences sur l'efficacité du système de transport, sur les impacts des différentes catégories de ménages, sur les comportements de mobilité et sur la localisation des ménages les plus fortement émetteurs.

2.2.1. Efficacité du système de transport

Pour l'ensemble des scénarios réalisés, l'usage ou la composition du système de transport varie, impactant directement son efficacité environnementale. En effet, l'impact environnemental pour la mobilité quotidienne d'un habitant peut être résumé par l'équation suivante :

$$Impact = facteur_unitaire * \frac{1}{taux\ de\ remplissage} * distance\ par\ sortie * nb\ sorties$$

Le nombre de sorties par personne est stable en fonction des scénarios réalisés, le taux de remplissage des véhicules personnels est aussi stable autour de 1,26 personne par véhicule, sauf pour le scénario « covoiturage » qui a un taux de remplissage de 1,37. Les impacts environnementaux de la mobilité se caractérisent donc principalement par la distance moyenne parcourue par sortie et par le facteur d'émissions unitaire du système de transport. Le Tableau V-3 présente pour chaque scénario les émissions de GES rapportées par habitant, par sortie et par pkm.

Tableau V-3 : Émissions de GES par habitant par jour, par sortie et par pkm en fonction des scénarios

Émissions de GES (masse de CO_2-eq)	*Par habitant par jour (en kg)*	*Nb. sorties par personne par jour*	*Par sortie (en kg)*	*km par sortie*	*Par pkm (en g)*
Référence	3,22	1,36	2,37	15,9	202
FU étalée	3,70	1,35	2,74	17,9	206
FU polycentrique	3,54	1,35	2,62	17,5	203
FU compacte	2,94	1,37	2,15	14,7	200
Omphale 2030	3,11	1,35	2,30	15,4	201
Omphale 2030 +50%	3,08	1,35	2,28	15,3	200
Potentiel vélo	2,85	1,36	2,10	16,6	172
Covoiturage	3,05	1,36	2,25	16,3	187
Amélioration TC	3,19	1,36	2,34	16,2	197
Zone 30	3,23	1,36	2,38	15,8	205
Petit gabarit	2,91	1,36	2,14	15,9	183
EURO 6	3,22	1,36	2,37	15,9	202
Électrique (mix 2012)	2,79	1,36	2,05	15,9	175
Électrique (mix 2030)	2,80	1,36	2,06	15,9	176
Électrique (mix gaz)	3,06	1,36	2,25	15,9	192
Électrique (mix renouvelable)	2,74	1,36	2,02	15,9	172
Gaz Naturel (5%)	3,33	1,36	2,45	15,9	209
Biogaz	2,81	1,36	2,07	15,9	177

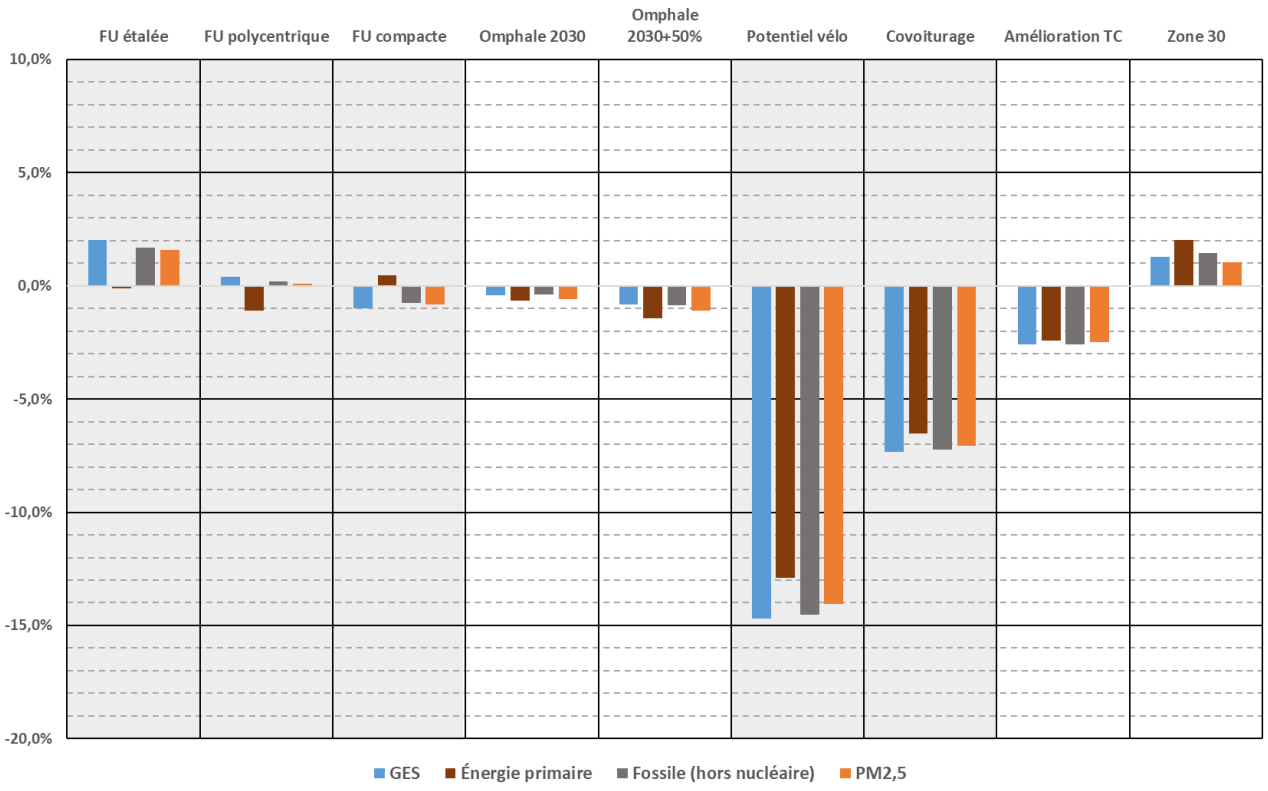
Source : traitement auteur, à partir des résultats de SIMBAD-ACV

Dans le cas des scénarios de formes urbaines et d'évolutions démographiques, l'efficacité du système de transport ne varie pas beaucoup, les impacts environnementaux sont influencés davantage par la distance des sorties. Pour les scénarios de « potentiel vélo », de « covoiturage » et « d'amélioration des TC » les distances par sorties sont légèrement plus grandes, cependant, l'usage plus faible de la voiture, associé respectivement au développement des modes doux, à un meilleur remplissage des véhicules et au report vers les TC, permet d'avoir un bilan par habitant plus faible que la situation initiale.

Pour les scénarios de parcs automobiles et d'énergies, l'amélioration (ou la dégradation) du bilan carbone est liée directement aux facteurs unitaires d'impacts associés aux voitures puisque la mobilité est identique à la situation de référence. Ainsi, toutes les variations observées dans la Figure V-16 pour la mobilité d'une personne sont identiques pour l'efficacité du système de transports.

Ainsi en comparant la Figure V-17, qui représente l'évolution de l'efficacité du système de transport par pkm en fonction des scénarios, avec la Figure V-16, qui représente l'évolution des impacts environnementaux liés à la mobilité d'une personne, on constate une différence notable entre étudier la mobilité des personnes et étudier l'efficacité du système de transport des personnes. Le choix de l'unité fonctionnelle apparait donc primordial pour l'évaluation de la mobilité quotidienne des personnes, notamment lorsque celle-ci met en œuvre des mécanismes qui influencent l'usage du système de transport.

Figure V-17 : Impacts environnementaux par pkm par rapport à la situation de référence



Source : traitement auteur, à partir des résultats de SIMBAD-ACV

2.2.2. Composition de la population

L'analyse de la situation de référence a montré la variabilité qui existait entre les différents types de ménages de l'aire urbaine en termes d'impacts environnementaux associés

à leur mobilité. Une typologie en 10 classes de ménages avait été proposée pour représenter cette variabilité. Le Tableau V-4 représente le niveau d'émissions de GES par personne en fonction du type de ménages pour l'ensemble des 17 scénarios évalués.

Tableau V-4 : Émissions de GES pour la mobilité quotidienne d'un habitant en fonction des scénarios et des types de ménages

Émissions de GES par habitant (kg CO_2-eq par jour)	Retraité >75ans	Seul inactif	Couple/Famille inactif	Seul actif	Couple 1 actif	Couple biactif	Famille sans ou un véhicule	Famille 3 personnes multimotorisé	Famille 4 personnes multimotorisé	Famille 5+ personnes multimotorisé
Référence	1,59	1,28	2,01	3,41	3,33	4,75	2,60	4,55	4,07	3,55
FU étalée	1,64	1,68	2,30	4,22	3,81	5,62	2,91	5,02	4,54	3,94
FU polycentrique	1,62	1,71	2,23	3,99	3,67	5,36	2,88	4,80	4,30	3,71
FU compacte	1,68	1,25	2,04	3,01	3,04	4,15	2,40	4,16	3,66	3,25
Omphale 2030	1,50	1,29	1,99	3,43	3,25	4,74	2,55	4,41	3,97	3,47
Omphale 2030+50%	1,50	1,29	2,02	3,44	3,27	4,72	2,54	4,40	3,97	3,48
Potentiel vélo	1,36[37]	1,11	1,77	2,92	2,95	4,17	2,21	4,12	3,68	3,25
Covoiturage	1,50	1,27	1,97	3,15	3,14	4,40	2,44	4,25	3,84	3,42
Amélioration TC	1,58	1,27	2,04	3,36	3,26	4,65	2,52	4,48	4,02	3,51
Zone 30	1,56	1,26	2,03	3,35	3,31	4,71	2,57	4,53	4,09	3,60
Petit gabarit	1,44	1,19	1,81	3,09	3,00	4,26	2,37	4,07	3,67	3,22
EURO 6	1,59	1,29	2,01	3,41	3,33	4,74	2,60	4,55	4,07	3,55
Elec (2012)	1,39	1,15	1,74	2,95	2,88	4,05	2,30	3,85	3,51	3,11
Elec (2030)	1,39	1,15	1,75	2,96	2,89	4,07	2,31	3,87	3,53	3,12
Elec (gaz)	1,51	1,23	1,91	3,24	3,17	4,49	2,49	4,30	3,87	3,39
Elec (renouvelable)	1,36	1,14	1,71	2,90	2,82	3,97	2,27	3,77	3,44	3,05
Gaz Nat. (5%)	1,64	1,32	2,09	3,54	3,45	4,93	2,68	4,73	4,23	3,67
Biogaz	1,40	1,16	1,77	2,90	2,90	4,04	2,27	3,94	3,61	3,22

-17% 0 +33%

[code couleur : différence par rapport à la référence de chaque catégorie]

Source : traitement auteur, à partir des résultats de SIMBAD-ACV

[37] Le scénario « potentiel vélo », ne prend pas en compte l'âge du chef de famille dans le choix modal.

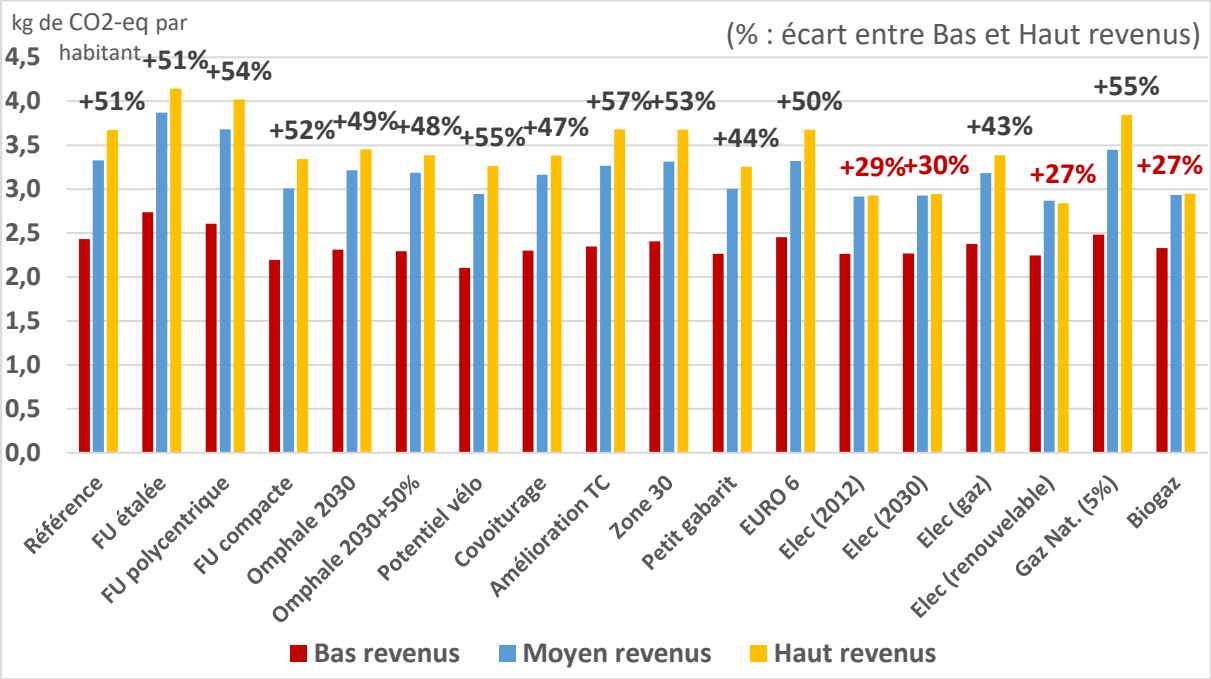
De façon analogue à la situation de référence, la hiérarchie des classes de ménage par niveau d'émissions de GES reste, peu ou prou, identique pour l'ensemble des scénarios analysés. On constate, cependant, pour les scénarios de formes urbaines et d'évolutions démographiques que certaines classes de ménages sont plus sensibles aux variations apportées. Par exemple, les personnes seules inactives sont fortement affectées par les scénarios de relocalisation en périphérie alors que les ménages de plus de 75 ans ne sont que très faiblement affectés. Ces derniers apparaissent plus émetteurs de GES dans le cas d'une forme urbaine compacte contrairement à la moyenne qui baisse de 9%. Ceci est lié à leur forte présence initiale dans le centre et à leur faible propension à déménager.

Même si l'on observe quelques variations remarquables pour une ou deux catégories de ménages, les scénarios choisis et mis en œuvre ne visent pas ces types de ménages spécifiquement, ni les activités qu'ils réalisent. Le modèle de choix de localisation de SIMBAD est inchangé dans les différents scénarios et aucun scénario envisagé ne modifie la phase de génération des déplacements qui repose sur les différentes variables socio-économiques disponibles des ménages. De plus, aucun scénario n'explore les possibilités de modifications de la mobilité associées à un motif de déplacement particulier, par exemple le télétravail, le e-shopping, l'université numérique ou encore l'assouplissement des horaires de travail. Comme chacune des 10 classes de ménages pratique des activités différentes (cf. Figure IV-16), des variations entre ces classes seraient probablement apparues. Le développement du télétravail, des services et du e-commerce sera intégré dans le scénario final décrit dans la partie 3.

Des scénarios structurels de modifications des activités des ménages, tels que des scénarios de crise ou de croissance forte, relatives à l'emploi ou à la consommation, auraient eu des effets directement sur la mobilité et les niveaux d'impacts environnementaux des différentes classes de ménages. Cependant, de tels scénarios sont complexes à mettre en œuvre notamment dans les modèles LUTI traditionnels calibrés sur une situation économique donnée.

Parmi l'ensemble des scénarios construits, seuls les scénarios de motorisations alternatives introduisent spécifiquement une différence entre les ménages en limitant l'accès aux véhicules électriques et à gaz pour les ménages modestes tout en facilitant cet accès pour les ménages aisés. Les émissions de GES par habitant en fonction du revenu sont présentées dans la Figure V-18 pour l'ensemble des scénarios. On peut ainsi observer que pour les scénarios d'électrification du parc automobile et d'usage de biogaz dans les véhicules la différence d'émissions de GES entre les ménages aisés et modestes réduit.

Figure V-18 : Émissions de GES par habitant par jour en fonction du niveau de revenu des différents scénarios et

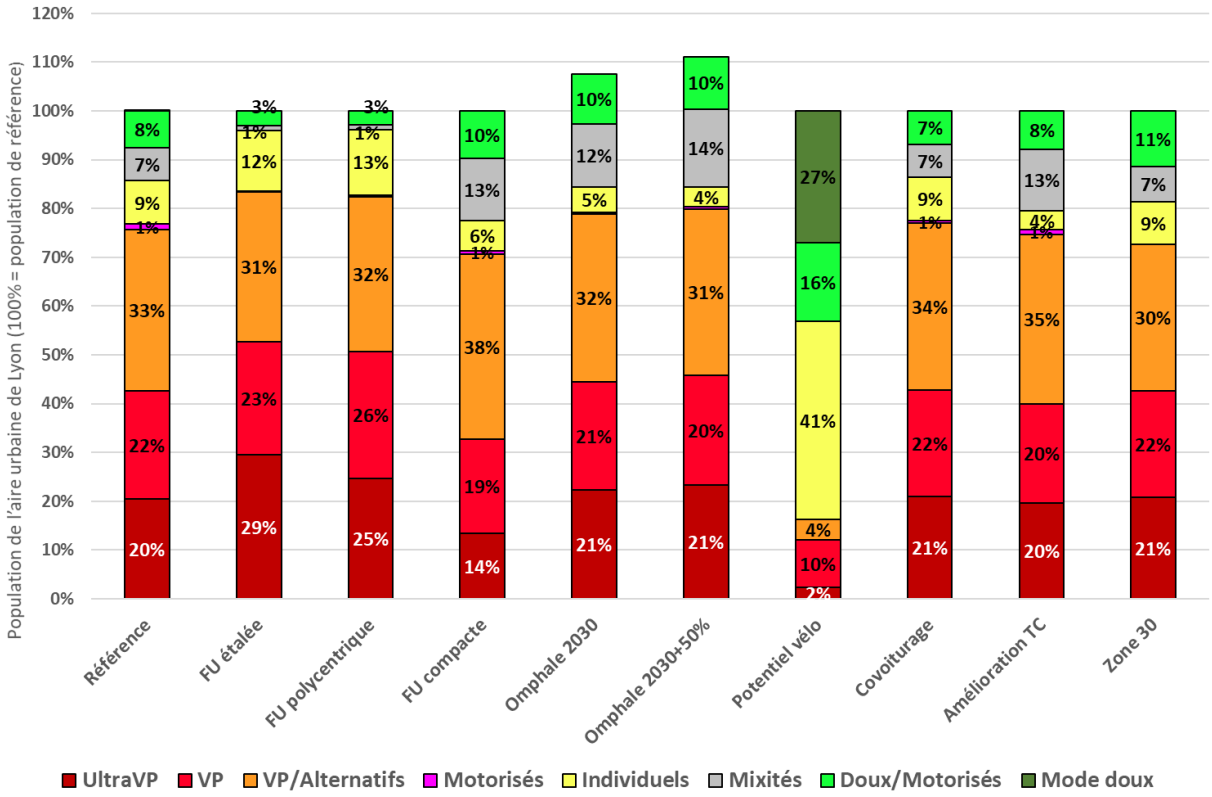


Source : traitement auteur, à partir des résultats de SIMBAD-ACV

2.2.3. Comportement de mobilité

À travers les différents scénarios évalués, les comportements de mobilité de la population simulée changent. Par contre, les scénarios associés au parc automobile conservent les comportements de mobilité estimés dans la situation de référence. Afin d'analyser ces modifications, la classification utilisée dans le chapitre IV, à partir des parts modales en voiture, en transports en commun et en modes doux, est appliquée aux scénarios. La Figure V-19 présente pour chaque scénario la répartition de la population en fonction du profil de mobilité de leur zone de résidence.

Figure V-19 : Répartition démographique par pratiques modales des IRIS des différents scénarios

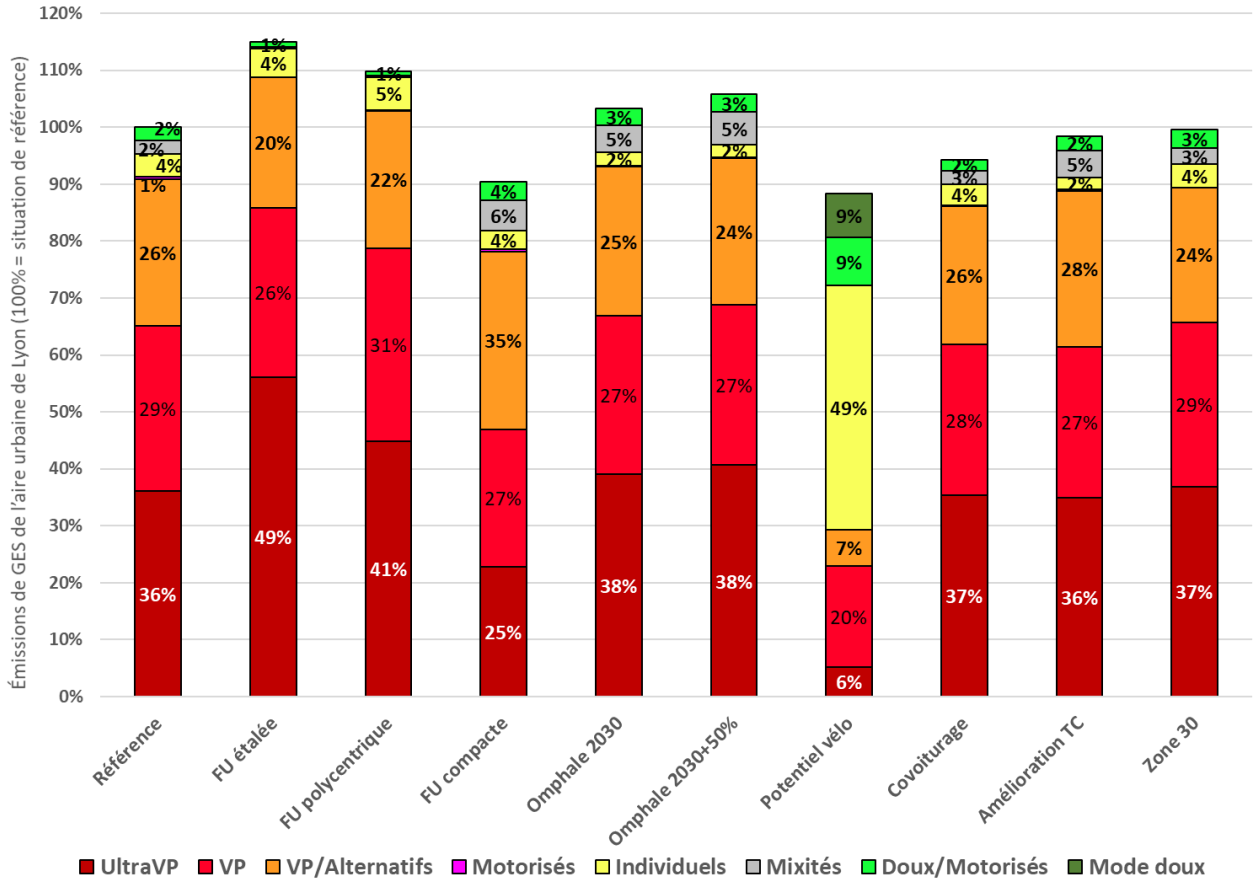


Source : traitement auteur, à partir des résultats de SIMBAD-ACV, cf. Chap IV 3.2

Le scénario de « potentiel vélo » est le seul à significativement réduire l'usage de la voiture, faisant quasiment disparaitre les zones très dépendantes de la voiture (« UltraVP »). Cependant, dans ce scénario l'usage des transports en commun est aussi très fortement réduit. L'usage de la voiture est aussi significativement réduit dans la population dans le cas d'une forme urbaine compacte puisqu'une partie de la population a été relocalisée dans des zones propices aux modes alternatifs. Les formes urbaines étalée et polycentrique ont pour effet, en revanche, d'augmenter la part de la population utilisant principalement la voiture. Les deux scénarios de réseaux de transports favorisant les TC ou imposant une zone 30 ne créent pas de report modal clair, interrogeant directement sur la portée de ce type d'actions notamment sur les territoires excentrés. L'absence de rupture en termes de pratiques de mobilité pour l'ensemble des scénarios en dehors du scénario « potentiel vélo », est remarquable dans l'Annexe 9 présentant l'ensemble des graphiques tridimensionnels des parts modales et des catégories de mobilités des différents IRIS de l'aire urbaine de Lyon.

Afin d'illustrer l'influence des différentes catégories de mobilité sur l'environnement, la Figure V-20 représente pour chaque scénario la variation des émissions de GES de l'ensemble de l'aire urbaine de Lyon ainsi que la contribution de chaque catégorie de mobilité.

Figure V-20 : Répartition des émissions totales de GES de l'aire urbaine de Lyon par pratiques modales des IRIS des différents scénarios



Source : traitement auteur, à partir des résultats de SIMBAD-ACV, cf. Chap IV 3.2

En dehors du scénario « potentiel vélo », les émissions de GES des scénarios évaluées proviennent majoritairement de ménages habitants dans des zones dépendant fortement de l'automobile pour leur mobilité. La contribution des profils « VP » et « UltraVP » aux émissions de GES atteint 75% dans le scénario de forme urbaine étalée, alors que la forme urbaine compacte réduit cette contribution à 52%, mettant ainsi en avant la difficulté de réduire l'usage de la voiture, mais surtout de réduire son impact sur l'environnement.

2.2.4. Localisation de la population

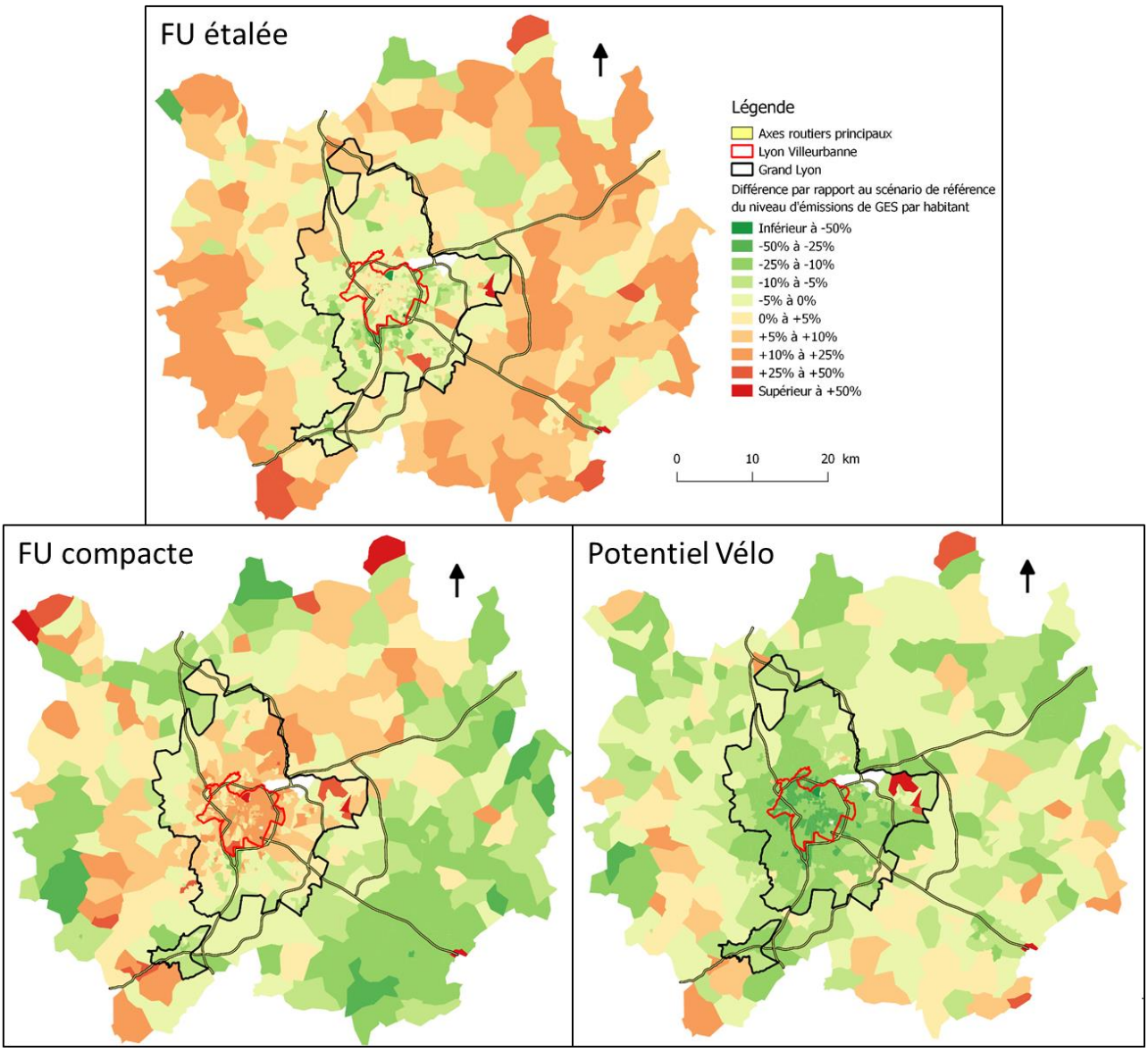
Un des facteurs importants qui influence le niveau d'impact environnemental associé à la mobilité quotidienne d'une personne est sa localisation. Les scénarios mis en œuvre jouent soit directement sur la localisation des personnes soit sur le niveau d'impact de chacune des localisations. Afin d'illustrer les effets spatialisés sur les niveaux d'impact des personnes des scénarios, la Figure V-21 représente la différence d'émissions de GES par habitant de chacun de 777 IRIS constituant l'aire urbaine de Lyon par rapport à la situation de référence dans le cas d'une forme urbaine étalée, d'une forme urbaine compacte et du scénario de « potentiel vélo ».

Les bilans carbone pour l'ensemble des scénarios associés à la mobilité quotidienne d'une personne dans les 20 découpages administratifs utilisés dans le chapitre IV sont présentés dans l'Annexe 10.

L'effet des scénarios de formes urbaines est très variable en fonction de la localisation des ménages. Le scénario d'étalement urbain détériore le bilan carbone, ainsi que les autres impacts environnementaux, d'une grande partie des zones situées en périphérie. En même temps, ce type de forme urbaine contribue à baisser légèrement le bilan carbone associé à la mobilité quotidienne d'un habitant du Grand Lyon. Ceci s'explique par une diminution du nombre d'actifs dans le centre, dont les déplacements sont plus longs, et d'une meilleure adéquation entre le nombre d'actifs et le nombre d'emplois, réduisant la distance parcourue. À l'inverse, la forme urbaine compacte contribue à réduire les impacts d'une partie des zones périphériques, mais alourdit les bilans carbone des habitants de Lyon et Villeurbanne. On aperçoit donc des conclusions différentes de l'analyse globale en fonction de la focale d'analyse adoptée.

L'analyse spatiale des gains en émissions de GES associés au scénario de « potentiel vélo » révèle une figure concentrique, avec des gains environnementaux importants dans le centre qui se réduisent en s'éloignant du centre. Cependant, une répartition hétérogène des gains associés à la pratique du vélo est observable dans la périphérie mettant en avant des zones où le report vers les modes doux est difficile.

Figure V-21 : Émissions de GES par habitant pour les scénarios de formes urbaines étalée et compacte et de « potentiel vélo » par rapport à la situation de référence



Source : traitement auteur, à partir des résultats de SIMBAD-ACV

L'analyse désagrégée à l'IRIS permet aussi de prendre en considération différents paramètres de forme urbaine dans l'ensemble des scénarios. Afin de ne pas multiplier les démonstrations pour les différents paramètres de forme urbaine disponibles, qui sont par ailleurs corrélés entre eux, cette analyse se limite à la densité urbaine. En reprenant les déciles de densité construits à partir de la situation de référence (Chap IV 3.3.2), le Tableau V-5 et le

Tableau V-6 synthétisent respectivement la répartition de la population et les niveaux d'émissions de GES par habitant associé à chaque niveau de densité et à chaque scénario.

Tableau V-5 : Répartition de la population des différents scénarios par décile de densité

Déciles de densité (p/r au scénario de référence)	Peu dense 1er décile	2e décile	3e décile	4e décile	5e décile	6e décile	7e décile	8e décile	9e décile	Très dense 10e décile
Référence	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%
FU étalée	13%	14%	12%	12%	9%	11%	9%	10%	8%	3%
FU polycentrique	9%	11%	12%	14%	11%	11%	9%	11%	8%	3%
FU compacte	8%	7%	7%	9%	10%	9%	12%	10%	14%	15%
Omphale 2030	9%	9%	10%	10%	10%	9%	10%	9%	11%	12%
Omphale 2030+50%	9%	10%	10%	10%	10%	9%	10%	9%	11%	14%
Potentiel vélo	10%	10%	9%	10%	10%	9%	11%	9%	10%	11%
Covoiturage	10%	10%	10%	10%	10%	9%	10%	10%	10%	10%
Amélioration TC	10%	10%	10%	10%	10%	9%	10%	10%	10%	10%
Zone 30	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%

Source : traitement auteur, à partir des résultats de SIMBAD-ACV

Tableau V-6 : Émissions de GES par habitant par décile de densité et par scénario par rapport à la situation de référence

Émission de GES par rapport à la référence	Peu dense 1er décile	2e décile	3e décile	4e décile	5e décile	6e décile	7e décile	8e décile	9e décile	Très dense 10e décile
FU étalée	10%	8%	3%	-2%	-3%	-6%	-5%	-13%	-7%	-7%
FU polycentrique	3%	4%	7%	4%	0%	2%	1%	-6%	2%	-6%
FU compacte	-9%	-3%	-2%	-4%	0%	9%	6%	19%	23%	12%
Omphale 2030	0%	-1%	-2%	-3%	-3%	-4%	-3%	-5%	-1%	-6%
Omphale 2030+50%	0%	0%	-1%	-3%	-4%	-3%	-4%	-1%	0%	-8%
Potentiel vélo	-3%	-5%	-9%	-11%	-16%	-16%	-21%	-18%	-24%	-22%
Covoiturage	-6%	-4%	-6%	-5%	-9%	-6%	-6%	-7%	-6%	-3%
Amélioration TC	0%	0%	-2%	-4%	-3%	-1%	-6%	-2%	0%	2%
Zone 30	0%	2%	0%	-1%	-2%	-1%	-1%	-4%	-3%	-7%

Source : traitement auteur, à partir des résultats de SIMBAD-ACV

La répartition de la population dans les scénarios de formes urbaines illustre clairement les hypothèses choisies. Le scénario de forme urbaine étalée diminue fortement le nombre des zones très denses et le nombre de personnes y habitant, au profit des zones très peu denses (déciles 1 et 2). Le scénario polycentrique relocalise davantage vers les zones des déciles 3 et 4. Le scénario de forme urbaine compacte réduit le nombre de personnes dans les zones peu denses au profit des zones très denses qui sont plus nombreuses et accueillent plus de personnes. Les scénarios d'évolution démographique augmentent l'ensemble de la densité de l'aire urbaine de Lyon, ainsi le nombre d'IRIS et d'habitants situés dans les déciles de densité élevés augmente. Pour les autres scénarios, les répartitions de la population entre les niveaux de densité sont semblables puisque l'usage du sol est conservé à l'identique de la situation de référence.

La localisation des ménages dans l'aire urbaine de Lyon en fonction de la densité impacte directement les impacts environnementaux associés à la mobilité quotidienne puisque les impacts décroissent avec la densité. En revanche, en fonction des scénarios simulés le facteur de décroissance des impacts avec la densité varie. Par exemple, les scénarios de formes urbaines étalée et polycentrique accentuent ce facteur puisque les zones peu denses impactent davantage l'environnement pour la mobilité contrairement aux zones denses qui sont moins polluantes. À l'inverse, la forme compacte réduit la différence entre zones denses et celles peu denses. Le scénario de « potentiel vélo » creuse aussi la différence en fonction de la densité puisque les déplacements des zones denses sont en moyenne plus courts et donc potentiellement réalisables en vélo contrairement aux zones peu denses.

L'analyse spatialisée des niveaux d'émissions de GES révèle aussi des variations hétérogènes pour les deux scénarios de réseaux de transports. L'amélioration des transports en commun réduit principalement les émissions dans les zones de densité moyenne dans lesquelles l'offre de transports en commun présente une alternative à la voiture. Le scénario de zone 30 améliore, en revanche, le niveau d'impacts des habitants des zones denses alors que les zones peu denses sont peu impactées par cette action. Rappelons aussi que les phénomènes de report potentiel vers les modes actifs associés au sentiment de sécurité d'une zone 30 ne sont pas intégrés dans la méthode.

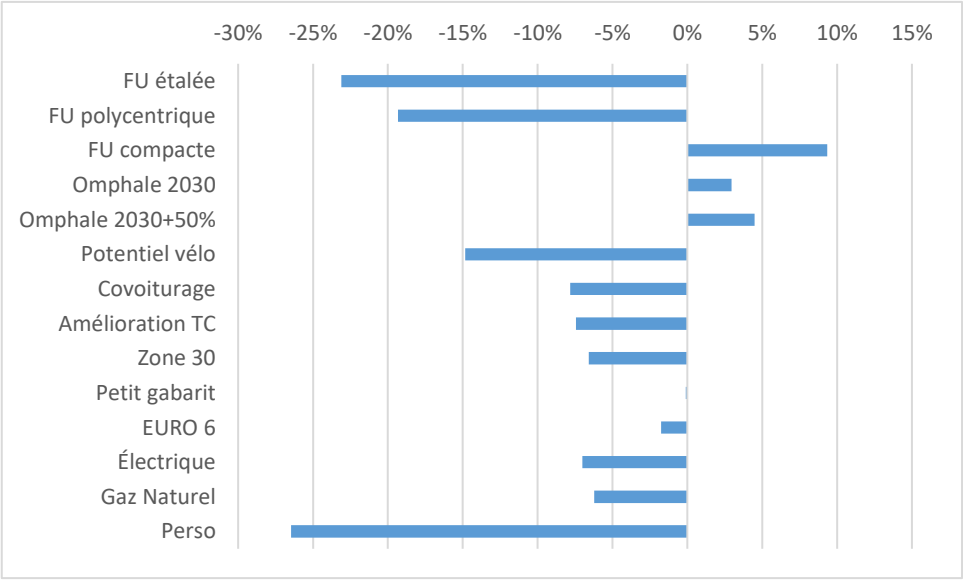
Les scénarios de covoiturage ou de modification du parc automobile présentent quant à eux des variations d'impacts environnementaux quasi-constantes sur l'ensemble de l'aire urbaine de Lyon. Le covoiturage a légèrement moins d'effets dans le centre dense puisque l'usage de la voiture est plus faible.

2.3. Exposition de la population au NOx

Après avoir analysé les conséquences des différents scénarios sur les niveaux d'impacts environnementaux associés à la mobilité des ménages, cette partie explore les conséquences des scénarios sur l'exposition de la population aux oxydes d'azote (NOx) générés par la mobilité quotidienne des personnes. En fonction des différents scénarios évalués, le nombre de véhicules en circulation est modifié, la répartition des flux de circulation change, les conditions de circulations sont impactées et les facteurs d'émissions associés aux véhicules varient. De plus, dans certains scénarios, les ménages se localisent différemment, modifiant finalement le niveau d'exposition globale de la population de l'aire urbaine de Lyon aux polluants NOx émis par la mobilité quotidienne.

Dans le but de comparer les résultats d'exposition de la population avec ceux calculés précédemment pour la situation de référence (Chap IV 3.4), la même méthode est utilisée et les seuils de densité de population et de densité d'émissions de NOx sont conservés (Tableau IV-19). La Figure V-22 synthétise l'ensemble des résultats d'exposition de la population de l'aire urbaine de Lyon aux NOx en fonction des scénarios comparés à la situation de référence. Les émissions directes de NOx n'étant pas dépendantes des sources d'alimentation électrique et de gaz, les alternatives énergétiques ne sont pas incluses dans l'analyse d'exposition.

Figure V-22 : Scores d'exposition de la population aux émissions directes de NOx associées à la mobilité quotidienne par rapport à la situation de référence



Source : traitement auteur, à partir des résultats de SIMBAD-ACV

Sur l'ensemble des scénarios considérés, seuls la forme urbaine compacte et les scénarios de croissance démographique aggravent l'exposition de la population aux NOx. Le résultat pour la forme urbaine compacte est en opposition avec celui observé dans l'analyse globale sur les émissions de gaz à effet de serre et de particules fines notamment. Les émissions de NOx dans les gaz d'échappement sont pourtant 18% plus faibles dans ce scénario que dans la situation de référence, cependant, la localisation de la population dans le centre, plus fortement pollué, contribue à détériorer le score d'exposition à ce polluant de 9%. Ce constat est parfaitement opposé dans les deux autres scénarios de formes urbaines où les émissions directes de NOx sont plus importantes, mais la population réside davantage dans des zones périphériques moins polluées, améliorant significativement les scores d'exposition (-23% et -19%).

Le scénario de « potentiel vélo » améliore aussi grandement la qualité de l'air de l'aire urbaine de Lyon (-15%), ce qui reste cohérent avec les observations réalisées dans l'ACV. Les faibles variations constatées pour les scénarios d'amélioration des TC et de mise en place d'une zone 30 dans l'ACV sont différentes pour l'exposition aux NOx puisque ces deux scénarios améliorent l'exposition de la population à ce polluant de 7%. Cette amélioration place ces deux scénarios au même niveau d'exposition que les scénarios d'électrification et de véhicules à gaz. Le scénario appliquant la norme EURO 6 ne réduit que faiblement le niveau d'exposition aux NOx alors que ces émissions directes sont 10% plus faibles. Ce résultat montre d'une part l'intérêt de mener des actions pour les zones centrales (Amélioration des TC et zone 30), mais aussi la limite de la méthode mise en place vis-à-vis des phénomènes de dispersion. Une autre limite méthodologique est aussi remarquable à travers le scénario « petit gabarit », puisque le score est inchangé. Cette limite est associée directement à la construction du modèle d'émission Copert qui ne différencie pas les émissions de NOx en fonction de la taille des véhicules.

Les inégalités d'exposition aux NOx en fonction du niveau de revenu et de la localisation des ménages sont estimées pour les différents scénarios et le Tableau V-7 synthétise l'ensemble des scores de chaque scénario en fonction des trois niveaux de revenu et de trois localisations (centre, Grand Lyon et périphérie).

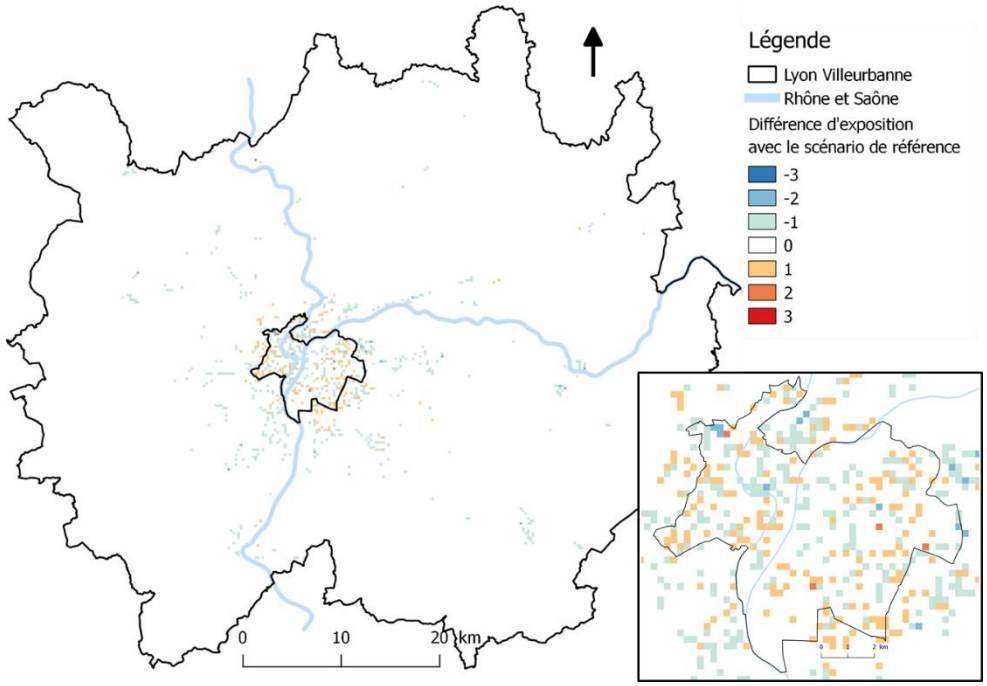
Tableau V-7 : Scores d'exposition de la population de l'aire urbaine de Lyon par revenu et par zones de résidence

	Aire Urbaine de Lyon	*Bas revenu*	*Moyen revenu*	*Haut revenu*	*Centre*	*Grand Lyon (hors centre)*	*Périphérie*
Référence	2,35	2,58	2,30	2,26	4,02	1,84	0,62
FU étalée	1,81	1,98	1,76	1,76	3,44	1,66	0,63
FU polycentrique	1,90	2,08	1,85	1,85	3,46	1,71	0,77
FU compacte	2,57	2,74	2,52	2,54	3,92	1,74	0,58
Omphale 2030	2,42	2,62	2,35	2,42	4,09	1,90	0,64
Omphale 2030+50%	2,45	2,64	2,38	2,51	4,13	1,94	0,64
Potentiel vélo	2,00	2,17	1,96	1,95	3,38	1,53	0,60
Covoiturage	2,17	2,35	2,11	2,16	3,74	1,62	0,61
Amélioration TC	2,17	2,37	2,13	2,11	3,73	1,64	0,62
Zone 30	2,19	2,39	2,15	2,14	3,77	1,67	0,62
Petit gabarit	2,35	2,57	2,30	2,26	4,02	1,84	0,62
EURO 6	2,31	2,53	2,26	2,23	3,96	1,80	0,61
Électrique	2,18	2,39	2,14	2,11	3,76	1,68	0,59
Gaz Naturel	2,20	2,41	2,16	2,13	3,79	1,70	0,59

Source : traitement auteur, à partir des résultats de SIMBAD-ACV

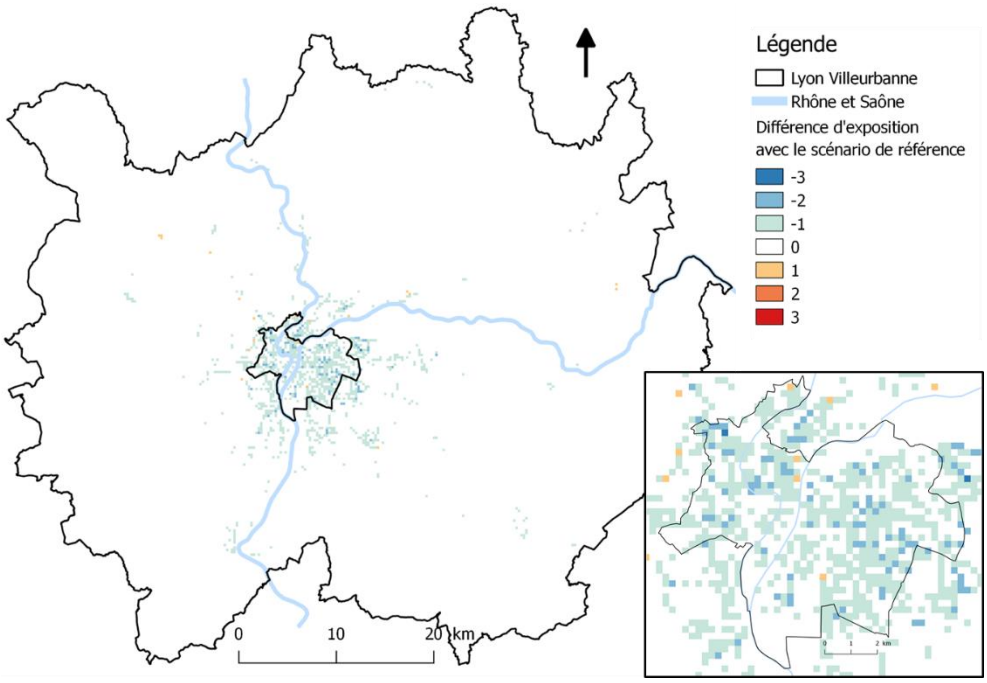
Pour l'ensemble des scénarios, les ménages les plus modestes restent les plus exposés, en revanche, le niveau d'exposition moyen au NOx des ménages aisés s'équilibre avec celui des ménages aux revenus médians. On constate même une exposition plus élevée pour les ménages aisés dans les scénarios d'évolution démographique, reflétant, entre autres, une certaine gentrification qui s'opère dans le centre de l'aire urbaine de Lyon. Les différences d'exposition entre les trois grandes zones concentriques de l'aire urbaine de Lyon restent très marquées pour l'ensemble des scénarios. Afin d'illustrer la répartition spatiale des variations apportées par certains scénarios, trois cartes ont été sélectionnées. La Figure V-23 représente les différences d'exposition aux NOx apportées par une politique de compacification de la ville . La Figure V-24 illustre celles du scénario « potentiel vélo », alors que la Figure V-25 présente les variations d'exposition associées à l'électrification du parc automobile.

Figure V-23 : Scores d'exposition du scénario de forme urbaine compacte par rapport à la situation de référence



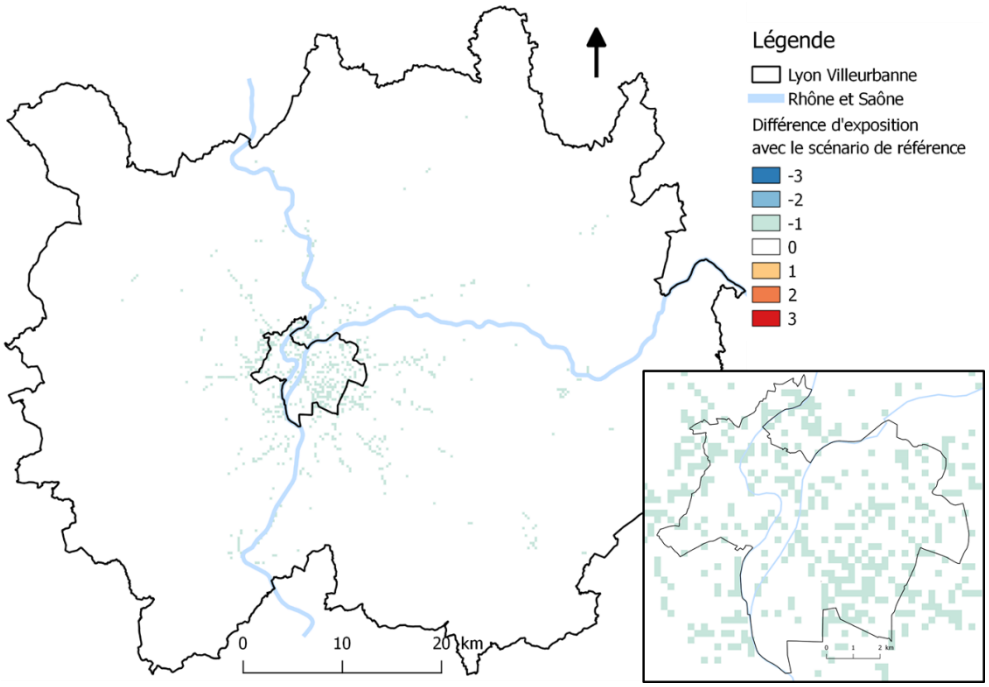
Source : traitement auteur, à partir des résultats de SIMBAD-ACV

Figure V-24 : Scores d'exposition du scénario de « potentiel vélo » par rapport à la situation de référence



Source : traitement auteur, à partir des résultats de SIMBAD-ACV

Figure V-25 : Scores d'exposition du scénario d'électrification du parc automobile par rapport à la situation de référence



Source : traitement auteur, à partir des résultats de SIMBAD-ACV

Les trois représentations cartographiques montrent la sensibilité particulière du centre de l'aire urbaine aux différentes actions menées sur la mobilité quotidienne et les impacts environnementaux associés. Dans le cas d'une forme urbaine compacte, des améliorations sont remarquables dans certaines zones périphériques, alors que les améliorations dans le centre sont hétérogènes. La Figure V-21 et la Figure V-24 mettent en avant le caractère urbain d'une politique vélo, puisque les niveaux d'exposition chutent principalement dans le centre, tout comme les niveaux d'émissions. L'intégration de véhicules électriques dans le parc automobile modifie sur l'ensemble de l'aire urbaine les niveaux d'impacts des habitants, en revanche, le centre est le principal bénéficiaire en termes de qualité de l'air et d'exposition de la population.

La spatialisation des émissions directes de polluants et l'estimation de l'exposition aux NOx de la population réalisées dans cette partie apportent un regard différent sur les impacts environnementaux des mobilités simulés dans les divers scénarios. Certaines conclusions observées dans l'approche « émetteur » ne sont plus vraies lorsque l'on adopte une approche « pollué », notamment pour les formes urbaines. On constate aussi que certains scénarios qui ne modifient que légèrement les niveaux d'impacts globaux (scénarios d'amélioration des TC et de zone 30) améliorent finalement l'exposition de la population en appliquant cette approche.

Ainsi, il apparait important de fixer les objectifs environnementaux des politiques développées afin de justifier correctement les actions menées. Par exemple, une politique focalisée sur les émissions de GES dévaloriserait certaines actions dont les effets seraient principalement sur les polluants locaux et le cadre de vie des habitants, comme la mise en œuvre d'une zone 30 km/h. Les PDU englobent ces différents objectifs environnementaux (Certu, 2011; Grenoble-Alpes Métropole, 2018).

À travers les diverses observations réalisées sur l'exposition de la population aux NOx émis par les gaz d'échappement associés à la mobilité quotidienne des personnes, on peut retenir deux grands enseignements. Le premier porte sur le rôle important de la localisation de la population par rapport à cet enjeu de la pollution locale. Le deuxième est relatif à la place essentielle du centre urbain pour l'enjeu d'exposition aux NOx, puisque les principales variations apportées par les scénarios se situent dans cette zone.

Conclusion de la partie 2 :

Le réalisme des hypothèses sous-jacentes aux scénarios que nous avons proposés puis dont nous avons évalué les impacts environnementaux est contestable et peut être remis en cause. Cependant, notre objectif dans ce travail est de montrer l'intérêt (voire la puissance) de l'outil développé en se basant sur le couplage d'un modèle LUTI tel que SIMBAD et d'une approche d'évaluation environnementale par ACV. Non seulement notre travail révèle que le couplage SIMBAD-ACV est méthodologiquement réalisable, mais il en montre également tout l'intérêt. L'outil SIMBAD-ACV s'avère en effet capable de prendre en compte des scénarios de nature diverse et de mettre en évidence des effets parfois contradictoires selon les différentes échelles observées et les différents indicateurs étudiés.

Par le biais de l'évaluation des scénarios exploratoires retenus, différentes analyses peuvent être réalisées et de nombreux enseignements peuvent être tirés. Ils concernent à la fois les leviers d'action à privilégier pour une mobilité quotidienne plus vertueuse environnementalement, mais également des conséquences, parfois contradictoires, qui peuvent en découler.

En mettant en parallèle des scénarios de natures différentes, nous avons montré que l'outil SIMBAD-ACV permet de mettre en évidence de nombreux effets sur la mobilité et ses impacts environnementaux afférents. Les distances parcourues quotidiennement ont évolué dans certains scénarios, notamment avec de nouvelles formes urbaines. L'efficacité du système de transports a été modifiée, soit par le biais des taux de remplissage des véhicules (scénario de covoiturage) soit en favorisant le report modal (scénario « potentiel vélo ») soit en ayant recours à de nouveaux véhicules et nouvelles technologies (scénarios de parcs automobiles).

Le couplage SIMBAD-ACV permet d'analyser l'évolution générale des impacts environnementaux sur l'ensemble de l'aire urbaine de Lyon, mais également de comparer les évolutions des différentes zones constituant cette aire urbaine. Ainsi, il a pu être observé dans certains scénarios des variations très contrastées en fonction de la localisation des ménages et des emplois. L'étude spatialisée des scénarios permet également de rendre compte de leurs impacts sur les niveaux d'exposition de la population aux polluants atmosphériques locaux. Les résultats d'exposition ont ainsi permis de nuancer certaines des conclusions réalisées au niveau global de l'aire urbaine, certaines zones devenant plus exposées aux polluants, y compris dans le cas d'une réduction globale des polluants émis.

La variété des scénarios pouvant être implémentés dans la méthode SIMBAD-ACV permet de rendre compte des différents degrés de liberté disponibles pour simuler différentes actions sur la mobilité quotidienne des habitants de l'aire urbaine de Lyon. Les effets constatés dans les évaluations de scénarios permettent ainsi de juger de la capacité du modèle à représenter la mobilité quotidienne des personnes avec l'ensemble des mécanismes associés.

En complément de l'analyse de l'état de référence, l'approche par scénarios permet une estimation des incertitudes associées à l'outil SIMBAD-ACV. En effet, chaque scénario fait varier des paramètres de l'outil développé. Ainsi, le rôle important des technologies de transports interroge sur la qualité des données environnementales utilisées, surtout dans une approche prospective. En effet, les bases de données EcoInvent et Copert, pourtant très utilisées dans les études environnementales, reposent sur des mesures datant parfois de plusieurs années.

Les résultats des scénarios révèlent aussi la forte influence que les paramètres de comportements de mobilité (parts modales, taux de remplissage des véhicules) et la localisation des acteurs dans l'aire urbaine de Lyon ont sur les impacts environnementaux. Ce constat interroge donc la qualité du modèle SIMBAD dont le fonctionnement a été calibré à partir de l'EMD de l'aire urbaine de Lyon datant de 2006. Cependant, pour les modèles environnementaux comme pour les modèles LUTI, la collecte de données et leur traitement sont des processus très longs et couteux.

Malgré le nombre conséquent de scénarios traités dans cette partie, aucun n'explore des variations au niveau des ménages et de leurs structures d'activités. Le rôle central sur la mobilité des caractéristiques des ménages et du type d'activités réalisées laisse la porte ouverte à d'autres scénarios exploratoires. Cependant, l'implémentation de scénarios de ce type dans la méthode SIMBAD-ACV nécessiterait un travail lourd et d'une autre nature (prise en compte plus fine des modifications des comportements de mobilité dans SIMBAD par exemple) qui n'est pas l'objet de notre travail ici.

Partie 3 : Enseignements et proposition du scénario « mobilité verte »

À partir des différents éléments de compréhension apportés par le chapitre IV et les scénarios analysés précédemment, un scénario complet de mobilité quotidienne des habitants de l'aire urbaine de Lyon est proposé. Ce scénario « mobilité verte » a pour double objectif de tester l'outil SIMBAD-ACV au travers un scénario volontariste traitant simultanément différents aspects influant sur les impacts environnementaux de la mobilité quotidienne et d'apporter des éléments de discussion sur les efforts à consentir pour atteindre des objectifs environnementaux substantiels.

3.1. Hypothèses de construction du scénario « mobilité verte »

À partir des principales observations réalisées dans le chapitre IV ainsi que dans la partie précédente, plusieurs options prospectives ont été retenues pour la construction d'un scénario unique de « mobilité verte ». Toujours avec une approche exploratoire et didactique, les orientations de ce scénario reflètent une approche volontariste pour une mobilité quotidienne beaucoup plus vertueuse environnementalement pour les habitants de l'aire urbaine de Lyon à l'horizon 2030. L'ensemble des hypothèses retenues sont présentées dans cette partie pour l'ensemble des enjeux de mobilité explorés dans la partie 2 (aménagement du territoire, évolution démographique, comportements de mobilité, réseaux de transports, parc de véhicules et production des carburants).

3.1.1. Évolutions démographiques et économiques

Pour le scénario « mobilité verte » à l'horizon 2030, la croissance de la population est estimée à +10% par rapport à la situation de référence, c'est-à-dire la population de 2009. Ceci correspond à un taux d'évolution annuel moyen de la population de +0,48%, ce qui est légèrement inférieur au taux d'évolution du Pôle Métropolitain de l'aire métropolitaine de Lyon entre 1999 et 2010, +0,52% par an (Agences d'urbanisme Lyon & Saint-Étienne, 2015). Ainsi la population passe de 1 753 440 habitants en 2009 à 1 928 800 habitants. Cette croissance est donc supérieure à celle estimée par le modèle Omphale à l'horizon 2030.

L'évolution de la structure des ménages suit les projections proposées par l'INSEE dans le modèle Omphale. Ainsi, la taille des ménages est réduite de 2,31 personnes par ménage en 2009 à 2,06 personnes et la part de ménages âgés de plus 75 ans augmente (11% de la population à plus de 75 ans contre 8% en 2009). L'accroissement démographique (+10%) et la diminution de la taille des ménages (-11%) conduisent finalement à une hausse du nombre de ménages de 23,7%, ce qui représente le nombre de logements à mettre à disposition dans le modèle SIMBAD.

L'accroissement du nombre d'emplois suit l'accroissement du nombre d'actifs potentiels de l'aire urbaine de Lyon. Ainsi, 9,6% emplois supplémentaires sont créés à l'horizon 2030 et devront être répartis sur l'ensemble de l'aire urbaine de Lyon.

3.1.2. Répartition des logements et des emplois

L'étude de trois formes urbaines contrastées dans la partie précédente a mis en évidence le fort intérêt de la forme urbaine compacte pour réduire les impacts environnementaux associés à la mobilité quotidienne de personnes. Cependant, l'exposition aux polluants locaux de la population est aggravée avec cette configuration. Parmi les deux formes urbaines privilégiant une croissance périphérique, le développement polycentrique autour des gares ferroviaires est moins polluant. L'aire urbaine de Lyon ne pouvant pas se développer uniquement dans son centre, le choix réalisé pour l'aménagement de l'aire urbaine de Lyon à l'horizon 2030 est de favoriser simultanément la localisation des logements dans le centre ainsi que dans les pôles secondaires. Pour cela, des logements et des emplois seront construits dans ces zones, et en

parallèle des logements et des emplois seront supprimés dans d'autres zones moins accessibles. Ces destructions soulignent l'aspect très volontariste du scénario « mobilité verte ».

Dans un premier temps, pour la localisation des logements dans l'aire urbaine, des logements sont supprimés dans les IRIS de périphérie non-desservis par une gare. Dans ces zones, 10% des logements sont supprimés, soit 1,4% des logements totaux de l'aire urbaine de Lyon en 2009. Ensuite, le parc de logements de la première couronne déconnecté du réseau ferroviaire est maintenu en nombre, ce qui a pour effet de réduire la population qui sera localisée dans ces zones du fait de la diminution de la taille des ménages à l'horizon 2030.

Dans un second temps, les nouveaux logements et les logements détruits sont construits dans le centre et dans les pôles secondaires. 60% des nouveaux logements sont situés dans le centre, ce qui correspond à une hausse de 35% du nombre de logements dans cette zone par rapport à 2009. La répartition entre les différents IRIS est réalisée en fonction du niveau d'émissions de GES par habitant estimé dans la situation de référence. Les IRIS qui génèrent le moins d'impacts environnementaux associés à la mobilité sont privilégiés pour la création de nouveaux logements, avec, cependant, un seuil maximum de densité de logement est fixé à 15 000 logements par km².

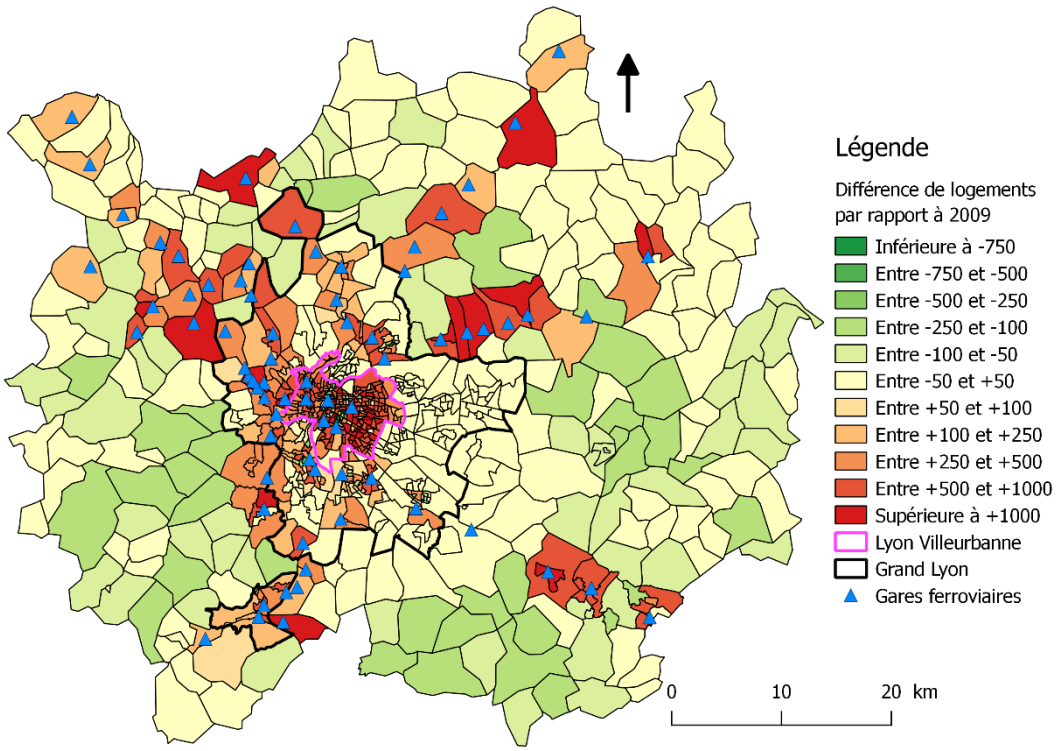
Les autres logements sont construits dans les IRIS de la première couronne et de périphérie connectés à une gare ferroviaire, ce qui représente pour ces IRIS une hausse de 37% de logements par rapport à 2009. Après avoir été divisés à parts égales entre la couronne et la périphérie, les logements sont ensuite répartis en fonction du niveau d'émissions de GES associées à la mobilité, par habitant, estimé dans la situation de référence et de la distance à la gare ferroviaire. Des seuils de densité à ne pas dépasser ont été définis pour la couronne et la périphérie, respectivement 5 000 et 3 000 logements par km². Les IRIS de périphérie sont plus grands en superficie. La Figure V-26 illustre l'ensemble des hypothèses précédentes en présentant par IRIS les logements créés et supprimés par rapport à la situation de référence de 2009. Le Tableau V-8 synthétise les distances moyennes des logements au centre de l'aire urbaine ainsi que la distance entre deux logements du scénario « mobilité verte ».

Tableau V-8 : Distances des logements du scénario « mobilité verte » par rapport au centre et distance moyenne entre deux logements

	Distance moyenne entre 2 logements	Distance moyenne au centre	Distance médiane	Distance nonantaine (90%)
Référence	14,5 km	9,4 km	5,9 km	23,6 km
Mobilité verte	13,7 km	8,9 km	5,3 km	22,3 km

Source : traitement auteur, à partir des données de SIMBAD pour les scénarios simulés

Figure V-26 : Création et relocalisation des logements par IRIS du scénario « mobilité verte » par rapport à la situation de référence



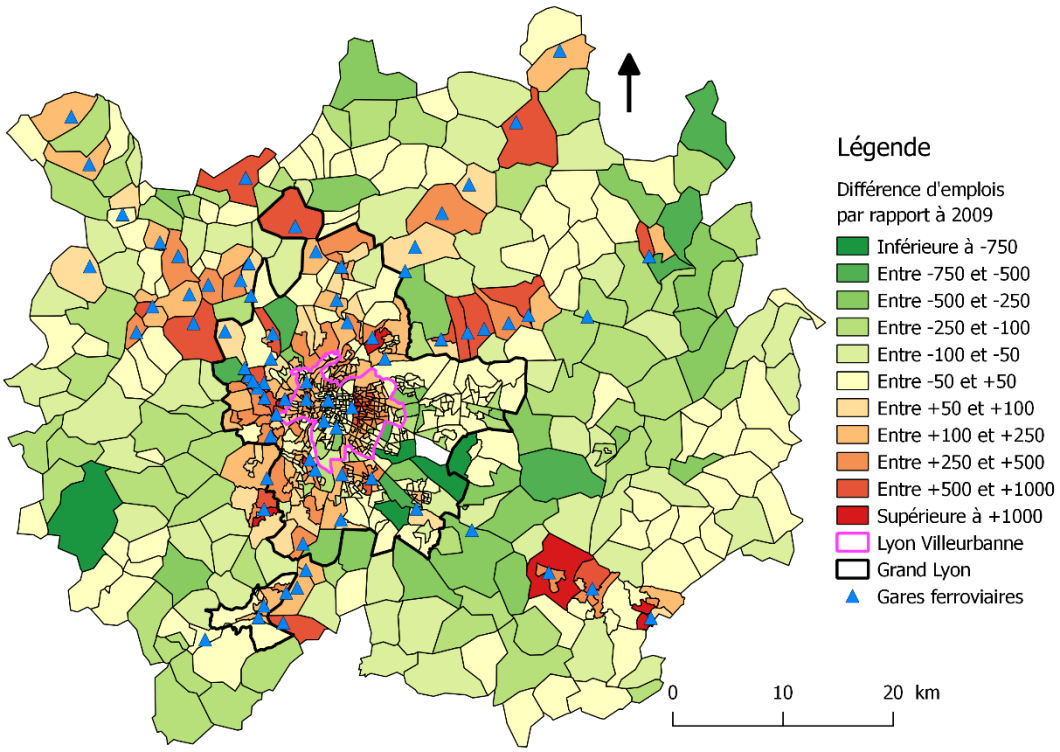
Source : traitement auteur, à partir des données de SIMBAD pour les scénarios simulés

La localisation des emplois suit la même logique que celle de logements à laquelle se rajoute un rééquilibrage entre la couronne Est et Ouest, car les emplois sont principalement localisés dans la couronne Est. Dans un premier temps, 20 000 emplois sont supprimés dans la périphérie non connectée à une gare ferroviaire, et le choix de suppression est guidé par le

niveau d'émissions de GES des déplacements arrivant dans les différentes zones estimé dans l'analyse de référence (Chap IV 3.1.2). Dans les IRIS de la couronne non-desservis par une ligne de TER, une diminution de 10% du nombre d'emplois est opérée à l'Est (-13 500 emplois) alors que les zones de l'Ouest bénéficient d'une hausse de 20% de leur nombre d'emplois (+7 300 emplois). Au final, 6 200 emplois sont retirés de la couronne non-desservie en train.

Pour la localisation des nouveaux emplois, la moitié des emplois sont créés dans le centre en fonction du niveau d'émissions de GES des déplacements attirés. Aucun nouvel emploi n'est créé dans l'hypercentre (1er,2e, 3e et 6e arrondissements de Lyon) puisque cette zone possède un taux d'emploi par logement très élevé (1,6 emploi par logement). Les autres nouveaux emplois sont répartis, dans un premier temps, équitablement entre la couronne et la périphérie. Puis les emplois sont implantés en fonction du niveau d'émissions de GES de chaque IRIS et de la distance à la gare ferroviaire. La Figure V-27 illustre l'ensemble des hypothèses précédentes en présentant par IRIS les emplois créés et supprimés par rapport à la situation de référence de 2009.

Figure V-27 : Création et relocalisation des emplois par IRIS du scénario « mobilité verte » par rapport à la situation de référence

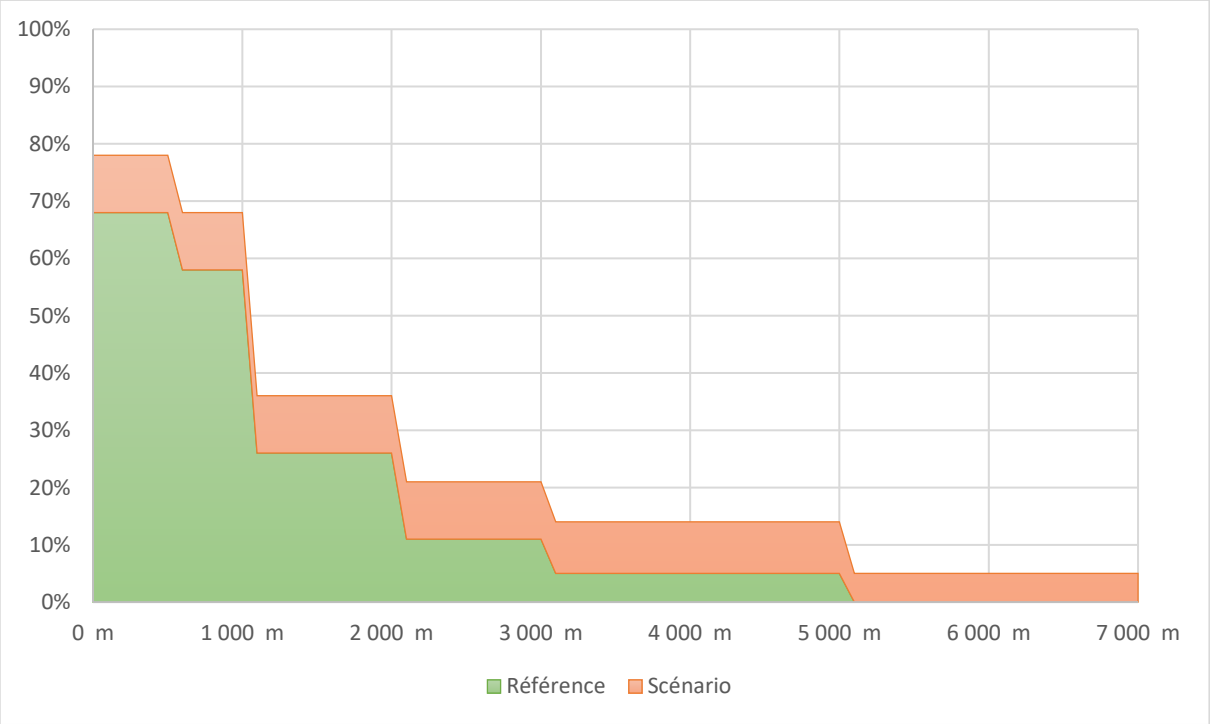


Source : traitement auteur, à partir des données de SIMBAD pour les scénarios simulés

3.1.3. Comportements de mobilité

Deux modifications des comportements de mobilité ont été évaluées dans la partie précédente et toutes deux apportent des gains significatifs sur l'environnement. L'hypothèse d'une augmentation des taux de remplissage des véhicules personnels de 0,1 personne étant considérée réaliste pour l'aire urbaine de Lyon, elle est conservée dans le scénario « mobilité verte ». En revanche, le scénario de « potentiel vélo » est trop exagéré pour être appliqué de la sorte. Pour les modes doux, le choix est fait d'améliorer leur part modale jusqu'à 10% et d'étendre la portée des déplacements en modes doux jusqu'à 7 km. Au-delà, aucun déplacement n'est réalisé en mode doux. La Figure V-28 illustre l'impact de ces hypothèses sur la part modale des modes doux en fonction de la distance de déplacement pour le motif travail associé à une zone urbaine de l'aire urbaine de Lyon.

Figure V-28 : Part modale des modes doux en fonction de la distance d'un déplacement domicile-travail d'une zone urbaine dans SIMBAD



Source : traitement auteur, à partir des données de SIMBAD pour les scénarios simulés

En complément des modifications précédentes, les déplacements pour le travail ainsi que pour des services et des achats sont transformés pour représenter des pratiques de télétravail, de services en ligne et de e-commerce. Le choix est fait de réduire de 5% le nombre de déplacements réalisés pour ces motifs.

3.1.4. Réseaux de transport

Les évaluations environnementales des scénarios de réseaux de transports avec l'amélioration du temps de transports en commun et la mise en place d'une zone 30 km/h dans Lyon Villeurbanne ont montré des effets variables en fonction de l'analyse menée. Même si les effets de la zone 30 km/h dans le centre sont discutables, le choix est réalisé de garder les deux modifications de réseaux évaluées précédemment dans le scénario « mobilité verte » (cf. 1.4).

En complément de ces deux modifications, un troisième changement dans le réseau de transport est appliqué dans ce scénario pour contraindre davantage l'usage de la voiture. La vitesse règlementaire de l'ensemble des routes dont la vitesse règlementaire initiale est supérieure à 70 km/h est réduite suivant ces règles :

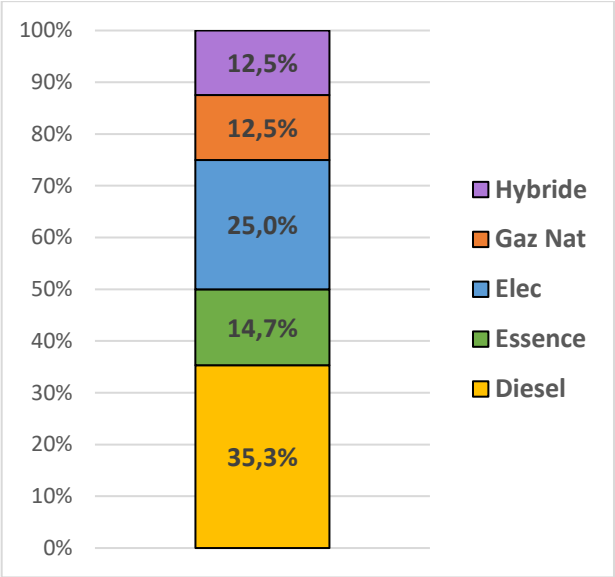
- Les tronçons limités à 130 km/h seront limités à 110 km/h (1% du trafic de 2009)
- Les tronçons limités à 110 km/h seront limités à 100 km/h (9% du trafic de 2009)
- Les tronçons limités à 90 km/h seront limités à 80 km/h (11% du trafic de 2009)
- Les tronçons limités à 80 km/h seront limités à 70 km/h (20% du trafic de 2009)

3.1.5. Parcs de véhicules et carburants utilisés

La mise en œuvre d'une évaluation environnementale pour différents scénarios de parcs automobiles et de production d'énergie va servir à la construction du parc automobile du scénario « mobilité verte » ainsi qu'au système de production de carburant. Dans un premier temps, les motorisations alternatives ont significativement modifié les impacts environnementaux associés à la mobilité quotidienne de l'aire urbaine de Lyon, positivement ou négativement. L'amélioration des véhicules thermiques via les normes EURO a apporté des

gains environnementaux que pour les polluants atmosphériques locaux. Le scénario proposé introduit donc significativement des motorisations nouvelles de natures différentes dans le parc automobile (véhicules électriques, véhicules à gaz naturel et véhicules hybrides essence-électricité non-rechargeables). Seule la moitié du parc automobile reste alimentée en carburants liquides traditionnels (Essence et Diesel), la Figure V-29 illustre les choix de motorisation réalisés.

Figure V-29 : Répartition par carburation du parc automobile simulé



Pour les véhicules à motorisations alternatives à l'essence et le diesel, l'âge n'a pas d'influence. En revanche, pour les véhicules thermiques traditionnels, la norme EURO 6 est appliquée pour l'ensemble du parc. Dans le modèle d'émission Copert, trois niveaux de norme EURO 6 existent, qui se différencient par la date d'immatriculation et un facteur de réduction des émissions de NOx par rapport à la norme EURO 5. Pour 2015 et 2016, 17,6% de réduction, entre 2017 et 2019, 37,1% de réduction et après 2020, 69,4% de réduction de NOx. En fixant un horizon temporel à 2030 et en considérant l'âge du parc comme constant, on obtient une répartition des véhicules thermiques de respectivement 14,5%, 12,3% et 73,2% pour les trois niveaux de la norme EURO 6. Ces nouveaux coefficients réduiront davantage les émissions de NOx que lors du scénario « EURO 6 » réalisé dans la partie précédente.

Pour l'approvisionnement en carburants, le mix électrique décrit par RTE à l'horizon 2030 est utilisé pour les véhicules électriques. La production de biogaz à partir de méthanisation alimente l'intégralité des véhicules à gaz, avec seulement 1% de fuite de méthane. En revanche,

les carburants liquides traditionnels sont gardés constants, avec pour l'essence de l'E5 et pour le diesel du B7.

Contrairement aux scénarios précédents, le parc de véhicules du réseau de transports en commun de Lyon est amélioré. Les modes de transports en commun lourds (métro, tram, train) restent identiques à la situation de référence. En revanche, l'ensemble du parc de bus urbain est modifié avec 65% de bus diesel et 35% de bus électriques. Les proportions pour les tailles de bus sont conservées et les bus diesel sont tous à la norme EURO 6.

3.1.6. Récapitulatif des hypothèses retenues

L'ensemble des modifications présentées dans cette partie constituent un seul scénario dont le but est double. Dans un premier temps, il s'agit de mettre à l'épreuve SIMBAD-ACV face à un scénario faisant varier un ensemble de paramètres simultanément. De plus, le scénario « mobilité verte » construit étant très volontariste, les résultats de son évaluation représenteront un seuil au-dessous duquel la mobilité quotidienne des habitants de l'aire urbaine de Lyon aura des difficultés à descendre à moyen terme sans rupture majeure, non considérée dans ce scénario.

Le Tableau V-9 récapitule la totalité des modifications réalisées dans ce scénario et présente aussi une rapide description des hypothèses réalisées.

Tableau V-9 : Hypothèses retenues pour le scénario « mobilité verte »

Enjeux	Modifications	Description
Évolutions démographique et économique	Population	Augmentation de 10% par rapport à 2009, utilisation des projections Omphale pour les catégories de ménages
	Emplois	Conservation du nombre d'emplois par actifs potentiels
Aménagement du territoire	Logements	Construction de logements dans le centre et les pôles secondaires. Maintien des logements dans le reste de la première couronne et réduction des logements dans le reste la périphérie
	Emplois	Création d'emplois dans les pôles secondaires et le centre (hors hypercentre). Rééquilibrage des emplois entre la couronne Est et la couronne Ouest. Réduction des emplois dans la périphérie non-reliée à une gare ferroviaire
Nouvelles pratiques de mobilité	Covoiturage : +0,1 passager par véhicule	Augmentation du nombre de passagers par véhicule de 0,1 passager
	Amélioration des modes doux	Allongement des déplacements réalisés en modes doux et accroissement de sa part modale
	Télétravail, e-commerce et service en ligne	Réduction de 5% des déplacements pour le motif travail et achat-service
Réseaux de transports	Amélioration des temps TC	Réduction de 25% des temps de déplacement en TC
	Zone 30 dans Lyon et Villeurbanne	Réduction de la vitesse règlementaire dans le centre
	Réduction généralisée de la vitesse en voiture	Réduction de la vitesse règlementaire pour toutes les vitesses supérieures à 70 km/h
Évolution des parcs de véhicules	Véhicules Euro 6	Tous les véhicules thermiques sont certifiés EURO 6 (amélioration des émissions de NOx)
	Diversification des motorisations dans le parc automobile	50% du parc automobile est constitué de véhicules électriques, hybrides et à gaz naturel.
	Modification du parc de bus urbains	L'ensemble des bus sont à la norme EURO 6 et 35% des bus sont électriques
Production des carburants	Essence et Diesel	Carburants E5 et B7 (pas de modification)
	Électricité	Utilisation du mix énergétique de RTE en 2030 pour alimenter les véhicules électriques
	Gaz Naturel	Approvisionnement en gaz assuré à 100% par la méthanisation

3.2. Analyse du scénario « mobilité verte »

3.2.1. Impacts environnementaux globaux

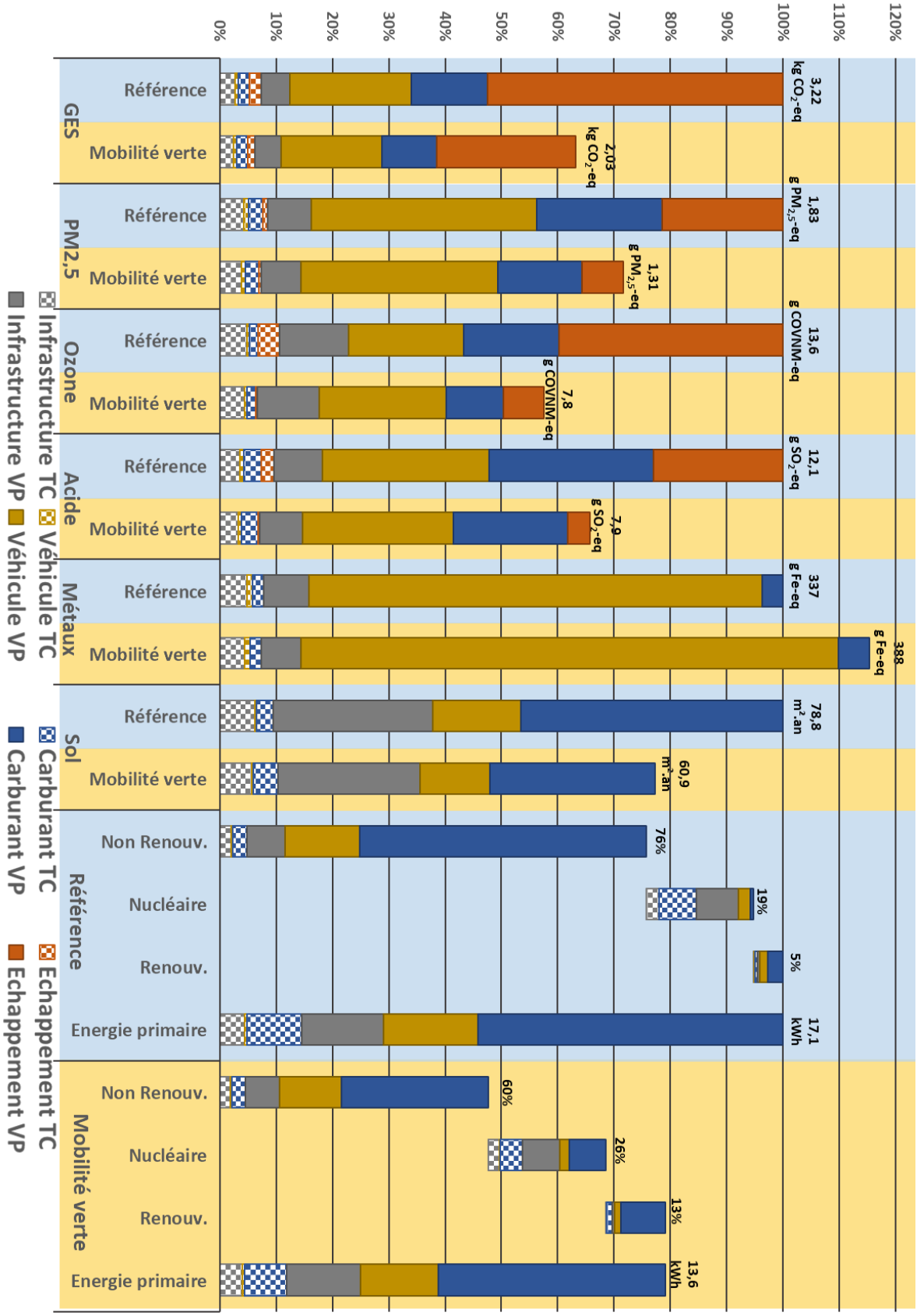
Le scénario « mobilité verte » modifie significativement la mobilité quotidienne des habitants de l'aire urbaine de Lyon et les impacts environnementaux associés. La Figure V-30 présente l'ensemble des impacts environnementaux par habitant pour la mobilité quotidienne dans la situation de référence et pour le scénario « mobilité verte ».

Pour les différents indicateurs évalués, les variations observées entre les deux situations sont significatives (supérieures à 15%) et seule la consommation de ressources métalliques est en hausse par rapport à la situation de référence. Cette hausse est liée à la fabrication des véhicules qui nécessite plus de métaux pour les véhicules électriques et hybrides.

Des baisses significatives des impacts environnementaux sont constatées pour les émissions de polluants atmosphériques (GES, particules fines, précurseurs de l'ozone troposphérique, polluants acides) avec des réductions comprises entre 28% et 42%. Les émissions de GES sont réduites de 37% par rapport à la situation de référence. La réduction des émissions de gaz d'échappement est la principale raison de ces réductions importantes. Pour les émissions de GES, les gaz d'échappement ne représentent plus que 41% des émissions totales, contre 55% dans la situation de référence.

La contribution de la phase de cycle de vie des infrastructures de transports est en baisse de 10% par habitant puisque la population augmente de 10% dans le scénario et les impacts des infrastructures restent constants (les infrastructures sont donc plus utilisées). La contribution de la phase de cycle de vie des véhicules varie en fonction de l'indicateur observé, sa contribution est en hausse pour la formation d'ozone troposphérique et pour la consommation de ressources métalliques. Avec les différentes mesures mises en place dans le scénario « mobilité verte », la contribution de la fabrication des carburants est en baisse pour la majorité des indicateurs environnementaux. Avec les nouvelles motorisations introduites dans le parc automobile, on observe un transfert des énergies fossiles, hors nucléaire, vers les énergies nucléaires et d'origine renouvelable. La consommation de ressources métalliques associée aux carburants est en hausse par rapport à la situation de référence du fait de l'électrification d'une partie du parc.

Figure V-30 : Impacts environnementaux par habitant pour le scénario « mobilité verte »



Source : traitement auteur, à partir des résultats de SIMBAD-ACV, scénario « mobilité verte »

L'usage du sol est aussi réduit à la suite de la modification des carburants utilisés et à leurs quantités consommées, puisque la consommation d'énergie primaire recule de 21% par rapport à la situation de référence. La part d'énergie fossile, hors nucléaire, diminue de 16% au profit de l'électricité (et donc d'une hausse d'énergies nucléaire et d'origine renouvelable). La contribution des transports en commun reste faible dans le scénario « mobilité verte », avec toujours une place importante pour les infrastructures.

À travers le scénario volontariste « mobilité verte », on observe des seuils en termes de réduction des impacts sur l'environnement. Le premier constat semble être la difficulté de gagner sur tous les tableaux, notamment avec la consommation de ressources métalliques dans les véhicules électriques et hybrides. Pour les émissions de GES, la baisse avoisine les 40%, ce qui est prometteur, mais loin des objectifs du facteur 4 entre 1990 et 2050. Ce constat, partagé dans d'autres études, incite donc soit les autres secteurs économiques à compenser les émissions de GES des transports soit la société à repenser ses modes de vie et ses comportements pour enclencher une rupture significative.

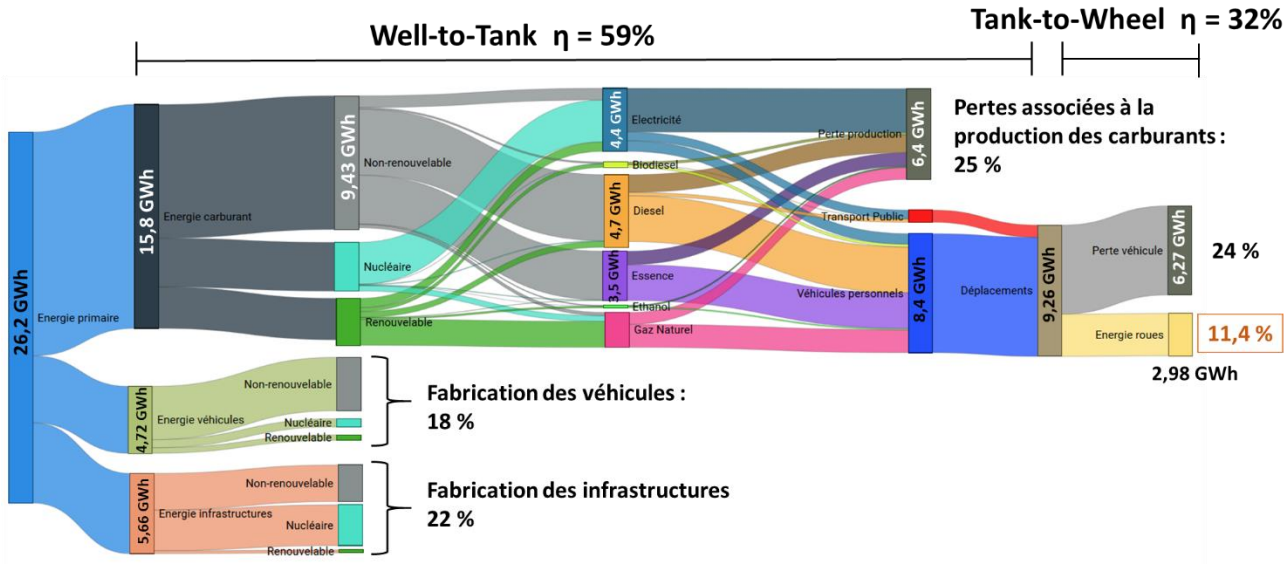
La mise en œuvre d'une ACV pour le scénario « mobilité verte » révèle un gain énergétique de 21%, avec une part d'énergies renouvelable de 13%. Ces résultats montrent les efforts à consentir pour s'approcher des objectifs du paquet Climat-Energie et surtout témoignent de la difficulté à intégrer des énergies renouvelables dans les transports et la mobilité.

3.2.2. Efficacité du système de transports

Après avoir analysé les résultats de la mobilité quotidienne du scénario « mobilité verte » de façon générale pour les différents indicateurs environnementaux, différentes analyses plus fines sont réalisées, notamment sur l'efficacité du système de transport. La première partie de cette étude porte sur l'efficacité énergétique avec les différents flux et pertes énergétiques qui ont lieu dans le système de transport. La deuxième partie s'intéresse au rôle de l'efficacité du système de transports par rapport au rôle de l'usage qui en est fait.

En utilisant la même méthode que pour la situation de référence, le diagramme de flux d'énergie associé à la mobilité quotidienne des personnes a été réalisé pour le scénario « mobilité verte » (Figure V-31).

Figure V-31 : Diagramme des flux d'énergie de la mobilité quotidienne des personnes dans le scénario « mobilité verte »



Source : traitement auteur, utilisation du logiciel « Acquire's Sankey Diagram Generator », à partir des résultats de SIMBAD-ACV, scénario « mobilité verte »

Par rapport au bilan énergétique réalisé pour la situation de référence (Figure IV-12), le système de transport total du scénario « mobilité verte » consomme 13,5% d'énergie primaire en moins, principalement du fait d'une baisse de la consommation de carburants, elle-même liée en partie à une baisse du total des distances parcourues en véhicules (pour les véhicules personnels -14%).

L'introduction de véhicules électriques, hybrides et à gaz naturel dans le parc automobile modifie grandement les flux d'énergie associés aux carburants. Ainsi, la part d'énergie fossile, hors nucléaire, est de 60% pour les carburants, contre 84% dans la situation de référence, alors que la part d'énergie renouvelable atteint 18%, contre 5%.

Cependant, les véhicules électriques et à gaz ne sont pas nécessairement plus efficaces énergétiquement. En effet, même si le rendement du réservoir à la roue (Tank-to-Wheel) est meilleur dans ce scénario, 32% contre 27%, le rendement associé à la production des carburants

se détériore et passe de 66% à 59%. Au final, pour les carburants, le rendement du puits à la roue est légèrement plus élevé dans le scénario « mobilité verte », 19% au lieu de 18% dans le scénario de référence. Le système de transport présente donc une plus grande diversité de vecteurs énergétiques, favorisant l'usage d'énergie renouvelable via le biogaz et l'électricité, mais les pertes restent équivalentes.

En incluant les énergies grises associées à la production des véhicules et des infrastructures, le système total présente une efficacité de 11,4% entre la quantité d'énergie primaire totale et l'énergie aux roues. Par rapport à la situation de référence, la quantité d'énergies grises est en baisse, mais elles représentent dans le scénario final 40% de l'énergie totale.

La deuxième partie de cette analyse de l'efficacité du système de transports en personnes s'intéresse à l'influence des modifications apportées par le scénario sur les différents éléments constituants l'équation d'impacts associés à l'usage du système de transports :

$$Impact = facteur_unitaire * \frac{1}{taux\ de\ remplissage} * distance\ par\ sortie * nb\ sorties$$

Le scénario « mobilité verte » apporte des modifications à l'ensemble de l'équation précédente. Les technologies de véhicules et les conditions de circulations simulées conditionnent les facteurs d'émissions et de consommation par véhicule.kilomètre. Les taux de remplissage dépendent de la localisation des acteurs et du développement du covoiturage. Les temps de déplacements et les nouvelles localisations associées au scénario « mobilité verte » impactent les distances parcourues par sortie. Enfin, la répartition des sorties entre les trois modes principaux est remaniée avec les différentes mesures implémentées dans le scénario.

Afin d'illustrer l'influence de chacun des paramètres de l'équation sur le résultat final, le Tableau V-10 présente pour le scénario « mobilité verte » et la situation de référence les émissions de GES et la consommation d'énergie primaire des véhicules personnels rapportées à quatre unités différentes, par véhicule.kilomètre, par personne.kilomètre, par sortie et par habitant.

Tableau V-10 : Émissions de GES et consommation d'énergie primaire des véhicules personnels en fonction de différentes unités fonctionnelles

	par véhicule.km			par personne.km			par sortie en voiture			par habitant par jour	
	GES	Énergie		GES	Énergie		GES	Énergie		GES	Énergie
Unités	g CO_2	kWh	personnes /véhicule	g CO_2	kWh	km / sortie	kg CO_2	kWh	sortieVP/ habitant	kg CO_2	kWh
Référence	298	1,46	1,26	235	1,16	15,5	3,65	17,9	0,82	2,98	14,7
Mobilité verte	234	1,47	1,36	172	1,08	15,4	2,65	16,7	0,69	1,83	11,5
	-21%	1%		-27%	-6%		-27%	-7%		-39%	-21%

Source : traitement auteur, à partir des résultats de SIMBAD-ACV, scénario « mobilité verte »

À travers les émissions de GES et la consommation d'énergie associées aux voitures, on constate deux mécanismes d'impacts différents en fonction de l'enjeu environnemental observé. Les importantes diminutions des émissions de GES pour les véhicules sont liées en grande partie à l'amélioration de facteurs d'émissions par véhicule ainsi que par le report modal vers d'autres modes alternatifs. Le taux de remplissage des voitures contribue plus faiblement à la baisse des émissions et on constate que la distance par sortie est quasiment inchangée. Pour la consommation d'énergie, en revanche, l'efficacité énergétique des véhicules est moins importante dans le scénario « mobilité verte ». Pour les véhicules personnels, la réduction de la consommation énergétique s'explique donc dans un premier temps par le report modal opéré puis par un meilleur remplissage des voitures.

Au final, les deux analyses réalisées montrent que les gains environnementaux ne sont pas associés uniquement à l'efficacité du système de transport. Pour certains indicateurs, comme l'énergie primaire, les gains au niveau des véhicules sont négligeables, reflétant le rôle central de l'usage du système de transport dans l'évaluation environnementale de la mobilité quotidienne des personnes. En complément de l'ACV, l'analyse des flux d'énergies apporte des éléments de discussion supplémentaires sur le rôle majeur des énergies grises et sur les pertes énergétiques qui restent constantes dans le scénario « mobilité verte ».

3.2.3. Pratiques de mobilité

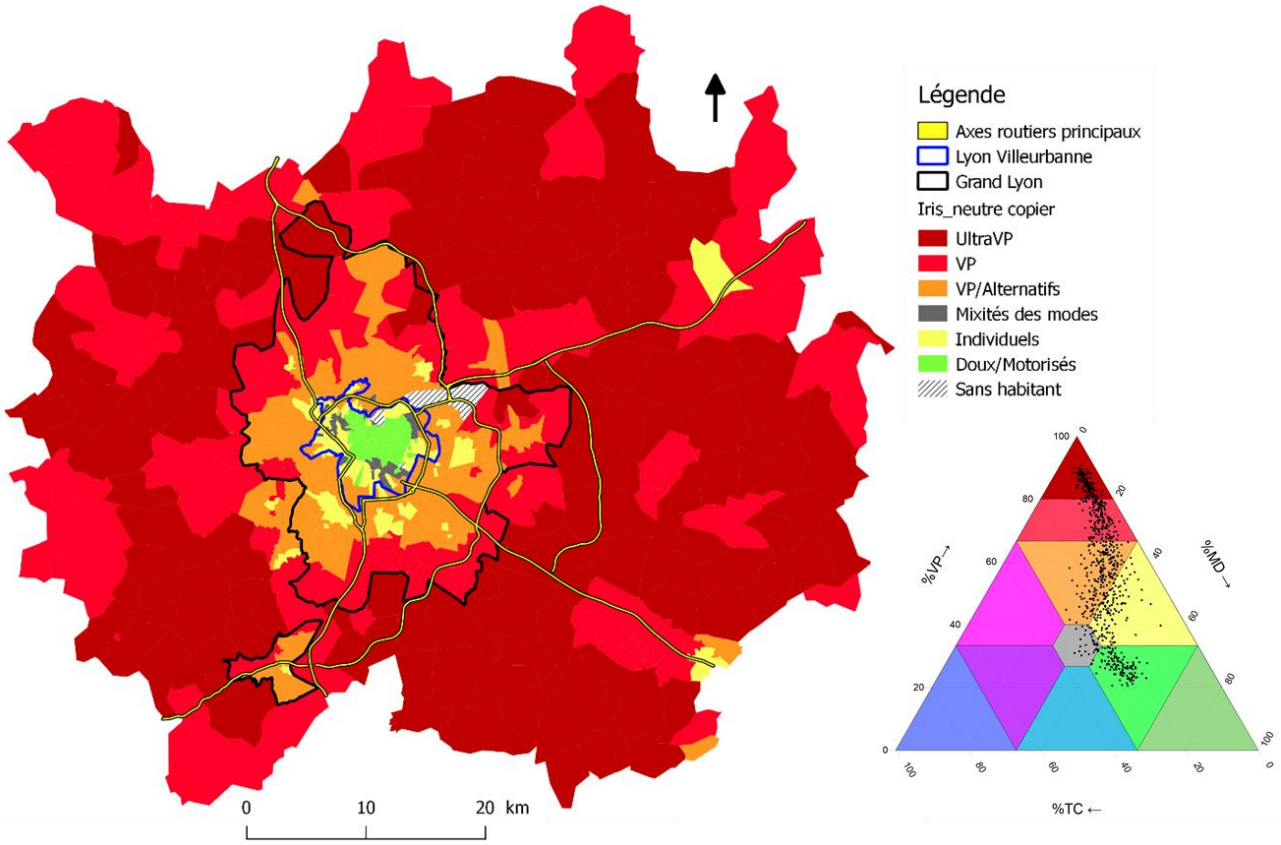
L'analyse précédente a mis en avant le rôle variable des améliorations technologiques pour les différents indicateurs environnementaux, tout en montrant l'importance de l'usage du système de transport, notamment avec les parts modales. Afin d'illustrer ce dernier point, cette partie analyse les conséquences sur les parts modales et les comportements de mobilité du scénario « mobilité verte ».

Sur l'aire urbaine de Lyon, la part modale de la voiture est en baisse dans le scénario « mobilité verte », elle passe de 60% dans la situation initiale à 51%. Le nombre de sorties par habitant étant pratiquement identique, le report s'effectue sur le transport en commun et les modes doux, respectivement 17% et 32% de parts modales. Pour ces deux modes, les distances moyennes parcourues par sortie sont aussi en hausse puisque la distance moyenne d'une sortie en TC passe de 10 km à 11 km alors que la distance moyenne passe de 3,3 km à 3,9 km pour les modes doux.

Pour illustrer les changements de comportements dans l'aire urbaine de Lyon, la Figure V-32 présente, pour l'ensemble des IRIS, la catégorie de pratique de mobilité associée aux trois parts modales principales. Mis en parallèle avec la Figure IV-22, on peut constater les zones propices au report modal.

Dans le scénario « mobilité verte », l'usage de la voiture reste encore majoritaire dans la périphérie avec une majorité d'IRIS dans lesquels l'usage de la voiture dépasse 80% des sorties quotidiennes. Dans le Grand Lyon, et principalement dans le centre de Lyon et Villeurbanne, on constate un usage plus important des modes alternatifs à la voiture. Avec l'hypothèse de développement des mobilités douces dans le scénario, le centre est dominé par la pratique des modes doux.

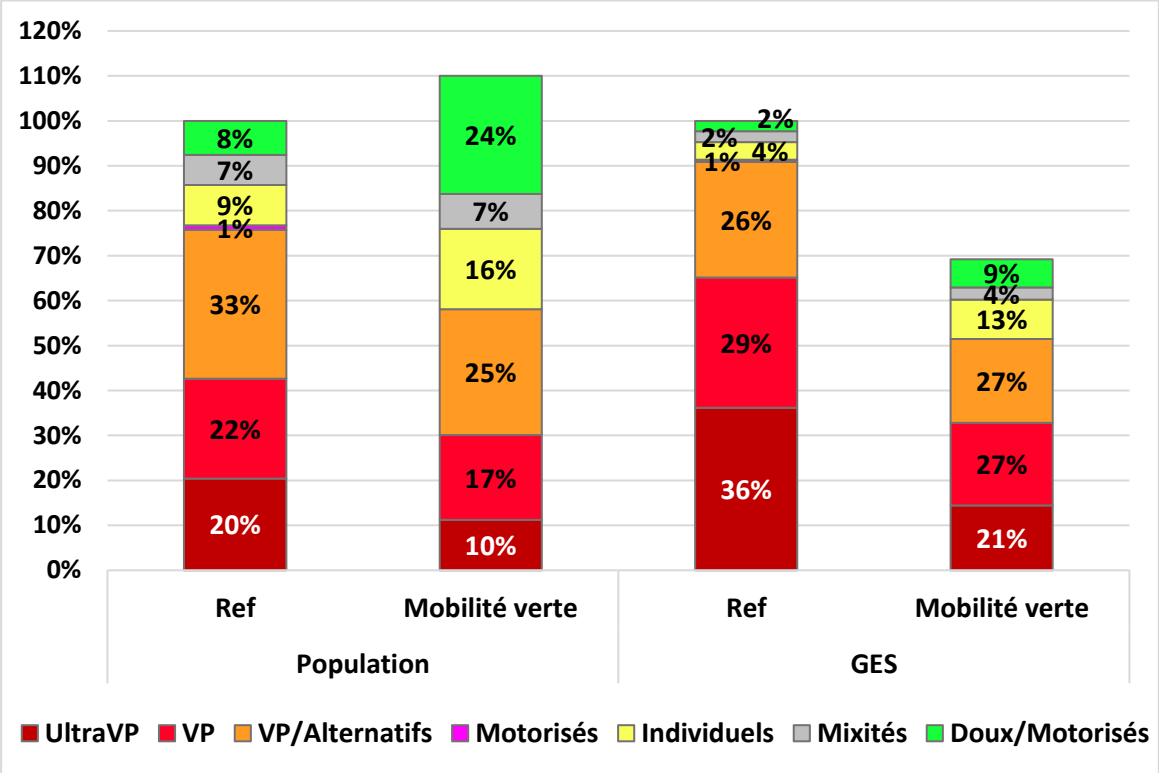
Figure V-32 : Comportement modal des IRIS de l'aire urbaine de Lyon pour le scénario « mobilité verte »



Source : traitement auteur, à partir des résultats de SIMBAD-ACV, scénario « mobilité verte »

La Figure V-33 illustre l'évolution des comportements de mobilité dans la population et la contribution de chaque comportement modal aux émissions totales de GES. Les différentes mesures simulées dans le scénario « mobilité verte » ont permis de réduire significativement l'usage de la voiture dans la population puisque la part de grands utilisateurs de la voiture (« UltraVP » et « VP ») est passée de 42% à 27%. De plus, les émissions de GES associées à ces deux catégories ne représentent plus que 48% des émissions totales de l'aire urbaine de Lyon, contre 65% dans la situation de référence.

Figure V-33 : Répartition démographique et des émissions de GES par comportement modal pour l'ensemble de l'aire urbaine de Lyon



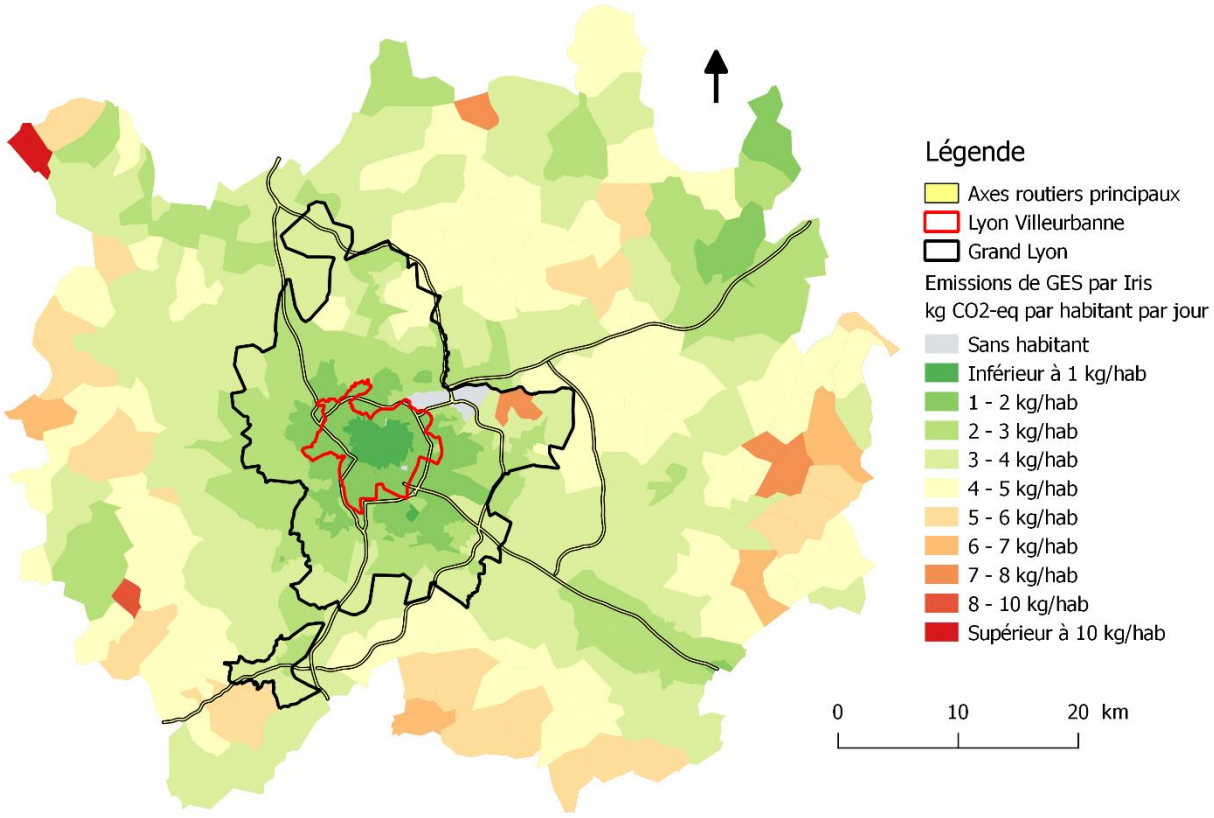
Source : traitement auteur, à partir des résultats de SIMBAD-ACV, scénario « mobilité verte »

Les différentes mesures de localisations de la population et des emplois, de ralentissement de la voiture, de soutien aux modes alternatifs ont permis de réduire significativement la part de la population fortement utilisatrice de la voiture. Cependant, une partie importante du périurbain de Lyon reste encore dépendante de la voiture et les émissions associées à ces territoires représentent encore dans le scénario presque la moitié des émissions de GES totales. L'absence d'alternative à la voiture dans certaines zones de l'aire urbaine de Lyon limite les leviers d'actions pour une mobilité quotidienne plus sobre, même si l'ensemble des actions affectant les facteurs d'émissions des véhicules, les taux de remplissage et les distances parcourues restent effectives.

3.2.4. Variabilité spatiale et socio-économique

L'analyse de la situation de référence a montré la forte influence de la localisation sur le bilan environnemental de la mobilité quotidienne d'une personne. Afin d'illustrer les variabilités spatiales encore présentes dans le scénario « mobilité verte », la Figure V-34 représente le niveau d'émissions de GES moyen pour la mobilité quotidienne d'un habitant pour chacun des 777 IRIS de l'aire urbaine de Lyon.

Figure V-34 : Niveaux d'émissions de GES par habitant associés aux IRIS pour le scénario « mobilité verte »



Source : traitement auteur, à partir des résultats de SIMBAD-ACV, scénario « mobilité verte »

En lien avec la Figure IV-17, qui représente les niveaux d'émissions de la situation de référence, on peut estimer les améliorations relatives de chaque zone. L'ensemble de l'aire urbaine présente des taux d'émissions de GES plus faible, et les principales réductions sont observées dans la périphérie où les niveaux d'émissions étaient élevés dans la situation de référence. Malgré une compacification du centre urbain, les niveaux d'émissions des habitants

de Lyon et Villeurbanne sont en baisse, contrairement à la forme urbaine compacte évaluée dans la partie précédente. Dans le scénario « mobilité verte », les émissions moyennes de GES passent sous la barre de 1 kg de CO_2-eq par habitant et par jour pour Lyon et Villeurbanne.

En réutilisant les seuils de densité estimés dans le chapitre IV (3.3.2), ainsi que les typologies de ménages (Chap IV 2.2) les impacts environnementaux de la mobilité quotidienne des personnes sont différenciés en catégories de ménages croisant localisation et caractéristiques socio-économiques (Tableau V-11).

Tableau V-11 : Émissions de GES par habitant en fonction des catégories de ménages et du décile de densité des IRIS de résidence pour le scénario « mobilité verte »

Émissions de GES par habitant (kg CO_2-eq)	1er décile	2e décile	3e décile	4e décile	5e décile	6e décile	7e décile	8e décile	9e décile	10e décile	Aire urbaine	% population
Retraité >75ans	2,34	1,84	1,53	1,32	1,15	1,09	0,98	0,83	0,57	0,39	1,05	11%
Seul inactif	2,32	1,92	1,60	1,22	1,09	1,12	0,96	0,80	0,55	0,38	0,91	6%
Couple/Famille inactif	2,89	2,30	1,83	1,55	1,36	1,28	1,15	0,98	0,66	0,46	1,37	10%
Seul actif	5,94	5,03	4,39	3,36	2,93	2,57	2,09	1,56	1,17	0,93	2,24	9%
Couple 1 actif	4,43	3,59	3,14	2,58	2,28	2,07	1,79	1,42	0,98	0,73	2,18	8%
Couple biactif	6,08	5,16	4,52	3,82	3,28	2,91	2,46	1,91	1,42	1,13	3,03	11%
Famille sans ou un véhicule	4,06	3,28	2,84	2,41	2,04	1,92	1,70	1,37	0,95	0,72	1,68	18%
Famille de 3 personnes multimotorisée	4,72	3,99	3,51	2,91	2,60	2,39	2,04	1,65	1,22	0,97	2,91	8%
Famille de 4 personnes multimotorisée	4,21	3,59	3,14	2,62	2,27	2,08	1,75	1,46	1,02	0,79	2,62	12%
Famille de 5+ personnes multimotorisée	3,86	3,24	2,72	2,29	1,87	1,78	1,46	1,27	0,84	0,62	2,33	7%
Moyenne par ménage	4,12	3,49	3,03	2,49	2,12	1,91	1,64	1,32	0,94	0,71	2,03	
Répartition démographique	8%	8%	9%	10%	10%	7%	10%	9%	14%	13%		

NB : la population et les densités des IRIS ont changé, c'est pourquoi les déciles calculés pour la situation de référence, et repris ici, ne représentent pas 10% de la population (cf. Chap IV 3.3.2)

Source : traitement auteur, à partir des résultats de SIMBAD-ACV, scénario « mobilité verte »

L'ensemble des catégories de ménages du Tableau V-11 présentent des taux d'émissions de GES plus faibles que dans la situation de référence. À cette baisse générale se rajoute une répartition de la population différente entre les niveaux de densité et entre les catégories socio-économiques de ménages. Afin d'estimer l'impact associé à cette nouvelle répartition

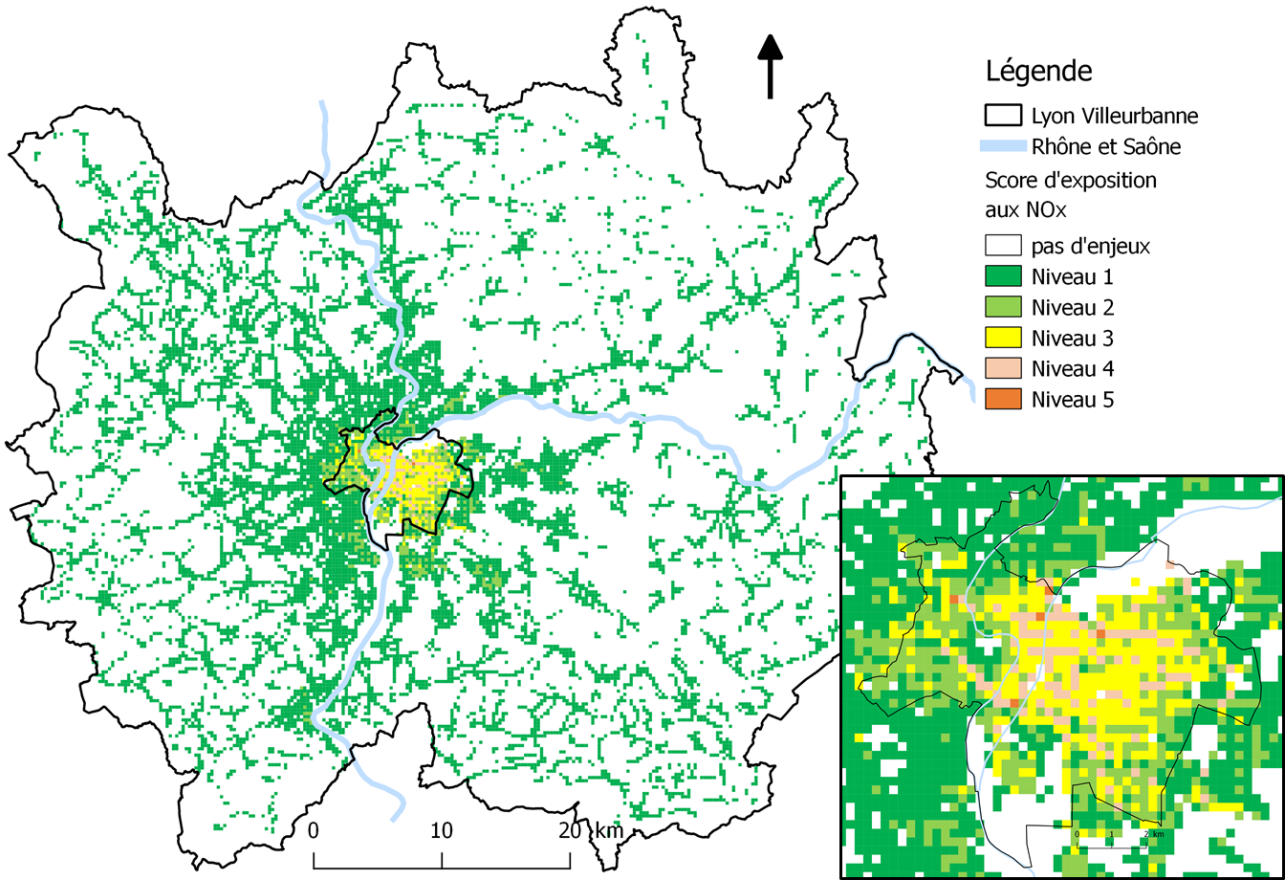
démographique par rapport à l'impact associé à l'amélioration de l'ensemble de 100 classes de ménages, la répartition démographique de la situation de référence (Tableau IV-17) est appliquée aux facteurs d'émissions du Tableau V-11. Avec la répartition démographique de la situation de référence et les impacts par catégories de scénario final, les émissions de GES par habitant sont estimées à 2,21 kg de CO_2-eq par jour. En utilisant cette répartition en 100 classes on peut donc estimer que sur les 37% de réduction d'émissions de GES observées par habitant dans le scénario « mobilité verte », 31% sont associées aux améliorations des facteurs de chacune des 100 classes et 6% à la répartition de la population dans ces classes.

3.2.5. Exposition de la population aux NOx

Pour finir l'analyse du scénario « mobilité verte », l'exposition de la population aux NOx produits par la mobilité quotidienne des habitants de l'aire urbaine de Lyon est étudiée. À partir des seuils de densité de population et de densité d'émissions de NOx de la situation de référence, le score d'exposition du scénario final est calculé et la Figure V-35 illustre la répartition de l'indicateur d'exposition sur l'ensemble de l'aire urbaine de Lyon.

Pour le scénario « mobilité verte », le score global de l'aire urbaine est estimé à 1,73, contre 2,35 dans la situation de référence. Ce score est inférieur à l'ensemble des scénarios évalués dans la partie précédente. Cette forte baisse repose en grande partie sur la réduction de 83% des émissions directes de NOx par rapport à la situation de référence.

Figure V-35 : Score d'exposition de la population aux NOx liées à la mobilité quotidienne des personnes du scénario « mobilité verte »



Source : traitement auteur, à partir des résultats de SIMBAD-ACV, scénario « mobilité verte »

L'enjeu de l'exposition aux NOx ne reste présent pratiquement que dans le centre, où certaines zones ont un niveau d'exposition de 4 ou 5, le niveau 6 ayant disparu de ce scénario. Cependant, seulement 8% de la population réside dans une zone de niveau 4 ou 5, contre 32% dans la situation de référence.

Le Tableau V-12 synthétise les différents scores par niveau de revenu et par localisation pour la situation de référence et le scénario « mobilité verte ». On constate en effet que le niveau d'exposition du centre est fortement amélioré. Contrairement au scénario de forme urbaine compacte qui détériorait le niveau d'exposition de la population aux NOx, la compacification mise en œuvre dans le scénario « mobilité verte » est compensée par la réduction des émissions dans le centre.

Les ménages à bas revenus restent les plus exposés aux polluants locaux, même si l'on constate que le score des ménages les plus aisés est supérieur à celui des revenus moyens du

fait de leur localisation plus centrale. Comme pour les scénarios d'évolutions démographique et économique de la partie 2, cette hausse s'explique en partie par une gentrification du centre de l'aire urbaine de Lyon.

Tableau V-12 : Comparaison des scores d'exposition aux NOx en fonction du revenu et de la localisation de la population

	Aire Urbaine de Lyon	Bas revenu	Moyen revenu	Haut revenu	Centre	Grand Lyon (hors centre)	Périphérie
Référence	2,35	2,58	2,30	2,26	4,02	1,84	0,62
Mobilité verte	1,73	1,83	1,68	1,77	2,79	1,17	0,59

Source : traitement auteur, à partir des résultats de SIMBAD-ACV, scénario « mobilité verte »

L'amélioration de l'exposition de la population aux NOx observée dans le scénario « mobilité verte » est très encourageante pour la mobilité, mais repose sur des hypothèses très volontaristes de modifications du parc automobile et de réduction des émissions de NOx des véhicules diesel. De plus, les améliorations observées pour les NOx peuvent être moins fortes pour les particules fines dont une partie importante provient des émissions directes associées à l'abrasion des freins, des pneus et de la route avec des phénomènes de remise en suspension (Figure III-20).

Conclusion de la partie 3 :

Envisager une mobilité quotidienne de demain avec des impacts environnementaux réduits nécessite d'envisager une combinaison de mesures de natures diverses. Après avoir réalisé plusieurs scénarios centrés chacun sur un levier d'action, cette partie a proposé de mettre en œuvre un scénario complet pour la mobilité quotidienne des habitants de l'aire urbaine de Lyon, intitulé scénario « mobilité verte ».

L'approche adoptée pour ce scénario est restée exploratoire et a utilisé l'ensemble des enseignements apportés par les parties précédentes. Au final, le scénario « mobilité verte » présente de nombreuses modifications majeures en matière d'aménagement du territoire, de comportements de mobilité, de réseaux de transports et de technologies de motorisation. L'approche volontariste, voire utopiste, adoptée pour ce scénario permet ainsi de quantifier un seuil d'impacts minimal en dessous duquel il sera difficile d'aller à moyen terme.

La mise en œuvre de ce scénario « mobilité verte » dans SIMBAD-ACV montre de nombreux gains environnementaux pour la mobilité quotidienne, même si les variations sont inégales entre les différents indicateurs d'ACV analysés. On remarque d'ailleurs avec la hausse de la consommation de ressources métalliques qu'il est difficile d'être gagnant sur l'ensemble du tableau. Les gains réalisés à travers ce scénario montrent aussi la difficulté, pour la mobilité quotidienne des personnes, à atteindre des objectifs nationaux de réduction d'émissions de GES, d'efficacité énergétique et d'introduction d'énergies renouvelables.

À travers les diverses analyses réalisées sur le scénario « mobilité verte », différents mécanismes contribuant au bilan environnemental ont pu être observés. Par exemple, en fonction de l'indicateur environnemental suivi, les modifications apportées sur la mobilité ont des effets variables. Pour les polluants atmosphériques (GES, $PM_{2,5}$, ozone et polluants acides), les mesures d'amélioration du parc automobile constituent le principal levier de réduction des émissions, alors que pour l'énergie primaire les gains sont obtenus uniquement par un usage du système de transports différent.

La construction d'un scénario « mobilité verte » et son évaluation environnementale ont apporté de nouveaux éléments pour le débat sur la mobilité quotidienne de demain, en montrant d'une part les efforts nécessaires pour atteindre certains objectifs à moyen terme, et d'autre part en révélant des mécanismes associés au système urbain et aux technologies utilisées.

Synthèse du chapitre V :

Après avoir montré la capacité de représentation et d'analyse de la méthode SIMBAD-ACV dans le chapitre précédent, ce chapitre a testé l'aspect prospectif de l'outil proposé dans cette thèse. En explorant des scénarios variés de mobilité quotidienne pour les habitants de l'aire urbaine de Lyon, la méthode SIMBAD-ACV a révélé un ensemble de possibilités et de limites pour l'évaluation environnementale prospective. De plus, les résultats des scénarios proposés dans ce chapitre ont contribué à enrichir certains débats autour de la mobilité de demain et ses potentiels impacts sur l'environnement.

Intérêts méthodologiques

Le cadre de l'Évaluation Environnementale Stratégique suivi pour la construction de la méthode SIMBAD-ACV apparait dans l'approche prospective développée. Ainsi, l'ensemble des alternatives considérées cherchent à explorer des horizons à moyen et long termes afin de refléter de potentielle mesures stratégiques prises au niveau de l'aire urbaine de Lyon. De plus, cette approche exploratoire permet d'estimer les impacts environnementaux associés à des orientations peu documentées ou controversées. De fait, certains scénarios portant sur des éléments spécifiques, correspondant à des projets, ne sont pas proposés dans cette démonstration, même si la méthode permettrait de les représenter (par exemple : création d'une ligne de TC ou d'un axe routier, développement du quartier d'affaire de la Part-Dieu …).

À travers la représentation du système urbain par le modèle SIMBAD et la représentation du système technologique par l'ACV, la méthode générale SIMBAD-ACV dispose de nombreux degrés de liberté et d'entrées possibles pour modéliser des alternatives variées de mobilité. Ainsi, d'un côté, des contraintes sur l'usage du sol peuvent être formulées dans SIMBAD afin de représenter de nouvelles structures urbaines. Le cadre démographique et économique est modifiable. Certains paramètres du modèle transport permettent de simuler de nouveaux comportements de mobilité et des nouveaux réseaux de transport. De l'autre côté, l'ACV ouvre la prospective vers les technologies de motorisation, notamment en modifiant les types de véhicules des parcs représentés.

L'ensemble des scénarios réalisables à partir de SIMBAD-ACV ont permis dans ce chapitre d'interroger 7 enjeux de mobilité en utilisant une méthode de modélisation et d'évaluation commune : l'aménagement du territoire, l'évolution démographique et économique, les nouvelles pratiques de mobilité, la modification des réseaux de transports, l'évolution du parc automobile, l'électrification du parc automobile et le développement des véhicules à gaz. Ainsi, les résultats de tous ces scénarios ont pu être analysés et comparés à la situation de référence.

La structure d'analyse présentée en détail dans le chapitre IV est réutilisable pour l'ensemble des scénarios évalués. Les résultats des scénarios sont donc disponibles au niveau global de l'aire urbaine de Lyon, mais aussi pour les différents éléments du système représenté (système de transport, ménages, IRIS, comportements, activités). Sans pousser les analyses de tous les scénarios à l'ensemble de ces éléments, la méthode SIMBAD-ACV met en lumière les différents mécanismes d'impacts associés à chaque scénario. Ainsi, aucune solution n'apparait comme simple et indiscutable au regard de l'ensemble des indicateurs et des échelles d'analyse disponibles.

Si l'approche prospective réalisée avec SIMBAD-ACV met sur la table de nombreux éléments de discussion sur l'élaboration d'une mobilité quotidienne bonne pour l'environnement, elle joue aussi le rôle d'auto-évaluation de la méthode en faisant apparaitre certaines limites du modèle SIMBAD et de l'ACV. Certaines équations, certains paramètres et certaines données pertinentes au moment de la construction de ces deux outils semblent à travers différents scénarios caducs ou dépassés. Ces limites, associés aux approches modélisatrices et prospectives, sont autant de perspectives pour la recherche urbaine et environnementale.

Enseignements sur les impacts environnementaux de la mobilité

La mise en œuvre de différents scénarios contrastés de mobilité quotidienne dans la méthode SIMBAD-ACV a modifié le système représenté et évalué. Les effets potentiels sur l'environnement des alternatives considérées ont ainsi pu être analysés et les conclusions non-linéaires obtenues représentent des éléments de discussion intéressants qui viennent compléter les conclusions tirées lors du chapitre précédent sur l'analyse approfondie de la situation de référence.

L'analyse globale des scénarios révèle des effets différents en fonction de l'indicateur environnemental considéré, et ceci quel que soit le scénario. Cette disproportion entre les indicateurs est légère pour une partie des scénarios, notamment si elle ne modifie pas les technologies de motorisation, et les conclusions formulées pour un indicateur sont transposables sur les autres indicateurs. En revanche, pour les scénarios d'électrification et de développement des véhicules à gaz, des transferts d'impacts se manifestent entre les indicateurs. La consommation de ressources métalliques croît fortement pour les véhicules électriques, alors que les autres indicateurs sont en baisse par rapport à la situation de référence. Les baisses observées sont d'ailleurs inégales en fonction des indicateurs considérés. Pour le développement du gaz dans les transports, une hausse des impacts par habitant est remarquable pour la consommation de métaux et d'énergies primaires.

Avec les analyses approfondies des scénarios, d'autres transferts d'impacts sont remarquables et ils concernent notamment les territoires. Par exemple, la forme urbaine compacte qui impacte globalement moins l'environnement voit le niveau d'impact environnemental des zones centrales et de ses habitants augmenter, au profit des zones périphériques qui deviennent plus sobres. Avec ce type d'analyse spatialisée, des éléments de discussion sont amenés pour débattre notamment sur la forme urbaine et l'équité territoriale.

L'évaluation d'un scénario d'amélioration des temps de déplacement en transports en commun et celle de la mise en œuvre d'une zone 30 km/h montrent toutes deux des effets localisés. Ces deux mesures, qui n'améliorent pas ou peu les impacts environnementaux au niveau global, présentent en revanche des gains significatifs pour l'exposition aux NOx en réduisant les émissions de ce polluant dans le centre. Ainsi, en approfondissant les analyses de certains scénarios, différentes interprétations peuvent être tirées interrogeant sur les objectifs

environnementaux des mesures prises. À travers la méthode d'évaluation proposée, la mise en place d'une zone 30 km/h ne présente d'intérêt que localement au niveau du centre et ne peut pas se justifier si l'objectif est de réduire les émissions de GES au niveau de l'aire urbaine.

À travers un scénario volontariste de « mobilité verte », la méthode SIMBAD-ACV a estimé un seuil d'impacts environnementaux au-dessous duquel il sera difficile de descendre à moyen terme. Les gains environnementaux potentiels de ce scénario sont importants, jusqu'à 42% de réduction pour les émissions contribuant à la formation d'ozone troposphérique, mais ces gains ne peuvent être interprétés qu'au regard des mesures importantes prises qui concernent les différents aspects de la mobilité quotidienne. De plus, ces résultats montrent la complexité pour la mobilité quotidienne d'atteindre certains objectifs environnementaux portés au niveau national et international, notamment pour les émissions de GES, l'efficacité énergétique et le développement des énergies renouvelables.

Dans cette approche prospective, l'ensemble des scénarios proposés et des choix réalisés ont été guidés par une recherche de contraste, soit pour examiner séparément les différents leviers d'action modélisables par SIMBAD-ACV, soit pour estimer un scénario de « mobilité verte » où les impacts environnementaux seraient fortement réduits. Ainsi, pour être complète, l'approche prospective réalisée aurait dû impliquer différents acteurs dans la construction d'un ou plusieurs scénarios participatifs qui représenteraient des hypothèses plus réalistes. Cependant, la démarche entreprise ici a pour but de présenter les différentes facettes d'un outil d'analyse et d'évaluation originale pour la mobilité quotidienne des personnes.

Chapitre VI : Discussion, apports, limites et perspectives

Contexte :

Tout au long de cette thèse, nous avons développé une méthode d'évaluation des impacts environnementaux associés aux déplacements quotidiens des ménages simulés par un modèle LUTI. Nous l'avons ensuite validé sur un cas de référence puis sur plusieurs scénarios afin d'analyser les impacts environnementaux de la mobilité quotidienne des personnes selon différentes hypothèses, sur l'aire urbaine de Lyon. À travers les diverses analyses menées, la méthode SIMBAD-ACV a cherché à démontrer que des outils existent et permettent de représenter et d'évaluer les impacts environnementaux de la mobilité quotidienne d'aujourd'hui et de demain en intégrant à la fois les changements pouvant affecter le système urbain ainsi que les systèmes technologiques. Une rétrospective est à présent nécessaire pour prendre du recul sur la conception de cet outil ainsi que pour synthétiser les résultats obtenus.

Objectifs du chapitre :

- Récapituler les développements méthodologiques réalisés pour répondre à la problématique de l'Évaluation Environnementale Stratégique de la mobilité quotidienne des personnes.
- Synthétiser les principaux résultats sur les impacts environnementaux obtenus pour l'aire urbaine de Lyon.
- Identifier différentes limites au travail réalisé ainsi que les perspectives de recherche qui ont émergé.

Plan du chapitre :

La première partie portera sur les apports du travail de thèse, à la fois sur la réalisation d'un outil d'ÉES de la mobilité quotidienne, ainsi que sur les différents enseignements et éléments de discussion qui en découlent pour écoconcevoir la mobilité de demain.

La seconde partie mettra en avant certaines limites identifiées lors de la réalisation du travail de thèse.

Enfin, la dernière partie ouvrira le travail sur de nouveaux questionnements et perspectives afin d'élargir l'évaluation ou de l'affiner.

Partie 1 : Apports du travail de thèse

La croissance démographique des milieux urbains est un des défis majeurs de notre siècle et la ville constituera le principal « écosystème » de l'humanité, avec près de 70% de la population mondiale habitant en ville d'ici 2050 (United Nations *et al.*, 2014). Cette quantité d'acteurs qui interagissent les uns avec les autres ainsi qu'avec l'ensemble de leur environnement technologique et naturel fait de la ville un des systèmes anthropogéniques les plus complexes qui existe, si ce n'est le plus complexe (Mirabella *et al.*, 2018), et la mobilité qui l'anime est tout aussi complexe. Ainsi, la représentation et l'évaluation de ces systèmes complexes ne peuvent pas se faire par des approches cloisonnées, traitant séparément les différents éléments de la ville et de sa mobilité.

L'évaluation des enjeux environnementaux associés à la mobilité quotidienne et urbaine a donc été traitée dans cette thèse à travers une approche intégrée et systémique de cet objet. Cette approche repose sur une interdisciplinarité autour de la problématique environnementale de la mobilité quotidienne des personnes en mettant en relation les méthodes et les savoirs de deux disciplines principalement : l'aménagement du territoire, à l'interface des comportements individuels et des modes de décision collectifs sur un territoire, et les sciences de l'environnement, qui intègrent différentes sciences physiques et naturelles.

Cette interdisciplinarité est mise au service du développement méthodologique d'une démarche quantitative d'Évaluation Environnementale Stratégique (ÉES) de la mobilité quotidienne pour divers Politiques, Plans et Programmes (PPP) tels que les PDU ou les SCoTs. À partir des différentes méthodes développées par chacune des disciplines depuis plusieurs années, une approche intégrée a été proposée dans cette thèse afin de représenter et évaluer les enjeux environnementaux associés à la mobilité quotidienne des personnes. L'élargissement aux enjeux de durabilité, avec ses aspects sociaux et économiques, nécessiterait d'autres méthodes provenant potentiellement d'autres disciplines.

Les principaux apports de cette thèse sont tournés, d'une part, sur l'intérêt méthodologique de cette approche intégrée au regard des attentes d'une ÉES de la mobilité quotidienne et urbaine, et d'autre part, sur l'intérêt didactique de ses résultats pour alimenter les débats actuels sur les enjeux environnementaux de la mobilité.

1.1. Développements méthodologiques

1.1.1. La conception et de développement de l'outil SIMBAD-ACV

La méthode générale mise en œuvre dans cette thèse repose principalement sur le **couplage d'un modèle transport-urbanisme et d'une Analyse en Cycle de Vie** qui se revendiquent tous deux comme approches systémiques : le premier par sa capacité à représenter différents sous-systèmes urbains et les interactions qui les animent (Wegener & Fürst, 2004) et le deuxième par la représentation des interactions entre la technosphère et l'environnement (Ventura, 2012). Cependant, le croisement de ces deux méthodes n'a, jusqu'à présent, jamais été entrepris afin d'évaluer les impacts environnementaux de la mobilité quotidienne des personnes.

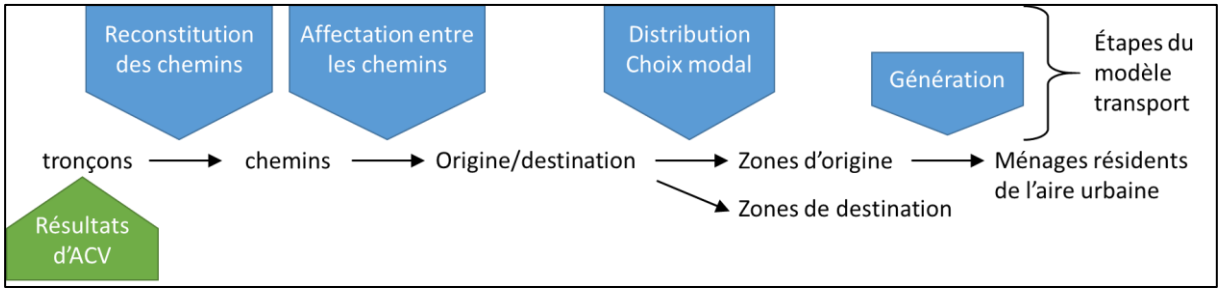
Le travail de thèse étant focalisé sur le couplage entre un modèle LUTI et une ACV, la construction du modèle LUTI et l'élaboration de la base de données environnementale n'ont pas été réalisées au cours de ce travail. Le modèle LUTI utilisé, SIMBAD, a été développé pour l'aire urbaine de Lyon dans le cadre de travaux préalables menés au Laboratoire Aménagement Économie Transports (LAET) depuis une dizaine d'années (Nicolas *et al.*, 2009) et permet de représenter la mobilité quotidienne, mais aussi résidentielle, de près de 1,8 million d'habitants. En ce qui concerne les données environnementales nécessaires à l'ACV, nous nous sommes principalement basés sur la base de données EcoInvent afin d'avoir des données de bases, que nous avons ensuite adaptées au cas lyonnais, concernant les cycles de vie des véhicules, des infrastructures et des carburants.

Afin d'évaluer les impacts environnementaux globaux, mais aussi localisés sur le territoire lyonnais, la mise en œuvre du couplage SIMBAD-ACV a nécessité le développement de deux modules supplémentaires. Le premier permet de faire le lien entre les flux de déplacements, décrit par le modèle SIMBAD, et l'utilisation de technologies de transports, nécessaires à la méthode d'ACV, en construisant des parcs de véhicules. Le deuxième module spatialise et désagrège, par le biais d'un programme R, les impacts environnementaux calculés par l'ACV au niveau des différentes zones constituant l'aire urbaine de Lyon ainsi qu'au niveau des ménages habitant ces espaces en remontant les différentes étapes de modèle SIMBAD.

La **reconstitution des parcs roulants automobiles** a été réalisée à partir de l'exploitation de l'EMD de Lyon pour 2015 afin de disposer de données locales sur les véhicules utilisés. De plus, les parcs automobiles ont été différenciés en 9 catégories de ménages croisant localisation et niveau de revenus afin de conserver la différence de motorisation existante entre les ménages. Le parc roulant de bus urbains a été reconstitué à partir des données de parc statique et des données de circulation des différentes lignes du réseau TCL de la Métropole de Lyon.

La méthode de **désagrégation des impacts environnementaux** a été développée afin de relier les résultats d'ACV calculés au niveau des tronçons du réseau avec les territoires et les ménages simulés dans le modèle LUTI. Pour cela, les opérations réalisées dans le modèle transport à quatre étapes doivent être remontées avec les informations environnementales. La Figure VI-1 représente les différentes étapes traitées par la désagrégation. Au final, cette méthode a permis de disposer d'informations environnementales représentatives pour les différents IRIS et ménages de l'aire urbaine de Lyon.

Figure VI-1 : Étapes de la désagrégation des impacts environnementaux



Source : traitement auteur

L'ensemble des données disponibles dans le couplage SIMBAD-ACV a permis d'enrichir la méthode initiale avec deux développements méthodologiques supplémentaires : dans un premier temps, l'utilisation d'un modèle d'émissions et de consommation, dont les résultats ont contribué, dans un second temps, à l'élaboration d'une méthode d'analyse de l'exposition de la population aux polluants.

La méthode d'estimation des émissions et des consommations des voitures et des bus du **modèle Copert** a été reprise dans la procédure d'évaluation sous R afin d'être systématisée pour l'ensemble des tronçons de l'aire urbaine de Lyon et les différents parcs de véhicules représentés. Plus précise que les données génériques de la base de données EcoInvent, cette

méthode permet de prendre en compte les conditions de circulation modélisées par SIMBAD ainsi que les caractéristiques des véhicules présents dans les parcs.

La **méthode d'analyse de l'exposition de la population aux NOx** localise simultanément les émissions directes de NOx (gaz d'échappement uniquement) des véhicules modélisés et les lieux de résidences de la population. À partir des données d'émissions par tronçons et la base de données topographique des bâtiments (BDTopo), les densités d'émissions de NOx et de population sont estimées pour l'ensemble de l'aire urbaine de Lyon, divisée par carreaux de 250m x 250m. Le niveau d'enjeux d'exposition est alors estimé en croisant ces deux densités qui représentent le niveau de danger (densité d'émissions de polluants) et la probabilité d'occurrence du risque (densité de population).

À travers le couplage entre l'ACV, la modélisation LUTI et les développements annexes réalisés, chacune des méthodes initiales urbaine et environnementale s'est vue enrichie de **nouvelles capacités d'analyse** :

Le spectre d'analyse de la mobilité initialement permis par le modèle LUTI SIMBAD s'est ouvert sur les technologies associées au système de transports. Ainsi, les flux de déplacements se matérialisent en indicateurs d'utilisation de matières premières et en émissions de polluants, qui seront utilisées pour réaliser l'évaluation environnementale de la mobilité quotidienne. De plus, l'évaluation du système technologique ne se restreint pas à la simple utilisation des véhicules puisque le cadre d'ACV intègre les phases de cycle de vie associées à la fabrication des véhicules, des infrastructures et des carburants. Au final, la méthode SIMBAD-ACV permet à la mobilité quotidienne d'être évaluée sur plusieurs indicateurs environnementaux représentant différents enjeux. Cet **enrichissement environnemental du modèle SIMBAD** a notamment permis de réaliser une analyse composite de la mobilité quotidienne croisant comportements de mobilité, dépense de mobilité des ménages et impacts environnementaux (Pelé *et al.*, 2018).

Conjointement, la méthode SIMBAD-ACV a offert aux ACV des systèmes de transport de nouvelles perspectives d'analyse, qui sont initialement tournées sur les technologies. Par le biais de la méthode de désagrégation, des impacts de nouveaux objets ont pu être évalués, tels que les ménages ou les territoires. Les impacts environnementaux évalués peuvent ainsi être répartis non plus seulement entre les types de technologies ou les phases du cycle de vie, mais aussi en fonction des caractéristiques des ménages, des motifs de déplacements, des comportements de mobilité et des caractéristiques des territoires. Ces **différentes clés de**

répartition permettent alors de mettre en lumière différents points critiques afin d'aider à l'écoconception du système socio-technique qu'est la mobilité quotidienne des personnes.

1.1.2. Une méthode d'analyse systémique

Les enjeux environnementaux de la mobilité sont nombreux et résultent de mécanismes d'impacts différents, tels que le réchauffement climatique associé au gaz d'échappement, le changement d'usage des sols associé à la production d'agrocarburant ou encore l'utilisation de ressources métalliques dans les véhicules. De plus, la mobilité quotidienne est au cœur du système urbain dont les enjeux sont tout aussi nombreux et complexes. Ainsi, le cadre d'analyse mis en œuvre à partir de SIMBAD-ACV a pour but d'éclairer sur les impacts environnementaux associés à la mobilité quotidienne à la fois de façon globale, mais aussi de façon approfondie en analysant ses sous-systèmes. Ainsi, l'analyse systémique repose sur les aspects **multicritères** et **multi-objets** qu'offre le couplage d'un modèle LUTI et de l'ACV.

À l'aide des entretiens réalisés auprès des acteurs du territoire et de l'état de l'art, 10 indicateurs ont été retenus pour représenter les enjeux environnementaux évalués dans cette thèse :

- Le réchauffement climatique
- La pollution atmosphérique aux particules fines (< 2,5 µm)
- La formation d'ozone troposphérique
- L'acidification terrestre
- L'utilisation de ressources métalliques
- L'usage du sol
- L'utilisation d'énergies primaires, divisée en trois :
    - Les énergies non-renouvelables (hors nucléaire)
    - Les énergies nucléaires
    - Les énergies renouvelables
- L'exposition de la population aux NOx

Via les différents objets représentés dans la méthode SIMBAD-ACV, des analyses approfondies peuvent être réalisées afin de décrire les différents enjeux associés à la mobilité quotidienne. Ainsi, une analyse du système de transport a été réalisée afin d'évaluer son efficacité, mettant en lumière l'incidence des choix technologiques et des conditions de circulation sur les résultats finaux. Ces résultats ont pu être comparés avec d'autres études environnementales et ils apparaissent cohérents au regard du cadre d'évaluation adopté (Chester *et al.*, 2010; Le Féon, 2014). La mise en relation des impacts environnementaux avec les ménages a permis de révéler des profils d'émetteurs très différents en fonction des caractéristiques socio-économiques, mais aussi en fonction des activités réalisées quotidiennement. Ces variations observées par ménages correspondent à celles observées pour d'autres paramètres dans différentes études de mobilité (CGDD, 2010; Tabaka, 2009). Cependant, l'évaluation des impacts environnementaux est rare au niveau des ménages. L'évaluation de différents territoires constituant l'aire urbaine apporte une troisième grille de lecture pour les impacts environnementaux de la mobilité. Le rôle de la forme urbaine peut ainsi être mis en avant et corroborer d'autres études urbaines sur le rôle de la forme urbaine sur la mobilité (Milakis *et al.*, 2008; Naess, 2012).

La richesse d'analyse proposée par le couplage d'un modèle LUTI et de l'ACV fournit une quantité d'informations relativement exhaustives afin d'analyser les différents enjeux associés à la mobilité et ses impacts environnementaux afférents. Ainsi, chaque acteur de territoire, avec sa propre sensibilité et sa propre lecture de cet enjeu, peut se réapproprier les résultats calculés tout en prenant conscient de l'ensemble de la modélisation et de l'évaluation réalisées.

1.1.3. Une méthode ouvrant sur la réflexion prospective

Les choix réalisés dans la construction de l'outil SIMBAD-ACV donnent la possibilité d'évaluer différents scénarios de mobilité quotidienne pour l'aire urbaine de Lyon. De plus, la nature interdisciplinaire de l'outil développé élargit le spectre des alternatives pouvant être évaluées intégrant des aspects tant technologiques que d'aménagement. Différents enjeux pour la mobilité de demain peuvent ainsi être explorés.

Le modèle LUTI SIMBAD par le biais de ses différents modules donne accès à de nombreux paramètres pour simuler différentes situations. La **localisation des acteurs dans**

l'aire urbaine peut être modifiée en intégrant de nouvelles contraintes dans le modèle d'usage du sol. Le module d'**évolution démographique** permet de faire évoluer tant la taille que la composition de la population. Au sein du modèle transport à quatre étapes, de **nouveaux comportements de mobilité** peuvent être simulés, tout comme des **variations dans le réseau de transport**.

La méthode d'ACV décrit le cadre technologique associé aux transports et l'utilisateur peut modifier ce cadre afin de représenter une situation prospective. En élargissant le cadre initial d'ACV aux véhicules électriques et aux véhicules à gaz, de **nouveaux parcs automobiles** prospectifs ont pu être modélisés et évalués. De plus, l'ensemble du cycle de vie des transports a pu être modifié, notamment afin de tester l'impact de l'**approvisionnement en énergies** sur le système global.

Sans pouvoir évaluer l'ensemble des futurs possibles pour la mobilité quotidienne de l'aire urbaine de Lyon, l'outil SIMBAD-ACV fournit un nombre remarquable et varié de leviers d'action pour l'utilisateur. Dans cette thèse, **17 scénarios exploratoires** ont été évalués en ne faisant varier qu'un seul élément à la fois. **Un scénario combiné**, regroupant les modifications de 16 paramètres différents, a aussi été réalisé pour tester, entre autre, la capacité prospective de SIMBAD-ACV.

1.1.4. L'intérêt de combiner un modèle LUTI et une ACV pour l'ÉES de la mobilité quotidienne et urbaine des personnes

L'objectif de l'outil SIMBAD-ACV est d'apporter des éléments quantitatifs pour la réalisation d'une ÉES de la mobilité quotidienne. Les choix et développements méthodologiques réalisés dans cette thèse concordent en partie avec le cadre d'ÉES sans pour autant se substituer à d'autres composantes de cette procédure d'évaluation des Plans, Politiques et Programmes (PPP). En effet, Pablo Jensen explique bien le rôle de modèles tels que celui développé ici pour l'aide à la décision : « Il vaut mieux les [les modèles sociaux] envisager comme des éléments de décision parmi d'autres, des outils contribuant aux discussions collectives » (Jensen, 2018, p. 166).

Plusieurs caractéristiques du modèle SIMBAD-ACV viennent appuyer les aspects stratégiques et d'aide à la décision inhérents à l'ÉES :

- **Son périmètre géographique** correspond à l'aire urbaine de Lyon telle que définie en 1999. En plus d'inclure différents territoires d'action lyonnais (Grand Lyon, PDU, PPA, SCoTs), l'aire urbaine de Lyon contient la majorité des flux de déplacements quotidiens de l'agglomération.
- Sa richesse d'analyse permet de **décrire finement l'état initial** de la mobilité quotidienne des personnes et ses impacts sur l'environnement. En mettant en lumière les différents points critiques du système, la méthode SIMBAD-ACV décrit les principales pressions anthropologiques exercées sur l'environnement.
- **Son approche globale et locale** élargit le registre des analyses sur un territoire complet, des zones spécifiques ou des acteurs particuliers. Cette capacité de l'outil ouvre l'analyse sur les problématiques d'équités territoriales et sociales vis-à-vis de l'environnement tant d'un point de vue de la qualité environnementale (niveau d'exposition aux polluants) qu'au niveau de la génération des émissions.
- **Son approche prospective** donne la possibilité de simuler et d'évaluer un nombre conséquent de scénarios de mobilité quotidienne. À travers cette variété d'alternatives modélisables, la méthode interroge différents enjeux associés à la mobilité de demain : l'aménagement du territoire ; les évolutions socio-économiques et de comportements, les réseaux de transport et les nouvelles technologies.

Ces différents points remarquables de l'outil SIMBAD-ACV pour l'ÉES de la mobilité quotidienne ont été illustrés à travers la diversité des scénarios envisagés, des résultats analysés et des cartes et graphiques proposés. Nous sommes cependant bien conscient du faible contenu participatif, central dans une ÉES, de cette première phase de construction de l'outil. 15 entretiens menés ont permis de guider le choix des enjeux environnementaux à évaluer mais nos résultats témoignent plus des possibilités offertes par l'outil que de la pertinence des évaluations qui nécessiteraient d'être construites de manière plus ouverte.

1.2. Discussion générale sur les enjeux environnementaux de la mobilité

La croissance démographique des villes et des zones urbaines a augmenté leur niveau de complexité et, dans le même temps, ces territoires sont devenus les plus émetteurs de GES et les plus consommateurs d'énergie. 70% des émissions de GES et deux tiers de la consommation d'énergie mondiale ont lieu dans les villes aujourd'hui (United Nations *et al.*, 2014). Cependant, les fortes concentrations des zones urbaines permettent aux actions locales d'avoir un impact sur l'environnement au niveau global : « Les villes sont à la fois le problème et la solution » (Pennequin & Mocilnikar, 2011). Au vu de la contribution importante des transports pour les différents enjeux environnementaux, l'amélioration de la mobilité quotidienne et urbaine des personnes est donc une préoccupation centrale pour aujourd'hui et demain.

Les analyses menées avec le couplage d'un modèle LUTI et d'une ACV permettent à la fois de dresser le bilan complet pour la mobilité quotidienne (ici, en l'occurrence, la mobilité des habitants d'une aire urbaine européenne, Lyon) mais aussi d'éclairer sur son avenir et ses potentiels impacts environnementaux.

Le rôle central de la voiture sur la mobilité et ses impacts transparait dans l'ensemble des analyses menées. La majorité des impacts environnementaux est due à l'utilisation de ce mode de déplacement, la contribution est d'au moins 85% pour les différents indicateurs suivis. Si les résultats environnementaux dépendent des facteurs d'émissions associés aux technologies de motorisation et aux conditions de circulation, l'usage de ce système de transport individuel se révèle fortement influant sur le bilan global à travers les distances des déplacements, les taux de remplissage des véhicules et le nombre de déplacements par jour. Ainsi, les fortes variations d'impacts environnementaux observées entre les ménages, les motifs de déplacements et les territoires sont principalement associées à des usages différenciés de la voiture.

L'ACV a permis de montrer que pour la mobilité quotidienne des personnes l**es phases indirectes associées aux transports**, fabrication des véhicules, construction des infrastructures et approvisionnement en carburants, **sont significatives**, voire conséquentes, dans les différents bilans environnementaux. En fonction du mode de transport analysé, cette répartition par phases de cycle de vie change, notamment avec un rôle majeur des infrastructures pour les impacts environnementaux associés aux transports en commun, et plus spécifiquement les modes lourds (métro, tram, train).

En focalisant l'analyse sur les ménages, **l'influence des caractéristiques socio-économiques est remarquable** sur les impacts environnementaux par habitant. Les résultats obtenus sont cohérents avec ceux recueillis par ailleurs, mais l'analyse menée permet d'estimer 9 indicateurs environnementaux différents. Ainsi, de grands écarts en termes d'impacts environnementaux séparent les différents profils de ménages. Pour les émissions de GES, un facteur d'environ 4 existe entre les faibles émissions d'une personne inactive vivant seule et les fortes émissions par personne d'un couple biactif. Cette différence résulte d'un usage contrasté de la voiture, mais aussi des activités réalisées par les ménages puisqu'une sortie de ménages pour le travail émet environ deux fois plus de GES qu'une sortie moyenne.

L'analyse des territoires de l'aire urbaine révèle aussi une grande hétérogénéité entre les niveaux d'impacts des habitants. Les habitants du centre sont en moyenne plus sobres environnementalement, du fait de déplacements plus courts réalisés plus souvent en modes actifs (vélo, marche) et en transports en commun. Les déplacements plus longs et la forte dépendance automobile associés aux territoires périphériques peu denses sont à l'origine d'importants impacts environnementaux pour ses habitants. En moyenne, les émissions de GES par personne sont 6 fois plus importantes par habitant dans les zones peu denses que dans les zones centrales denses.

Ce constat interroge directement l'aménagement du territoire en montrant le potentiel risque environnemental lié à l'étalement urbain, ainsi qu'à l'incohérence fonctionnelle de l'aire urbaine. En effet, si les habitants du centre, qui représentent 37% de la population, n'émettent que 17% des émissions de GES de l'aire urbaine de Lyon, les nombreuses activités du centre sont à l'origine de 29% de ces émissions. De plus, le fort pouvoir d'attraction de déplacements du centre ainsi que sa forte densité de population aggravent la problématique de santé humaine de cette zone, contrairement aux zones périphériques pourtant fortement dépendantes de la voiture, mais moins exposées à la pollution générée par la mobilité quotidienne.

Des effets dissociés sont aussi remarquables lors de la simulation d'alternatives. Pour certains scénarios évalués, les conclusions tirées au niveau de l'aire urbaine de Lyon diffèrent de celles obtenues à des niveaux plus fins. Par exemple, la promotion du vélo et la mise en œuvre d'une zone 30 ont des effets potentiellement plus importants dans le centre que dans le reste de l'aire urbaine. De plus, les effets des scénarios sur le niveau d'impacts environnementaux des ménages vont dépendre des caractéristiques socio-économiques de ces derniers. Par exemple, le covoiturage aura un plus faible effet sur les impacts des ménages inactifs que sur ceux des actifs.

Les conséquences des scénarios ne sont d'ailleurs pas identiques selon les indicateurs environnementaux suivis. La modification des technologies de motorisation est une source importante de transferts d'impacts, soit entre les énergies en remplaçant une filière énergétique par une autre, pas forcément plus vertueuse ou efficace, soit en créant de nouveaux besoins comme pour la consommation de ressources métalliques dans les véhicules électriques. L'intégration d'un indicateur d'exposition de la population aux NOx dans l'analyse complexifie d'autant plus l'interprétation d'un scénario puisque le calcul d'exposition ne dépend pas que du niveau d'émissions de NOx, mais aussi de la localisation de ces émissions et de la population. Ainsi, il apparait que la forme urbaine compacte augmente le niveau d'exposition de la population aux NOx, ou encore que les scénarios d'une zone à 30 km/h et de l'amélioration de temps de déplacements en TC améliorent l'exposition aux NOx malgré que la diminution de la quantité de NOx émis reste très légère au niveau global de l'aire urbaine.

Finalement, en combinant dans un scénario volontariste différentes mesures à moyen terme pour réduire fortement les impacts environnementaux associés à la mobilité quotidienne, la méthode SIMBAD-ACV met en lumière **la difficulté pour une aire urbaine telle que Lyon à atteindre certains objectifs nationaux et internationaux de réduction des impacts sur l'environnement**. Dans ce scénario, les émissions de GES par personne sont réduites de 37%, -31% pour l'aire urbaine de Lyon avec la croissance démographique. Pour atteindre certains de ces objectifs, ou encore pour respecter les seuils écologiques planétaires, d'autres politiques de réduction des impacts environnementaux doivent être envisagées ou alors des ruptures franches vis-à-vis des comportements de mobilité et des technologies de transport deviendront nécessaires.

Partie 2 : Limites du travail de thèse

Au cours de cette thèse, à travers la construction et l'utilisation de l'outil SIMBAD-ACV pour évaluer les impacts environnementaux de la mobilité quotidienne des personnes, plusieurs limites ont émergé dont il faut avoir conscience lors de l'interprétation des résultats.

Chacun des deux outils principaux utilisés, le modèle SIMBAD et l'ACV, possède ses propres limites d'application. Tous deux reposent sur d'importantes collectes de données nécessaires à la construction de la base de données environnementale et à l'élaboration et au calibrage du modèle. **Le recueil de données** représente donc pour ces outils une phase importante, nécessitant des ressources humaines et financières importantes, limitant ainsi la capacité pour les organismes et les laboratoires de mettre à jour leurs outils. Certaines données de la base EcoInvent semblent donc dépassées, surtout au vu de certaines évolutions technologiques récentes, et le modèle SIMBAD gagnerait en opérationnalité et en actualité en intégrant notamment les données de la dernière Enquête Ménages Déplacements de Lyon de 2015, au lieu de celle de 2006, sur laquelle il est calibré.

Du fait de cette problématique de mise à jour inhérente aux outils, des incertitudes sont présentes dans la méthode SIMBAD-ACV et dans ses différents résultats. Cependant, faute de temps disponible, **aucun calcul d'incertitudes n'a été entrepris** dans cette thèse afin d'estimer un degré de confiance des différents modèles utilisés. Néanmoins, la majeure partie des analyses réalisées a été obtenue par analyse comparative, soit par rapport à la situation de référence, soit en ayant recours à des typologies, utilisant ainsi la même méthode. De cette façon, la hiérarchie entre les scénarios et au sein des typologies demeure pertinente. Nonobstant, l'approche par scénarios, réalisée « toutes choses égales par ailleurs », permet d'estimer la sensibilité du modèle SIMBAD-ACV pour différents paramètres et ainsi éclairer sur les paramètres à privilégier pour améliorer la précision des résultats du modèle. La réalisation de calculs d'incertitudes et de sensibilité supplémentaires, par exemple par simulation de Monte-Carlo, présente un challenge pour la méthode SIMBAD-ACV au regard du temps d'exécution associé. En effet, en dehors des nombreuses extractions nécessaires (chaque scénario représente environ 17 Go), **la méthode globale nécessite environ 25h de calcul**, 23h pour la modélisation SIMBAD et 2h pour le calcul environnemental et la désagrégation jusqu'aux ménages.

Une limite importante du travail réside dans le **choix du périmètre d'étude réalisée**. Par définition d'une aire urbaine liée aux déplacements domicile-travail entre les communes, le périmètre de l'aire urbaine de Lyon évolue continûment. Sa dernière estimation par l'INSEE date de 2010 alors que ce travail de thèse considère le périmètre tel que défini en 1999. Ce choix réduit la surface du terrain d'étude de moitié environ, même si 83% de la population de l'aire urbaine de Lyon de 2010 réside au sein du périmètre de 1999 (Tableau III-1). En plus d'être réduit, ce périmètre reste constant, quel que soit le scénario prospectif considéré. Or les scénarios modifiant la taille de la population et la structure urbaine auront une influence différente avec les zones extérieures, légitimant, éventuellement, l'intérêt d'une reconsidération du périmètre.

Si la portée spatiale associée à l'outil SIMBAD-ACV conditionne les résultats et les conclusions, la résolution spatiale conditionne quant à elle le niveau de désagrégation possible ainsi que la finesse de modélisation. Ainsi, l'utilisation des IRIS comme unités spatiales fournit une image spatiale précise dans le centre urbain où les IRIS sont de petites tailles contrairement à la périphérie où les IRIS sont étendus. **Cette résolution spatiale**, pourtant très fine par rapport à d'autres modèles LUTI (Jones, 2016), **ne permet cependant pas de modéliser certains aménagements du territoire** tels que le développement des quartiers de gares ou le réaménagement le long d'axes de transports, comme par exemple le long des voies de tramways.

D'autres limites associées à la finesse du modèle choisi sont présentes, notamment sur la représentation des flux de déplacements, qui est centrale dans l'outil SIMBAD-ACV. Le modèle SIMBAD estime, pour l'ensemble des tronçons de l'aire urbaine de Lyon, la vitesse de circulation moyenne pour deux heures représentatives de la journée (heure pleine et heure creuse). Ce choix permet d'utiliser le modèle d'émissions Copert qui fonctionne avec des vitesses moyennes. Cependant, **ce choix ne permet pas de prendre en considération les aspects dynamiques de la circulation**, avec les accélérations et les freinages des véhicules qui ont un impact sur leurs émissions et leurs consommations de carburants. Une description aussi fine de la circulation serait possible en utilisant d'autres logiciels d'affectation du trafic, mais les temps de calcul et les ressources numériques nécessaires seraient encore plus importants. De plus, l'utilisation de modèles d'émissions plus fins tels que HBEFA ou PHEM serait appropriée uniquement si l'évaluation environnementale avait des objectifs principalement locaux (Fallah Shorshani, 2014), ce qui n'était pas le cas de l'outil SIMBAD-ACV.

L'approche prospective réalisée dans cette thèse fait apparaitre un certain nombre de possibilités de simulations pour la mobilité quotidienne. Cependant, elle permet aussi de révéler l'ensemble des alternatives que SIMBAD-ACV ne permet pas simuler.

Le caractère innovant de certaines technologies constitue une barrière afin de représenter les systèmes de transports par la méthode d'ACV. Les bases de données étant tributaires des études menées par différentes équipes, l'intégration de technologies telles que les véhicules hydrogènes ou autonomes nécessiterait donc de conduire en parallèle la collecte de données pour constituer l'inventaire de cycle de vie. Cette limite est aussi présente pour les transports en commun dont le matériel roulant présente souvent un caractère unique (par exemple, les lignes de métro de Lyon possèdent plusieurs modèles de rames différents).

Le modèle SIMBAD distingue trois modes de transports et repose sur la représentation de sorties de domicile, et non des déplacements. Ces choix limitent **la modélisation d'intermodalité**, par exemple l'utilisation de la voiture puis du train pour un même déplacement. Or, le développement de nouveaux services de mobilité facilite cette intermodalité, notamment avec les vélos et voitures en libre-service, les services de mobilité à la demande (type Uber) ou les applications multimodales permettant de combiner les modes. Le développement de la pratique du vélo et du réseau associé interroge aussi la capacité du modèle à représenter correctement ce mode et nécessiterait peut-être de le différencier de la marche à pied. En tout cas, les évolutions en cours appellent à des développements dans ce sens au sein du modèle.

La construction du modèle S**IMBAD ne permet pas de simuler des politiques de limitation du stationnement,** en termes de places disponibles ou de tarif, puisque la problématique de stationnement est rapportée à la densité de la zone dans le modèle. Ainsi, le rôle du parking à domicile ou à destination ne peut pas être analysé. Cette problématique est d'autant plus importante dans l'approche prospective, que les véhicules électriques se développent et qu'ils nécessitent en plus la disponibilité d'une borne de recharge.

La mise en œuvre de mesures économiques sur la mobilité quotidienne fait partie des alternatives qui n'ont pas fait l'objet d'un scénario dans cette thèse. En modifiant les coûts des déplacements, à travers notamment la taxe carbone ou les péages, ou en subventionnant le transport en commun ou le covoiturage, la mobilité quotidienne et le système urbain peuvent être modifiés. Si certains modèles LUTI permettent d'implémenter certaines de ces mesures, le modèle SIMBAD nécessiterait des développements supplémentaires pour le réaliser de manière directe. Cependant, dans une logique de coût généralisé (incluant le prix et

le temps), certaines mesures économiques seraient comparables à des mesures de ralentissement (ou d'accélération) comme dans les scénarios de zone 30 km/h ou d'amélioration des temps de déplacements en TC qui ont été évalués.

Enfin, l'outil **SIMBAD-ACV se focalise principalement sur les ménages**. Or l'analyse des impacts environnementaux en fonction soit du lieu de résidence, soit du lieu d'activité, révèle un écart significatif, interrogeant sur le rôle des établissements et de leur localisation. Une méthode d'évaluation axée sur les établissements et les entreprises permettrait surement de faire le lien entre les impacts environnementaux et leurs paramètres, que ce soit sur la politique de mobilité menée par l'établissement avec notamment les Plans de Déplacements d'Entreprise (PDE), qui ont pour but de promouvoir le covoiturage, le télétravail ou encore l'utilisation de TC, ou en termes d'horaire de travail et de type d'activité.

Si l'outil développé dans cette thèse est principalement axé sur les ménages, l'utilisation d'**un modèle LUTI développé au niveau des individus aurait permis d'élargir à d'autres analyses**. Au niveau des individus, de nouvelles caractéristiques sont disponibles donnant ainsi la possibilité d'analyser l'influence sur l'environnement de variables telles que la possession du permis, le genre, le niveau d'éducation, la catégorie socio-professionnelle. Le niveau individuel peut aussi permettre d'introduire d'autres caractéristiques socio-psychologiques afin de décrire par exemple le niveau d'expérience vis-à-vis de certains modes, le style de vie, les habitudes (De Witte *et al.*, 2013). Ce niveau de finesse peut apporter de nouveaux éléments de discussion sur la mobilité quotidienne des personnes, cependant sa modélisation dans un modèle urbain est un défi au même titre que la désagrégation des impacts environnementaux pour l'ensemble des individus.

Partie 3 : Perspectives

Ce travail de thèse a conduit à différents développements originaux, et débouche sur un certain nombre de résultats pertinents. Dans le même temps, de nouveaux questionnements ont émergé autour de la problématique de l'évaluation environnementale de la mobilité quotidienne et urbaine, dont certaines pourraient faire l'objet de prolongements.

Une partie des prolongements proposés constitue les étapes finales afin de valider complètement l'élaboration d'une méthode d'évaluation couplant un modèle LUTI et une ACV.

Dans un premier temps, la mise en **application de l'outil SIMBAD-ACV auprès des différents acteurs du territoire** constituerait la phase ultime de la conception de cette méthode afin de la légitimer. La participation des acteurs permettrait la construction à la fois de scénarios prospectifs plus réalistes, répondant à des attentes précises, ainsi que d'une grille d'évaluation combinant différents indicateurs environnementaux évalués. La confrontation de l'outil avec des utilisateurs serait aussi l'occasion d'entreprendre un processus d'amélioration de la méthode de façon incrémentale en intégrant progressivement les retours des utilisateurs.

Le cadre territorial de la méthode SIMBAD-ACV, l'aire urbaine de Lyon, fournit l'ensemble des éléments nécessaires à la mise en œuvre d'un tel couplage, avec la préexistence d'un modèle LUTI et la disponibilité de différentes enquêtes de mobilité. Cependant, afin de démontrer l'aspect générique du couplage entre un modèle LUTI et une ACV pour l'évaluation environnementale de la mobilité quotidienne, d'autres terrains d'application devraient être trouvés, qu'ils s'agissent d'autres aires urbaines ou de territoires plus grands comme les Régions. Si les bases de données environnementales peuvent être en partie réutilisées d'un terrain à l'autre, la présence ou l'élaboration d'un modèle LUTI est une condition forte pour **la transposition de la méthode développée dans cette thèse à d'autres territoires**.

Trois perspectives pour affiner les analyses de l'outil SIMBAD-ACV sont avancées ici.

Le couplage entre le modèle SIMBAD et l'ACV est principalement monodirectionnel puisque les niveaux d'impacts environnementaux des territoires et des ménages, ainsi que le niveau d'exposition n'influencent pas sur les choix de localisation ou de déplacements. **L'intégration d'une rétroaction environnementale** au sein d'un modèle transport-urbanisme

est complexe, mais a déjà fait l'objet de travaux, notamment avec le modèle ILUMASS. La construction d'un modèle LTE (Land-use, Transport and Environment) repose sur une description spatialement fine des impacts environnementaux ainsi que sur la connaissance de l'influence de ces impacts sur la localisation des ménages et des entreprises (Lautso *et al.*, 2004; Wagner & Wegener, 2007).

La méthode SIMBAD-ACV évalue uniquement les impacts associés à la mobilité des personnes. Or la **mobilité de marchandises et la logistique urbaine** sont prises en compte dans le modèle SIMBAD. Les véhicules utilitaires et les camions représentent environ 10 fois moins de flux dans l'aire urbaine de Lyon que ceux des habitants, mais leurs facteurs d'émissions et de consommations sont supérieurs, voire très supérieurs, aux véhicules personnels. En intégrant les marchandises dans l'analyse environnementale, de nouveaux systèmes de transports devront être représentés dans l'ACV et des parcs de véhicules de livraison devront être reconstitués. De plus, l'analyse de la logistique interroge sur les caractéristiques des activités et des établissements, tant par rapport aux lieux de départ des livraisons que par rapport aux lieux de livraison.

Enfin, la **méthode d'évaluation de l'exposition aux NOx de la population est perfectible** puisque aucun phénomène de dispersion ou de transformation n'est considéré pour la pollution locale dans SIMBAD-ACV. La modélisation de ces phénomènes est possible en utilisant des modèles spécifiques de mécanique des flux. Cependant, la géométrie complexe des zones urbaines avec de nombreux bâtiments nécessite des modèles lourds pour être précise. En plus d'allonger le temps de calcul de la méthode d'évaluation, l'ajout d'un module de dispersion des polluants implique de recueillir des données supplémentaires sur la topographie du terrain d'étude et la pollution de fond notamment (Fallah Shorshani, 2014). En parallèle de ce travail de modélisation des flux des polluants locaux, la localisation de la population au cours de la journée devrait aussi être améliorée, car la méthode proposée dans cette thèse considère uniquement le lieu de résidence.

En appliquant une ACV à la mobilité quotidienne des personnes, de nouvelles réflexions ont émergé à propos de l'évaluation environnementale appliquée à un système socio-technique.

Tout d'abord, l'outil SIMBAD-ACV ne permet pas de juger de l'importance d'un enjeu par rapport aux autres. En effet, **aucun des résultats environnementaux n'est normalisé**,

c'est-à-dire rapporté à des valeurs de référence associées à chaque indicateur, limitant, de fait, la comparaison entre les indicateurs. Cependant, définir et choisir l'ensemble des valeurs de normalisation est complexe du fait des temporalités et des spécificités locales ou régionales de chaque enjeu (Finnveden et al., 2009). De plus, les valeurs de normalisation retenues dépendent des objectifs de l'évaluation. Par exemple certaines études normalisent leurs résultats à partir des valeurs nationales d'émissions, comme l'empreinte carbone moyenne d'un Français pour l'année 2012 (soit 10,5t CO_2-eq par personne (SOeS - MEEM, 2016)), alors que certains auteurs privilégient l'utilisation des seuils écologiques planétaires afin de replacer les résultats dans un contexte de durabilité forte où l'ensemble des écosystèmes seraient préservés (soit 985 kg CO_2-eq par personne pour respecter le seuil des 2°C) (Bjørn & Hauschild, 2015).

À travers l'outil SIMBAD-ACV, les impacts environnementaux associés à la mobilité quotidienne des personnes sont évalués et la localisation du lieu de résidence des ménages est connue dans l'aire urbaine de Lyon. Au-delà de la différence de mobilité en fonction du lieu de résidence des ménages, les émissions associées au logement dépendantes également du type de logement, de sa surface et de la source d'énergie de chauffage, eux même influencés par la zone de résidence (Clément & Rolland, 2017). De plus, le secteur résidentiel représente une part importante des émissions de GES en France, 12% en 2013 (SOeS - MEEM, 2016). Ainsi, l'utilisation d'un modèle d'usage du sol peut constituer une étape pour **l'évaluation environnementale des logements**, permettant d'évaluer simultanément les impacts de la mobilité quotidienne des ménages et ceux associés à leur logement. L'analyse de ces deux éléments contribuerait à une meilleure compréhension des impacts environnementaux associés aux modes de vie des ménages, se rapprochant ainsi d'autres problématiques de recherche telle que la vulnérabilité énergétique des ménages qui s'intéresse aux dépenses énergétiques associées aux transports et aux logements (Maresca & Dujin, 2014).

L'analyse environnementale de la mobilité à partir des cycles de vie des transports a révélé la place importante des phases indirectes associées aux véhicules, aux carburants et aux infrastructures. La logique de cycle de vie peut être aussi utilisée aux deux autres piliers du développement durable, l'économie et le social, à travers une **Analyse des Coûts du Cycle de Vie (ACCV) et une Analyse Sociale du Cycle de Vie (ASCV)**. Associées à l'ACV environnementale, ces deux analyses constituent **l'Analyse de la Durabilité du Cycle de Vie (ADCV) de la mobilité quotidienne**. L'analyse des budgets de mobilité des ménages, qui a

déjà fait l'objet de travaux, peut constituer une partie de l'analyse économique (Pelé, 2018; Vanco, 2011). Cependant, pour de l'approche soit complète, les coûts portés par les collectivités et les entreprises devraient être intégrés à l'analyse, de même que les retombées économiques, en termes d'emplois par exemple, pour les filières de l'automobile, de l'énergie et de la construction d'infrastructure notamment. L'ASCV permettrait de considérer les conséquences sociales pour les différents acteurs impliqués tout au long du cycle de vie de la mobilité à travers les impacts sur les droits de l'Homme, la santé, la gouvernance, les conditions de travail, les incidences socio-économiques et l'héritage culturel. La mise en œuvre d'une telle ADCV pour la mobilité quotidienne apparait ainsi extrêmement complexe puisqu'elle mobilise de nombreux secteurs économiques et filières industrielles (transports, automobile, énergie, construction, assurance …), de nombreuses disciplines avec des interrelations multiples entre les différentes composantes étudiées.

Conclusion générale :

Le secteur des transports représente un challenge de taille pour la protection de l'environnement en raison de la grande diversité d'enjeux environnementaux concernés et de la forte contribution de ce secteur pour certains d'entre eux. Il constitue la première source d'émissions de gaz à effet de serre (GES) en France avec un tiers des émissions en 2015 et un niveau d'émission encore supérieur à celui de 1990. Les transports, et plus particulièrement les transports routiers, sont aussi à l'origine d'une partie des problèmes de qualité de l'air et de santé humaine, notamment du fait de leurs émissions d'oxydes d'azotes (NOx) et de particules fines. En plus de ces deux enjeux au cœur des débats environnementaux pour les transports, ces derniers suscitent aussi d'autres problématiques environnementales, telles que l'utilisation de ressources naturelles (ressources énergétiques ou métalliques), l'occupation du sol ou encore la dégradation des milieux naturels.

Si les transports sont à l'origine d'externalités environnementales, ils sont aussi intimement liés à la mobilité des personnes et des marchandises qui contribuent au fonctionnement général de la société. La notion de mobilité ne se limite donc pas à la seule utilisation des transports, mais renvoie aux individus et à l'inscription spatiale de leur mode de vie ainsi qu'aux territoires et aux interactions sociales et économiques qu'elle permet. L'étude de la mobilité interroge et croise donc des domaines scientifiques comme la sociologie, l'économie et la géographie. Dans cette thèse, la mobilité quotidienne des personnes a été définie comme l'ensemble des déplacements liés aux activités habituelles des individus et réalisés au sein d'une agglomération et de son territoire d'influence. Cette mobilité se trouve alors en interaction avec les différents acteurs du système urbain, caractérisés notamment par leurs caractéristiques socio-économiques et leurs localisations.

L'évaluation environnementale de la mobilité quotidienne s'est développée, dans un premier temps à travers l'évaluation des projets de transports, plus récemment avec la mise en place de Plans de Déplacements Urbains (PDU) et, plus largement, avec l'intégration des problématiques de transports et de mobilité dans les différents documents de planifications territoriales. Le dispositif d'Évaluation Environnementale Stratégique fournit le cadre pour l'analyse des incidences environnementales des Politiques, Plans et Programmes (PPP). Cependant, pour la mobilité quotidienne, un manque d'outils quantitatifs est remarquable pour l'évaluation environnementale des différentes mesures et actions des PPP, surtout au regard de la diversité des mesures qui peuvent être prises modifiant tant l'aménagement du territoire, les

comportements de mobilité, les technologies de transports. La problématique de cette thèse a donc cherché à répondre à certaines des carences de l'évaluation environnementale de la mobilité quotidienne des personnes. *Comment représenter à un niveau stratégique la mobilité quotidienne de personnes et ses enjeux environnementaux en prenant en compte simultanément les dynamiques du système urbain et du cadre technologique des transports ?*

Pour répondre à cette problématique, une méthode d'évaluation environnementale a été proposée et ses aspects systémiques, multicritères et prospectifs ont été analysés afin de juger de sa pertinence. Dans le but de représenter la mobilité quotidienne des personnes en incluant simultanément les caractéristiques du système urbain et celles du système technologique, deux approches déjà existantes ont été couplées : la modélisation transport-urbanisme (ou modèle LUTI) et l'Analyse en Cycle de Vie (ACV). La première a permis de représenter la mobilité quotidienne à partir des interactions qui ont lieu entre l'usage du sol et les réseaux de transport. L'ACV a permis de décrire l'ensemble des technologies impliquées dans le système de transport de personnes et d'évaluer leurs impacts environnementaux. Les voitures et les transports en commun ont été considérés avec l'ensemble des processus associés à la fabrication des véhicules, leur utilisation, l'approvisionnement en carburants et la construction des infrastructures nécessaires à leur fonctionnement.

La construction d'un modèle LUTI représente un travail important, tant pour sa construction que pour la collecte de données en amont. Dans cette thèse, le modèle SIMBAD conçu au sein du Laboratoire Aménagement Économie Transports (LAET) pour l'aire urbaine de Lyon a été utilisé. Ce modèle représente l'ensemble des ménages et des établissements de l'aire urbaine et détermine les flux de déplacements qui ont lieu au sein du territoire en fonction de trois modes : la voiture, le transport en commun et les modes doux. Les données environnementales de l'ACV ont également été, pour la majorité, récupérées par ailleurs par le biais de bases de données et du modèle d'émissions Copert. Le couplage des deux outils a nécessité de représenter différents parcs de véhicules, pour les TC et les voitures, afin de traduire les flux de déplacements du modèle SIMBAD en utilisation de technologies. De plus, les impacts environnementaux calculés par l'ACV ont pu être rapportés aux différents ménages et différentes zones de l'aire urbaine de Lyon par le biais d'une méthode de désagrégation développée dans cette thèse.

La mise en œuvre de cette méthode d'évaluation permet d'estimer 9 indicateurs d'impacts différents abordant les problématiques de climat, de pollutions atmosphériques et de ressources. Un dixième indicateur a été ajouté afin de représenter l'exposition de la population aux

émissions de NOx générées par la mobilité quotidienne, en spatialisant la population et les émissions directes de NOx. Le bilan carbone de la mobilité quotidienne des habitants de l'aire urbaine de Lyon s'élève à 3,22 kg de CO_2-eq par habitant et par jour ouvrés pour la situation de référence que nous avons étudiée (basée sur la mobilité de 2009 et les parcs de véhicules de 2015). Cette valeur est comparable à celle publiée dans d'autres études environnementales, même si le terrain d'étude et l'inclusion de l'ensemble du cycle de vie des transports alourdissent le bilan carbone total. L'analyse multicritères estime, en autre, la consommation d'énergie primaire à 17,1 kWh par habitant et par jour, les émissions de particules fines à 1,8 g de $PM_{2,5}$-eq par habitant et par jour, ainsi qu'une occupation du sol de 79 m² par an et par habitant. Si les gaz d'échappement représentent la phase la plus émettrice de GES (55%), la contribution des autres phases d'impacts s'avère très importante, de l'ordre de 56% à 100% pour les autres indicateurs, soulignant l'intérêt de l'usage d'une ACV pour évaluer les impacts environnementaux des systèmes de transport et des mobilités afférentes.

L'ensemble des caractérisations par ménages, par territoires, par motifs et par comportements, permises par l'utilisation du modèle SIMBAD, apporte de nouvelles possibilités d'analyse pour les impacts environnementaux de la mobilité. Les importantes différences observées au sein de chaque subdivision sont révélatrices d'une utilisation très hétérogène du système de transport, avec des parts modales, des distances, des taux de remplissages inégaux. En croisant les caractéristiques des ménages et les densités des zones de résidence dans une typologie, il apparait un facteur de près de 18 entre les émissions de GES par habitant pour les ménages les plus sobres et les plus émetteurs. À travers l'analyse des impacts environnementaux par subdivision, différents points clés de la mobilité sont mis en lumière sur lesquels des mesures d'amélioration pourraient être réalisées en ciblant des territoires, des ménages et des activités spécifiques.

La méthode SIMBAD-ACV offre la possibilité de simuler différentes orientations pour la mobilité quotidienne des personnes en introduisant de nouvelles contraintes et de nouveaux paramètres dans le modèle LUTI et dans l'ACV. Afin d'illustrer cette capacité d'analyse prospective, 4 grandes familles de scénarios contrastés ont été évaluées, modifiant différents paramètres de la mobilité et des modes de transport à travers lesquels elle se réalise : la taille et la localisation de la population, les comportements de mobilité, le réseau de transport et les technologies des véhicules. Les résultats ont permis d'estimer les impacts potentiels de chaque scénario sur l'ensemble des enjeux évalués tout en renseignant sur les mécanismes contribuant à ces impacts. De plus, les différentes échelles d'analyse disponibles (aire urbaine, zones,

ménage) apportent des éléments de discussion supplémentaires, notamment sur les inégalités environnementales entre les territoires et les ménages associées aux scénarios.

Après avoir simulé et évalué 17 scénarios, représentant chacun la variation d'un paramètre, un scénario rassemblant plusieurs mesures a été construit et évalué. Le but de ce scénario était d'illustrer la capacité de simulation de la méthode développée ainsi que d'estimer le niveau d'impacts environnementaux minimum qui peut être atteint à moyen terme. Construit à partir des conclusions tirées des analyses précédentes, le scénario volontariste de « mobilité verte » a révélé d'importants gains environnementaux potentiels pour la mobilité quotidienne des personnes. Cependant, au regard des importantes modifications simulées et des objectifs élevés de réduction formulés pour certains indicateurs, les GES et les énergies par exemple, les résultats du scénario « mobilité verte » viennent soutenir la nécessité d'actions fortes et de ruptures majeures alliant les technologies, les comportements et l'aménagement du territoire.

Bibliographie :

ACHARYA, S. R. & MORICHI, S., (2007), Motorization and role of mass rapid transit in East Asian Megacities, *IATSS research*, vol. 31, n°2, p. 6–16.

ACHEAMPONG, R. A. & SILVA, E., (2015), Land use–transport interaction modeling: A review of the literature and future research directions, *Journal of Transport and Land Use*.

ADEME, (2010), *Analyses de Cycle de Vie appliquées aux biocarburants de première génération consommés en France*.

ADEME, (2013), *Elaboration selon les principes des ACV des bilans énergétiques, des émissions de gaz à effet de serre et des autres impacts environnementaux induits par l'ensemble des filières de véhicules électriques et de véhicules thermiques, VP de segment B (citadine polyvalente) et VUL à l'horizon 2012 et 2020*.

AFTABUZZAMAN, M. & MAZLOUMI, E., (2011), Achieving sustainable urban transport mobility in post peak oil era, *Transport Policy*, vol. 18, n°5, p. 695-702.

AGENCE D'URBANISME POUR LE DEVELOPPEMENT DE L'AGGLOMERATION LYONNAISE, (2011), *Aire urbaine 2010 : Aire métropolitaine lyonnaise*.

AGENCES D'URBANISME LYON & SAINT-ETIENNE, (2015), *Dynamiques de métropolisation*.

AGUILERA, A., MADRE, J.-L. & MIGNOT, D., (2004), Métropolisation, formes urbaines et mobilité. Présentation du dossier, In : *Les cahiers scientifiques du transport*, p. 5-14.

AGUILERA, A. & MIGNOT, D., (2007), Formes urbaines et migrations alternantes. Les enseignements d'une comparaison des aires urbaines de Lille, Lyon et Marseille.Présenté à ASRDLF. Les dynamiques territoriales : Débats et enjeux entre les différentes approches disciplinaires - XLIIIè Colloque de l'ASRDLF, 11, 12 et 13 juillet 2007, , Grenoble/Chambéry, France.

AISSANI, L., COLLET, A. & BELINE, F., (2013), Détermination de l'intérêt environnemental via l'analyse du cycle de vie du traitement des effluents organiques par méthanisation au regard des contraintes territoriales, *Sciences Eaux & Territoires*, vol. Numéro 12, n°3, p. 78-85.

AISSAOUI, H., (2016), *Choix de localisation résidentielle des ménages en milieu urbain: les apports récents des modèles de choix discrets en présence d'un nombre élevé d'alternatives* (Economies et finances), Université de Lyon.

AMPASEL, (2011), *Modélisation urbaine de la pollution atmosphérique de l'agglomération stéphanoise - Evaluation du PPA*.

AMPT, E., (2003), Understanding voluntary travel behaviour change, *Association for European transport*.

ANDRÉ, M., (2004), The ARTEMIS European driving cycles for measuring car pollutant emissions, *Science of The Total Environment*, vol. 334-335, p. 73-84.

ANDRE, M., (2015), Évaluation environnementale et contribution des transports, cas des plans de déplacements urbains, *Rech. Transp. Secur.*, vol. 2015, n°02, p. 95-96.

ANDRÉ, M., JOUMARD, R., VIDON, R., TASSEL, P. & PERRET, P., (2006), Real-world European driving cycles, for measuring pollutant emissions from high- and low-powered cars, *Atmospheric Environment*, vol. 40, n°31, p. 5944-5953.

ANDRE, M., ROCHE, A.-L. & BOURCIER, L., (2013), *Statistiques de parcs et trafic pour le calcul des émissions de polluants des transports routiers en France*, ADEME, 130 p.

ANDRE, P., DELISLE, C. E. & REVERET, J.-P., (2010), *L'évaluation des impacts sur l'environnement processus, acteurs et pratique pour un développement durable*, Presses internationales polytechnique, Mont-Royal (Québec).

ANTONI, J.-P., (2012), *Présentation générale du modèle MobiSim*, Laboratoire ThéMA - Universités de Bourgogne et de Franche-Comté, 12 p.

ANTONI, J.-P., BONIN, O., FRANKHAUSER, P., HOUOT, H., NICOLAS, J.-P., THIERRY, C., … VUIDEL, G., (2015), *VILMODes : Ville et mobilités durables : Evaluation par la simulation*, PREDIT.

APPERT, M., (2004), Métropolisation, mobilités quotidiennes et forme urbaine: le cas de Londres, *Géocarrefour*, vol. 79, n°2, p. 109–118.

ARAFER, (2018), *L'Observatoire des transports et de la mobilité : Le marché français du transport ferroviaire de voyageurs 2015-2016*, autorité de régulation des activités ferroviaires et routières.

ATMO AUVERGNE-RHONE-ALPES, (2014), *Calage des modèles d'aérologie sur le sillon alpin*.

ATMO AUVERGNE-RHONE-ALPES, (2017a), *Bilan Qualité de l'Air 2016 - Région Auvergne-Rhône-Alpes*.

ATMO AUVERGNE-RHONE-ALPES, (2017b), *Méthode d'élaboration de l'inventaire des émissions atmosphériques*.

AUGE, M., (2008), *Eloge de la bicyclette*, Payot, Paris, 93 p.

AUGE, M., (2009), *Pour une anthropologie de la mobilité*, Payot, Paris, 90 p.

AZAPAGIC, A., PETTIT, C. & SINCLAIR, P., (2007), A life cycle methodology for mapping the flows of pollutants in the urban environment, *Clean Technologies and Environmental Policy*, vol. 9, n°3, p. 199-214.

BADIN, F., (2013), *Hybrid Vehicles: From Components to System*, Editions TECHNIP, 526 p.

BAILLY, J.-P. & HEURGON, E., (2001), *Nouveaux rythmes urbains : quels transports ? Rapport du Conseil national des transports*, Editions de l'Aube, 222 p.

BANISTER, D., (2008), The sustainable mobility paradigm, *Transport Policy*, vol. 15, n°2, p. 73-80.

BANISTER, D., (2012), Viewpoint: Assessing the reality—Transport and land use planning to achieve sustainability, *Journal of Transport and Land Use*, vol. 5, n°3, .

BARAUD-SERFATY, I., (2011), La nouvelle privatisation des villes, *Esprit*, vol. Mars/avril, n°3, p. 149.

BAUER, C., HOFER, J., ALTHAUS, H.-J., DEL DUCE, A. & SIMONS, A., (2015), The environmental performance of current and future passenger vehicles: Life cycle assessment based on a novel scenario analysis framework, *Applied Energy*, vol. 157, p. 871-883.

BEELEN, R., RAASCHOU-NIELSEN, O., STAFOGGIA, M., ANDERSEN, Z. J., WEINMAYR, G., HOFFMANN, B., … HOEK, G., (2014), Effects of long-term exposure to air pollution on natural-cause mortality: an analysis of 22 European cohorts within the multicentre ESCAPE project, *The Lancet*, vol. 383, n°9919, p. 785-795.

BENETTO, E., (2005), Analyse du cycle de vie - Réalisation de l'inventaire, *Techniques de l'Ingénieur*, n°G5510, p. 22.

BERGER, G., (1957), Sciences humaines et prévision, *Revue des Deux Mondes (1829-1971)*, p. 417-426.

BERGER, G., (1959), L'attitude prospective, In : *De la prospective*, Berger G., Bourbon-Busset J. de, Massé P. (2007).

BICALHO, T., (2013), *Les limites de l'ACV. Etude de la soutenabilité d'un biodiesel issu de l'huile de palme brésilienne* (Université Paris Dauphine-Paris IX).

BICER, Y. & DINCER, I., (2017), Comparative life cycle assessment of hydrogen, methanol and electric vehicles from well to wheel, *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 42, n°6, p. 3767-3777.

BIRRAUX, C., (2002), L'office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques : le politique et l'expertise scientifique, *Revue française d'administration publique*, vol. 103, n°3, p. 391.

BJØRN, A. & HAUSCHILD, M. Z., (2015), Introducing carrying capacity-based normalisation in LCA: framework and development of references at midpoint level, *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 20, n°7, p. 1005-1018.

BJØRN, A., MARGNI, M., ROY, P.-O., BULLE, C. & HAUSCHILD, M. Z., (2016), A proposal to measure absolute environmental sustainability in life cycle assessment, *Ecological Indicators*, vol. 63, p. 1-13.

BONICCO-DONATO, C., (2018), Cadres théoriques et sciences humaines : quelles leçons épistémologiques pour l'aménagement et l'urbanisme ?, *Revue européenne des sciences sociales*, n°56-1, p. 181-201.

BONNAFOUS, A. & PUEL, H., (1983), *Physionomies de la ville*, Éditions ouvrières, 165 p. p.

BÖRJESON, L., HÖJER, M., DREBORG, K.-H., EKVALL, T. & FINNVEDEN, G., (2006), Scenario types and techniques: Towards a user's guide, *Futures*, vol. 38, n°7, p. 723-739.

BOUTAUD, A., (2005), *Le développement durable: penser le changement ou changer le pansement?: bilan et analyse des outils d'évaluation des politiques publiques locales en matière de développement durable en France: de l'émergence d'un changement dans les modes de faire au défi d'un changement dans les modes de penser*, Université Jean Monnet - Saint-Etienne, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne.

BOUZOUINA, L., (2008), *Ségrégation spatiale et dynamiques urbaines*, Université Lyon 2 - Faculté de sciences économiques et de gestion.

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*, vol. 27, n°2, p. 128-139.

BRADLEY, D. C., STILLINGS, L. L., JASKULA, B. W., MUNK, L. & MCCAULEY, A. D., (2017), Chapter K : Lithium, In : *Critical Mineral Resources of the United States—Economic and Environmental Geology and Prospects for Future Supply*, Klaus J. Schulz, John H. DeYoung, Jr., Robert R. Seal II, and Dwight C. Bradley, p. K1-K17.

BRETAGNOLLE, A., (2003), Vitesse des transports et sélection hiérarchique entre les villes Françaises, In : *Données Urbaines*, Pumain & Matteivol. 4, , p. 309-322.

BRIGGS, D. J., (2008), A framework for integrated environmental health impact assessment of systemic risks, *Environmental Health*, vol. 7, n°1, .

BRÖG, W., ERL, E., KER, I., RYLE, J. & WALL, R., (2009), Evaluation of voluntary travel behaviour change: Experiences from three continents, *Transport Policy*, vol. 16, n°6, p. 281-292.

BRUTEL, C., (2011), Un maillage du territoire français, *INSEE Première*, n°1333, p. 4.

BUISSON, M.-A., MIGNOT, D. & AGUILERA-BELANGER, A., (2001), Métropolisation et polarités intra-urbaines. Le cas de Lyon, *Revue d'Économie Régionale & Urbaine*, vol. avril, n°2, p. 271.

BULLE, C., WEIDEMA, B. P., MARGNI, M., HUMBERT, S., ROSENBAUM, R. & JOLLIET, O., (2014), *Comparing IMPACT World+ with other LCIA methodologies at end-point level using the Stepwise weighting factors*Présenté à SETAC Europe 24th Annual Meeting, 11.-15. May 2014.

BURCHELL, R. W., (1992), *Impact assessment of the New Jersey interim state development and redevelopment plan* (nº 2), New Jersey Office of State Planning.

CABRERA, J., (2013), *Quelle prise en compte des dynamiques urbaines dans la prévision de la demande de transport?* (Université Lumière-Lyon II).

CALTHORPE, P., (1993), *The next American metropolis: ecology, community, and the American Dream*, Princeton Architectural Press, New York, NY, 175 p.

CAMAGNI, R. & GIBELLI, M. C. (ED.), (1997), *Développement urbain durable: quatre métropoles européennes à l'épreuve*, Ed. de l'Aube, Paris, 174 p.

CAMAGNI, R., GIBELLI, M. C. & RIGAMONTI, P., (2002), Urban mobility and urban form: the social and environmental costs of different patterns of urban expansion, *Ecological economics*, vol. 40, n°2, p. 199–216.

CCNUCC, Adoption de l'Accord de Paris, , Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques (2015).

CEBEILLAC, A., DAUDÉ, É. & HURAUX, T., (2017), Where ? When ? And how often ? What can we learn about daily urban mobilities from Twitter data and Google POIs in Bangkok (Thailand) and which perspectives for dengue studies ?, *Netcom*, n°31-3/4, p. 283-308.

CERTU, (2011), *Évaluation environnementale des plans de déplacements urbains - Analyse des premières pratiques et préconisations*.

CERVERO, R. & KOCKELMAN, K., (1997), Travel demand and the 3Ds: Density, Diversity, and Design, *Transport Research Part D: Transport and Environment*, vol. 2, n°3, p. 199-219.

CGDD, (2010), *La mobilite des Francais - Panorama issu de l'enquête nationale transports et déplacements 2008*.

CGDD, (2018), *Bilan énergétique de la France métropolitaine en 2017 – Données provisoires*, 4 p.

CGDD & CEREMA, (2015), *Préconisations relatives à l'évaluation environnementale stratégique*.

CHARMES, E., (2006), *La rue, village ou décor ? parcours dans deux rues de Belleville*, Créaphis, Grâne, 128 p.

CHESTER, M. & HORVATH, A., (2009), Environmental assessment of passenger transportation should include infrastructure and supply chains, *Environmental Research Letters*, vol. 4, n°2, p. 024008.

CHESTER, M., HORVATH, A. & MADANAT, S., (2010), Comparison of life-cycle energy and emissions footprints of passenger transportation in metropolitan regions, *Atmospheric Environment*, vol. 44, n°8, p. 1071-1079.

CHESTER, M., PINCETL, S., ELIZABETH, Z., EISENSTEIN, W. & MATUTE, J., (2013), Infrastructure and automobile shifts: positioning transit to reduce life-cycle environmental impacts for urban sustainability goals, *Environmental Research Letters*, vol. 8, n°1, p. 015041.

CLEMENT, M. & ROLLAND, A., (2017), La facture énergétique du logement a baissé depuis 2013 malgré la hausse de la fiscalité, *INSEE Références*.

COMMENGES, H., (2013), *L'invention de la mobilité quotidienne. Aspects performatifs des instruments de la socio-économie des transports*, Université Paris Diderot-Paris 7.

CONSEIL DE L'EUROPE, CONGRES DES POUVOIRS LOCAUX ET REGIONAUX DE L'EUROPE, PINTO, C. A., BORSUS, W. & CONSTANTIN, M., (2009), *Manifeste pour une nouvelle urbanité: Charte urbaine européenne II*, Éditions du Conseil de l'Europe, Strasbourg.

CONSEIL SCIENTIFIQUE DE L'ÉVALUATION, (1996), *Petit guide de l'évaluation des politiques publiques*, Paris, 123 p.

CRANE, R., (1995), *On Form Versus Function: Will the « New Urbanism » Reduce Traffic or Increase it?*, Working Paper No. 266, University of California Transport Center.

CUCURACHI, S., SEAGER, T. P. & PRADO, V., (2017), Normalization in Comparative Life Cycle Assessment to Support Environmental Decision Making: Normalization in Comparative LCA, *Journal of Industrial Ecology*, vol. 21, n°2, p. 242-243.

DANDRES, T., (2012), *Développement d'une méthode d'analyse du cycle de vie conséquentielle prospective macroscopique: évaluation d'une politique de bioénergie dans l'Union Européenne à l'horizon 2025* (École Polytechnique de Montréal).

DANDRES, T., GAUDREAULT, C., TIRADO-SECO, P. & SAMSON, R., (2011), Assessing non-marginal variations with consequential LCA: Application to European energy sector, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, n°6, p. 3121-3132.

DATAR, (2003), *Quelle France rurale pour 2020 ? Contribution à une nouvelle politique de développement rural durable*, Paris, 64 p.

DAXNER, T., FORELL, A., GAMARRA, P., KIESELBACH, S., MERL, A., MÜHLBACH, D. & STOFFREGEN, A., (2014), *Attributional Life Cycle Analysis report*.

DE BORTOLI, A., FERAILLE, A. & LEURENT, F., (2017), Life Cycle Assessment to support decision-making in transportation planning : a case of French Bus Rapid Transit.Présenté à Conference: 96th Transportation Research Board, , Washington DC, USA.

DE LA BARRA, T., PÉREZ, B. & VERA, N., (1984), TRANUS-J: Putting Large Models into Small Computers, *Environment and Planning B: Planning and Design*, vol. 11, n°1, p. 87-101.

DE WITTE, A., HOLLEVOET, J., DOBRUSZKES, F., HUBERT, M. & MACHARIS, C., (2013), Linking modal choice to motility: A comprehensive review, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, vol. 49, p. 329-341.

DECHESNE, M., BARRAUD, S. & BARDIN, J.-P., (2004), Spatial distribution of pollution in an urban stormwater infiltration basin, *Journal of Contaminant Hydrology*, vol. 72, n°1-4, p. 189-205.

DEL DUCE, A., GAUCH, M. & ALTHAUS, H.-J., (2014), Electric passenger car transport and passenger car life cycle inventories in ecoinvent version 3, *The International Journal of Life Cycle Assessment*.

DEL PERO, F., DELOGU, M., PIERINI, M. & BONAFFINI, D., (2015), Life Cycle Assessment of a heavy metro train, *Journal of Cleaner Production*, vol. 87, p. 787-799.

DELEAU, M., (1986), *Évaluer les politiques publiques, méthodes, déontologie, organisation*, Commisariat général du Plan, Paris.

DELETRAZ, G., (2002), *Géographie des risques environnementaux liés aux transports routiers en montagne*, Université de Pau et des Pays de l'Adour.

DEMAZIERE, C. & DESJARDINS, X., (2016), La planification territoriale stratégique : une illusion nécessaire ?, *Revue Internationale d'Urbanisme (RIURBA)*, vol. 2, .

DERYCKE, P.-H., (1999), Comprendre les dynamiques urbaines, In : *La méthropolisation. Croissance, diversité, fractures*, Lacour C., Puissant S., ParisAnthropos, , p. 1-19.

DEYMIER, G. & NICOLAS, J.-P., (2005), *Modèles d'interaction entre transport et urbanisme: état de l'art et choix du modèle pour le projet SIMBAD. Rapport intermédiaire n° 1*, Laboratoire d'Économie des Transports.

DGITM - MEDDE, (2012), *CO2 information for transport services - Methodological guide*.

DOBRE, M., (2002), *L'écologie au quotidien*, L'Harmattan, 352 p.

DREAL RHONE-ALPES, (2014), *Révision du Plan de Protection de l'Atmosphère de l'agglomération lyonnaise*.

DUFLOU, J. R., DE MOOR, J., VERPOEST, I. & DEWULF, W., (2009), Environmental impact analysis of composite use in car manufacturing, *CIRP Annals*, vol. 58, n°1, p. 9-12.

DUPUY, G., (1999a), *La dépendance automobile. Symptômes, analyses, diagnostic, traitement*, Paris.

DUPUY, G., (1999b), *Les territoires de l'automobile*, Economica Anthropos, 216 p.

DUSHINA, A., PAULHIAC, F. & SCHERRER, F., (2015), Le TOD comme instrument territorial de la coordination entre urbanisme et transport : le cas de Sainte-Thérèse dans la région métropolitaine de Montréal, *Flux*, vol. N° 101-102, n°3, p. 69.

EARLES, J. M. & HALOG, A., (2011), Consequential life cycle assessment: a review, *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 16, n°5, p. 445-453.

EARLES, J. M., HALOG, A., INCE, P. & SKOG, K., (2013), Integrated Economic Equilibrium and Life Cycle Assessment Modeling for Policy-based Consequential LCA, *Journal of Industrial Ecology*, vol. 17, n°3, p. 375-384.

ECHENIQUE, M. H., FLOWERDEW, A. D. J., HUNT, J. D., MAYO, T. R., SKIDMORE, I. J. & SIMMONDS, D. C., (1990), The MEPLAN models of Bilbao, Leeds and Dortmund, *Transport Reviews*, vol. 10, n°4, p. 309-322.

EICHLSEDER, H., HAUSBERGER, S., REXEIS, M., ZALLINGER, M. & LUZ, R., (2009), *Emission Factors from the Model PHEM for the HBEFA Version 3*, Graz University of Technology.

EKVALL, T., AZAPAGIC, A., FINNVEDEN, G., RYDBERG, T., WEIDEMA, B. P. & ZAMAGNI, A., (2016), Attributional and consequential LCA in the ILCD handbook, *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 21, n°3, p. 293-296.

ENAULT, C., (2003), *Vitesse, accessibilité et étalement urbain; analyse et application à l'aire urbaine dijonnaise*, Université de Bourgogne.

ERIKSSON, M. & AHLGREN, S., (2013), *LCAs of petrol and diesel* (nº 2013:058), SLU, S wedish University of Agricultural Science.

EUROPEAN COMMISSION/JOINT RESEARCH CENTRE, (2010), *ILCD handbook: general guide for life cycle assessment : detailed guidance*, Publications Office of the European Union, Luxembourg.

EUROPEAN COMMISSION/JOINT RESEARCH CENTRE, (2011), *International reference life cycle data system (ILCD) handbook: general guide for life cycle assessment: provisions and action steps.*, Publications Office, Luxembourg.

EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY, (2016), *EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2016* (nº 21), 28 p.

EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY, (2017), *Emissions of air pollutants from transport*.

EUROPEAN ENVIRONMENTAL AGENCY, EUROPÄISCHE KOMMISSION & LUDLOW, D. (ÉD.), (2006), *Urban sprawl in Europe: the ignored challenge*, Off. for Off. Publ. of the Europ. Communities, Luxembourg, 56 p.

EWING, R. & CERVERO, R., (2001), Travel and the built environment: a synthesis, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, n°1780, p. 87–114.

EWING, R. & CERVERO, R., (2010), Travel and the Built Environment: A Meta-Analysis, *Journal of the American Planning Association*, vol. 76, n°3, p. 265-294.

FALLAH SHORSHANI, M., (2014), *Modélisation de l'impact du trafic routier sur la pollution de l'air et des eaux de ruissellement*, Paris-Est.

FEDERATION NATIONALE DES AGENCES D'URBANISME, (2014), *Les métamorphoses de l'autoroute urbaine*, Paris.

FEDERATION NATIONALE DES TRAVAUX PUBLICS, (2015), *Réaliser une analyse environnementale dans les Travaux Publics - Guide sectoriel 2015*, ADEME.

FINNVEDEN, G., (2000), On the limitations of life cycle assessment and environmental systems analysis tools in general, *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 5, n°4, p. 229-238.

FINNVEDEN, G., HAUSCHILD, M. Z., EKVALL, T., GUINÉE, J., HEIJUNGS, R., HELLWEG, S., … SUH, S., (2009), Recent developments in Life Cycle Assessment, *Journal of Environmental Management*, vol. 91, n°1, p. 1-21.

FINNVEDEN, G., NILSSON, M., JOHANSSON, J., PERSSON, A., MOBERG, A. & CARLSSON, T., (2003), Strategic environmental assessment methodologies—applications within the energy sector, *Environmental impact assessment review*, vol. 23, n°1, p. 91–123.

FORSBERG, B., (2008), *Traffic related PM and mortality - exposure-response functions and impact calculations for TESS*, Emissions research programme (EMFO), 24 p.

FRANÇOIS, C., GONDRAN, N., NICOLAS, J.-P. & PARSONS, D., (2017), Environmental assessment of urban mobility: Combining life cycle assessment with land-use and transport interaction modelling—Application to Lyon (France), *Ecological Indicators*, vol. 72, p. 597-604.

FUKUSHIMA, Y. & HIRAO, M., (2002), A structured framework and language for scenario-based life cycle assessment, *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 7, n°6, p. 317–329.

GALLEZ, C. & KAUFMANN, V., (2009), Aux racines de la mobilité en sciences sociales. Contribution au cadre d'analyse socio-historique de la mobilité urbaine, In : *De l'histoire des transports à l'histoire de la mobilité*, Presses Universitaires de RennesFlonneau M. & Guigueno V., , p. 41-55.

GEURS, K. & RITSEMA VAN ECK, J., (2001), *Accessibility Measures: Review and Applications*, National Institute of Public Health and the Environment.

GHORRA-GOBIN, C., (2015), *La métropolisation en question*, puf, Paris, 116 p.

GIANNOPOULOS, G. A. & CURDES, G., (1992), Innovations in urban transport and the influence on urban form. An historical review, *Transport Reviews*, vol. 12, n°1, p. 15-32.

GIEC, (2013), *Résumé à l'intention des décideurs*, 34 p.

GIROD, B., DE HAAN, P. & SCHOLZ, R. W., (2011), Consumption-as-usual instead of ceteris paribus assumption for demand: Integration of potential rebound effects into LCA, *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 16, n°1, p. 3-11.

GODEFROY, F., (2011), *Méthodologie de caractérisation du vélopartage et d'estimation du marché potentiel du vélo à Montréal* (Mémoire de Master), Université de Montréal.

GODET, M., (2007a), *Manuel de prospective stratégique, Tome 1 : Une indiscipline intellectuelle*, Dunod, Paris, 296 p.

GODET, M., (2007b), *Manuel de prospective stratégique, Tome 2 : L'Art et la méthode*, Dunod, Paris, 448 p.

GOEDKOOP, M., HEIJUNGS, R., HUIJBREGTS, M., DE SCHRYVER, A., STRUIJS, J. & VAN ZELM, R., (2009), ReCiPe 2008, *A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level*, vol. 1, .

GOGER, T., (2006), *Un indicateur d'impact environnemental global des polluants atmosphériques émis par les transports* (INSA de Lyon).

GORDON, P. & LEE, B., (2013), Spatial structure and travel trends in commuting and non-commuting travel in US metropolitan areas, In : *International Handbook on Transport and Development*, Robin Hickman, David Bonilla, Moshe Givoni and David Banister, Cheltenham, UK.

GORDON, P. & RICHARDSON, H. W., (1997), Are compact cities a desirable planning goal?, *Journal of the American Planning Association*, vol. 63, n°1, p. 95-106.

GRAFMEYER, Y. & JOSEPH, I., (1984), *L'École de Chicago. Naissance de l'écologie urbaine*, Aubier, 378 p.

GRAND LYON, (2010), *Plan modes doux 2009>2020*.

GRAND LYON & JCDECAUX, (2018), *Nouveau vélo, nouveaux services, extension aux communes de la Métropole - dossier de presse*.

GRASSOT, L., NICOLAS, J.-P. & PLUVINET, P., (2012), De l'intérêt de contrôler l'impact des hypothèses de composition du parc automobile sur l'estimation des émissions liées au trafic routier, *Recherche Transports Sécurité*, vol. 2012, n°03-04, p. 215-227.

GRENOBLE-ALPES METROPOLE, (2018), *Rapport environnemental du PDU de l'agglomération grenobloise*.

GUINÉE, J. B., HEIJUNGS, R., HUPPES, G., ZAMAGNI, A., MASONI, P., BUONAMICI, R., … RYDBERG, T., (2011), Life Cycle Assessment: Past, Present, and Future †, *Environmental Science & Technology*, vol. 45, n°1, p. 90-96.

HÄGERSTRAAND, T., (1970), What about people in regional science?, *Papers in Regional Science*, vol. 24, n°1, p. 7-24.

HANDY, S., (1996), Methodologies for exploring the link between urban form and travel behavior, *Transport Research Part D: Transport and Environment*, vol. 1, n°2, p. 151-165.

HANDY, S., (2005), Critical assessment of the literature on the relationships among transportation, land use, and physical activity, *Transportation Research Board and the Institute of Medicine Committee on Physical Activity, Health, Transportation, and Land Use. Resource paper for TRB Special Report*, vol. 282, .

HANSEN, W. G., (1959), How Accessibility Shapes Land Use, *Journal of the American Institute of Planners*, vol. 25, n°2, p. 73-76.

HANSON, S., (1982), The determinants of daily travel-activity patterns: relative location and sociodemographic factors, *Urban Geography*, vol. 3, n°3, p. 179-202.

HATZOPOULOU, M., HAO, J. Y. & MILLER, E. J., (2011), Simulating the impacts of household travel on greenhouse gas emissions, urban air quality, and population exposure, *Transportation*, vol. 38, n°6, p. 871-887.

HAWKINS, T. R., SINGH, B., MAJEAU-BETTEZ, G. & STRØMMAN, A. H., (2013), Comparative Environmental Life Cycle Assessment of Conventional and Electric Vehicles: LCA of Conventional and Electric Vehicles, *Journal of Industrial Ecology*, vol. 17, n°1, p. 53-64.

HELLMUTH, T., CLASSEN, T., KIM, R. & KEPHALOPOULOS, S., (2012), *Methodological guidance for estimating the burden of disease from environmental noise*, World Health Organization.

HELLWEG, S. & MILA I CANALS, L., (2014), Emerging approaches, challenges and opportunities in life cycle assessment, *Science*, vol. 344, n°6188, p. 1109-1113.

HERAN, F., (2011), *La ville morcelée: effets de coupure en milieu urbain*, Economica, Paris, 217 p.

HERAN, F. & RAVALET, E. P. J., (2008), *La consommation d'espace-temps des divers modes de déplacement en milieu urbain, Application au cas de l'île de France*, PREDIT.

HEYWOOD, J. & MACKENZIE, D., (2015), *On the Road toward 2050 : Potential for substantial reductions in light-duty vehicle energy use and greenhouse gas emissions*, Sloan Automotive Laboratory, Engineering Systems Division, MIT.

HILL, J., (2013), Life Cycle Analysis of Biofuels, In : *Encyclopedia of Biodiversity (Second Edition)*, Academic Press, Waltham, p. 627-630.

HISCHIER, R., WEIDEMA, B., ALTHAUS, H.-J., BAUER, C., DOKA, G., DONES, R., … NEMECEK, T., (2010), *Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods*, EcoInvent, 176 p.

HOFFMAN, A. V. & FELKNER, J., (2002), *The Historical Origins and Causes of Urban Decentralization in the United States*, Joint Center for Housing Studies, Graduate School of Design [and] John F. Kennedy School of Government, Harvard University, 56 p.

HOMOCIANU, G. M., (2009), *Modélisation de l'Interaction Transport-Urbanisme - Choix résidentiels des ménages dans l'aire urbaine de Lyon* (Lumière Lyon 2).

HUNT, J. D., KRIGER, D. S. & MILLER, E. J., (2005), Current operational urban land-use–transport modelling frameworks: A review, *Transport Reviews*, vol. 25, n°3, p. 329-376.

HURIOT, J.-M. (ED.), (1998), *La ville ou la proximité organisée*, Anthropos, Paris, 237 p.

ICCT, (2017), *European vehicle market statistics: Pocketbook 2016/2017*, The International Council on Clean Transportation, 63 p.

IPCC (ÉD.), (2007), *Climate change 2007: the physical science basis ; contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, UNEP, New York, 996 p.

IPCC, (2015), *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the IPCC*, IPCC, Geneva, Switzerland, 169 p.

JENSEN, P., (2018), *Pourquoi la société ne se laisse pas mettre en équations*, Seuil, Paris.

JOLLIET, O., SAADE, M. & SOUCY, G., (2010), *Analyse du cycle de vie : comprendre et réaliser un écobilan*, Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne.

JONAS, A. E., (2015), Rethinking Mobility at the Urban-Transportation-Geography Nexus, In : *Transport, Mobility, and the Production of Urban Space*, J. Cidell and D. PrytherchLondon: Routledge, , p. 281-294.

JONES, J., (2016), *Spatial bias in LUTI models*, Université catholique de Louvain.

JOUMARD, R., ANDRE, M., VIDON, R., TASSEL, P. & PRUVOST, C., (1999), *Influence du cycle de conduite sur les émissions unitaires de polluants des voitures particulières* (nº LTE 9902), INRETS, 124 p.

KARLSSON, C. S. J., MILIUTENKO, S., BJÖRKLUND, A., MÖRTBERG, U., OLOFSSON, B. & TOLLER, S., (2017), Life cycle assessment in road infrastructure planning using spatial geological data, *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 22, n°8, p. 1302-1317.

KAUFMANN, V., BERGMAN, M. M. & JOYE, D., (2004), Motility: mobility as capital, *International journal of urban and regional research*, vol. 28, n°4, p. 745–756.

KOIZUMI, T., (2015), Biofuels and food security, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 52, p. 829-841.

KOLLI, Z., (2012), *Dynamique de renouvellement du parc automobile: projection et impact environnemental* (Université de Paris I, Pantheon-Sorbonne).

KORSU, E., MASSOT, M.-H. & ORFEUIL, J.-P., (2012), *La ville cohérente penser autrement la proximité*, La Documentation française, Paris.

KRUGMAN, P., (1996), Urban Concentration: The Role of Increasing Returns and Transport Costs, *International Regional Science Review*, vol. 19, n°1-2, p. 5-30.

KUMAR, P. & SAROJ, D. P., (2014), Water–energy–pollution nexus for growing cities, *Urban Climate*, vol. 10, p. 846-853.

KUMAR PATHAK, S., SOOD, V., SINGH, Y. & CHANNIWALA, S. A., (2016), Real world vehicle emissions: Their correlation with driving parameters, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 44, p. 157-176.

KUSHNIR, D. & SANDÉN, B. A., (2012), The time dimension and lithium resource constraints for electric vehicles, *Resources Policy*, vol. 37, n°1, p. 93-103.

LACOUR, C. & PUISSANT, S. (ED.), (1999), *La métropolisation: croissance, diversité, fractures*, Anthropos, Paris, 190 p.

LATOUR, B., (2010), La mondialisation fait-elle un monde habitable ?, In : *Prospective périurbaine et autres fabriques de territoires*, Territoires 2040 n°2, DATAR, p. 9-18.

LAURENT, F., (2015), *Optimisation fonctionnelle et spatiale de scénarios de méthanisation centralisée selon une approche systémique territoriale couplée à l'analyse du cycle de vie*, Université de Rennes 1.

LAUTSO, K., SPIEKERMANN, K., WEGENER, M., SHEPPARD, I., STEADMAN, P., MARTINO, A., … GAYDA, S., (2004), *PROPOLIS: Planning and Research of Policies for Land Use and Transport for Increasing Urban Sustainability* (nº EVK4-1999-00005), European Commission.

LE BORGNE, R. & FEILLARD, P., (2000), Analyse du cycle de vie - Application dans l'industrie automobile, *Techniques de l'Ingénieur*, n°G5800, p. 15.

LE FEON, S., (2014), *Evaluation environnementale des besoins de mobilité des grandes aires urbaines en France-Approche par Analyse de Cycle de Vie*, Saint-Etienne, EMSE.

LE FÉON, S., GONDRAN, N., LAFOREST, V. & LE BOULCH, D., (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. Vol 3(3), p. pp.86-101.

LE NECHET, F., (2010), *Approche multiscalaire des liens entre mobilité quotidienne, morphologie et soutenabilité des métropoles européennes : cas de Paris et de la région Rhin-Ruhr.*, Université Paris-Est.

LE NECHET, F., (2015), De la forme urbaine à la structure métropolitaine : une typologie de la configuration interne des densités pour les principales métropoles européennes de l'Audit Urbain, *Cybergeo : European Journal of Geography*.

LEE, B., GORDON, P., MOORE, J. E. & RICHARDSON, H. W., (2005), *Residential location, land use and transportation: the neglected role of nonwork travel*, USC Lusk Center for Real Estate.

LEJRI, D., (2015), *Analyse comparée des différentes méthodes pour l'évaluation environnementale d'aménagements et de stratégies de régulation routière*, IFSTTAR, 58 p.

LEROND, M., LARRUE, C., MICHEL, P., ROUDIER, B. & SANSON, C., (2003), *L'évaluation environnementale des politiques, plans et programmes : objectifs, méthodologies et cas pratiques*, Technique et documentation Lavoisier, Paris.

LEVASSEUR, A., (2011), *Développement d'une méthode d'analyse du cycle de vie dynamique pour l'évaluation des impacts sur le réchauffement climatique*, École Polytechnique de Montréal.

LEVY, J., (2004), Essences du mouvement, In : *Les sens du mouvement*, Belin, Paris, p. 298-307.

LITMAN, T., (2015), Land use impacts on transport, *Victoria Transport Policy Institute*.

LOISEAU, E., (2014), *Elaboration d'une démarche d'évaluation environnementale d'un territoire basée sur le cadre méthodologique de l'Analyse du Cycle de vie (ACV) : Application au territoire du bassin de Thau*, Montpellier SupAgro.

LOISEAU, E., AISSANI, L., LE FEON, S., LAURENT, F., CERCEAU, J., SALA, S. & ROUX, P., (2018), Territorial Life Cycle Assessment (LCA): What exactly is it about? A proposal towards using a common terminology and a research agenda, *Journal of Cleaner Production*, vol. 176, p. 474-485.

LOISEAU, E., JUNQUA, G., ROUX, P. & BELLON-MAUREL, V., (2012), Environmental assessment of a territory: An overview of existing tools and methods, *Journal of Environmental Management*, vol. 112, p. 213-225.

LOISEAU, E., ROUX, P., JUNQUA, G., MAUREL, P. & BELLON-MAUREL, V., (2013), Adapting the LCA framework to environmental assessment in land planning, *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 18, n°8, p. 1533-1548.

LOPEZ-RUIZ, H. G., (2009), *Environnement & Mobilité 2050 : des scénarios sous contrainte du facteur 4 (-75% de CO2 en 2050)*, Université de Lyon.

LOWRY, I. S., (1964), *A Model of Metropolis*, Rand Corporation, 136 p.

LUND, H. & KEMPTON, W., (2008), Integration of renewable energy into the transport and electricity sectors through V2G, *Energy Policy*, vol. 36, n°9, p. 3578-3587.

LUND, H., MATHIESEN, B. V., CHRISTENSEN, P. & SCHMIDT, J. H., (2010), Energy system analysis of marginal electricity supply in consequential LCA, *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 15, n°3, p. 260-271.

MANGIN, D., (2004), *La ville franchisée: formes et structures de la ville contemporaine*, Ed. de la Villette, Paris, 398 p.

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*, Université de Rennes 1.

MARESCA, B. & DUJIN, A., (2014), La transition énergétique à l'épreuve du mode de vie, *Flux*, vol. N° 96, n°2, p. 10.

MARSAUCHE, M., (2009), *Informations pour la décision, préfiguration d'un tableau de bord environnemental pour le SCOT : application au SCOT sud Loire*, École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne.

MARSHALL, S. & BANISTER, D. (ÉD.), (2007), *Land use and transport: European research towards integrated policies*, Elsevier, Amsterdam London, 393 p.

MASSOT, M., ORFEUIL, J.-P. & BELLANGER, F., (2000), *Éléments pour une prospective de la mobilité*, Centre de Recherche Espace, Transports, Environnement et Institutions locales.

MCARDLE, W. D., KATCH, F. I. & KATCH, V. L., (2000), *Essentials of Exercise Physiology (2nd ed.)*, Lippincott Williams & Wilkins.

MEEM, (2016), *Rapport final de la commission indépendante mise en place par la Ministre Ségolène Royal après la révélation de l'affaire Volkswagen*.

MENTEN, F. M., (2013), *Nouvelles approches pour l'évaluation environnementale des biocarburants avancés* (ENSAM).

MERCEDES-BENZ, (2010), *Environmental Certificate - A Class*.

METROPOLE DE LYON, (2016), *Plan d'actions pour les mobilités actives de la Métropole de Lyon*, 16 p.

MICHEL, P., (2001), *L'Étude d'Impact sur l'Environnement*, Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement, 157 p.

MICHEL, P. & MONIER, T., (2001), *L'Évaluation Environnementale des Plans et Programmes de Transport*, Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement.

MICHELOT, N., CARREGA, P. & ROUÏL, L., (2015), Panorama de la modélisation de la dispersion atmosphérique Atmospheric dispersion models: An overwiew, *Pollution atmosphérique*, p. 9.

MILAKIS, D., CERVERO, R. & VAN WEE, B., (2015), Stay local or go regional? Urban form effects on vehicle use at different spatial scales: A theoretical concept and its application to the San Francisco Bay Area, *Journal of Transport and Land Use*, vol. 8, n°2, .

MILAKIS, D., VLASTOS, T. & BARBOPOULOS, N., (2008), Relationships between urban form and travel behaviour in Athens, Greece. A comparison with Western European and North American results, *EJTIR*, vol. 3, n°8, .

MIRABELLA, N., ALLACKER, K. & SALA, S., (2018), Current trends and limitations of life cycle assessment applied to the urban scale: critical analysis and review of selected literature, *The International Journal of Life Cycle Assessment*.

MOECKEL, R., LLORCA GARCIA, C., MORENO CHOU, A. T. & OKRAH, M. B., (2018), Trends in integrated land use/transport modeling: An evaluation of the state of the art, *Journal of Transport and Land Use*, vol. 11, n°1, .

MORENO RUIZ, E., LÉVONA, T., REINHARD, J., VALSASINA, L., BOURGAULT, G. & WERNET, G., (2016), *Documentation of changes implemented in ecoinvent database v3.3*, Ecoinvent, Zürich, Switzerland.

MORENO, T., RECHE, C., RIVAS, I., CRUZ MINGUILLON, M., MARTINS, V., VARGAS, C., … GIBBONS, W., (2015), Urban air quality comparison for bus, tram, subway and pedestrian commutes in Barcelona, *Environmental Research*, vol. 142, p. 495-510.

NAESS, P., (2012), Urban form and travel behavior: experience from a Nordic context, *Journal of Transport and Land Use*, vol. 5, n°2, p. 21-45.

NANTES SAINT-NAZAIRE POLE METROPOLITAIN, (2016), *Schéma de Cohérence Territoriale Nantes Saint-Nazaire - Evaluation Environnementale*.

NEWMAN, P. W. G. & KENWORTHY, J. R., (1999), *Sustainability and Cities: Overcoming Automobile Dependence*, Island Press, Washington D.C., USA.

NICOLAS, J.-P., BONNEL, P., CABRERA, J., GODINOT, C., HOMOCIANU, G. M., ROUTHIER, J.-L., … ZUCCARELLO, P., (2009), *SImuler les MoBilités pour une Agglomération Durable*, Laboratoire d'Économie des Transports.

NICOLAS, J.-P., PLUVINET, P., TOILIER, F., ZUCCARELLO, P. & CABRERA, J., (2013), *SImuler les MoBilités pour une Agglomération Durable : Guide d'utilisateur de la plateforme SIMBAD*, Laboratoire d'Economie des Transports.

NICOLAS, J.-P., POCHET, P. & POIMBOEUF, H., (2002), Mobilité urbaine et développement durable : quels outils de mesure pour quels enjeux ?, *Cahiers Scientifiques du Transport*, n°41, p. 53-76.

NICOLAS, J.-P., VERRY, D. & LONGUAR, Z., (2012), Evolutions récentes des émissions de CO2 liées à la mobilité des Français: analyser les dynamiques à l'oeuvre grâce aux enquêtes nationales Transports de 1994 et 2008, *Economie et statistique*, vol. 457, n°1, p. 161–183.

NIGGE, K.-M., (2000), *Life Cycle Assessment of Natural Gas Vehicles Development and Application of Site-Dependent Impact Indicators*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.

NITSCHELM, L., AUBIN, J., CORSON, M. S., VIAUD, V. & WALTER, C., (2016), Spatial differentiation in Life Cycle Assessment LCA applied to an agricultural territory: current practices and method development, *Journal of Cleaner Production*, vol. 112, p. 2472-2484.

NTZIACHRISTOS, L. & BOULTER, P., (2009), Road vehicle tyre and brake wear Road surface wear, *Joint EMEP/CORINAIR emission inventory guidebook*, p. B770–1.

NTZIACHRISTOS, L., SAMARAS, Z., KOURIDIS, C., HASSEL, D., MCCRAE, I., HICKMAN, J., … OTHERS, (2014), *COPERT Guidebook 2014 : Exhaust emissions from road transport*, Guidebook.

NTZIACHRISTOS, L., SAMARAS, Z., KOURIDIS, C., SAMARAS, C., HASSEL, D., MELLIOS, G., … HAUSBERGER, S., (2016), EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2016 - Passenger cars, light commercial trucks, heavy-duty vehicles including buses and motor cycles, p. 153.

NUZZOLO, A., COPPOLA, P. & PAPA, E., (2014), Urban from and sustainability: modelling evidences from the empirical case study of RomeE, In : *ETC European Transport Conference 2014*, AET 2014 and contributors, Francfort, p. 1–20.

OKOKON, E. O., YLI-TUOMI, T., TURUNEN, A. W., TAIMISTO, P., PENNANEN, A., VOUITSIS, I., … LANKI, T., (2017), Particulates and noise exposure during bicycle, bus and car commuting: A study in three European cities, *Environmental Research*, vol. 154, p. 181-189.

OMS, (2006), *Lignes directrices OMS relatives à la qualité de l'air : particules, ozone, dioxyde d'azote et dioxyde de soufre*, Organisation Mondiale de la Santé.

OPECST, BAUPIN, D. & KELLER, F., (2014), *Les nouvelles mobilités sereines et durables : concevoir et utiliser des véhicules écologiques*.

ORFEUIL, J.-P., (1996), La mobilité urbaine, son coût, ses modalités de financement, In : *Données Urbaines*, Pumain, D. et Godard F.

ORFEUIL, J.-P., (2000), *L'évolution de la mobilité quotidienne: comprendre les dynamiques, éclairer les controverses*, INRETS, Arcueil.

ORFEUIL, J.-P. & SOLEYRET, D., (2002), Quelles interactions entre les marchés de la mobilité à courte et à longue distance?, *Recherche-Transports-Sécurité*, vol. 76, p. 208–221.

PARTIDARIO, M. DO R. & SHEATE, W. R., (2013), Durabilité et évaluation environnementale stratégique : fusions théoriques et interdisciplinarité, In : *L'évaluation de la durabilité*, Vivien F-D., Lepart J. et Marty P.

PASCAL, M., CHATIGNOUX, E. & QUENEL, P., (2016), Impacts de l'exposition chronique aux particules fines sur la mortalité en France continentale et analyse des gains en santé de plusieurs scénarios de réduction de la pollution atmosphérique, *Santé Publique France*, p. 162.

PAULO, C., (2006), *Inégalités de mobilités: disparité des revenus, hétérogénéité des effets*, Université Lyon 2 - Faculté de sciences économiques et de gestion.

PAULUS, F. & PUMAIN, D., (2011), Salaire et hiérarchie urbaine, In : *Données Urbaines*, Pumain & Matteivol. 6, , p. 205-216.

PELE, N., (2018), *Dépenses des ménages pour leur mobilité quotidienne - une approche par les formes urbaines*, Université Lumière Lyon2.

PELE, N., FRANÇOIS, C. & NICOLAS, J.-P., (2018), Quels impacts de la forme urbaine sur les mobilités quotidiennes ? Une approche par la simulation pour une comparaison multidimensionnelle appliquée au territoire lyonnais, *Les Cahiers scientifiques du transport*, n°73, p. 77-109.

PENNEQUIN, G. & MOCILNIKAR, A.-T. (ED.), (2011), *L' atlas du développement durable et responsable*, Eyrolles, Paris, 450 p.

PERSKY, J. & WIEWEL, W., (2000), *When corporations leave town: the costs and benefits of metropolitan job sprawl*, Wayne State University Press, Detroit, 189 p.

PESONEN, H.-L., EKVALL, T., FLEISCHER, G., HUPPES, G., JAHN, C., KLOS, Z. S., … OTHERS, (2000), Framework for scenario development in LCA, *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 5, n°1, p. 21–30.

PICHERIT, M.-L., (2010), *Evaluation environnementale du véhicule électrique: méthodologies et application*, École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne.

PILLAI, D., GERBIG, C., KRETSCHMER, R., BECK, V., KARSTENS, U., NEININGER, B. & HEIMANN, M., (2012), Comparing Lagrangian and Eulerian models for CO2 transport – a step towards Bayesian inverse modeling using WRF/STILT-VPRM, *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 12, n°19, p. 8979-8991.

PILLAIN, B., (2017), *Définition des indicateurs clés de performance et évaluation multicritère de filières durables de recyclage des polymères renforcés de fibres de carbone issus de l'industrie aéronautique*, Université de Bordeaux.

PINAY, G., GASCUEL, C., MENESGUEN, A. & SOUCHON, Y., (2017), *Eutrophisation : manifestations, causes, conséquences et prédictibilité*, Synthèse de l'Expertise scientifique collective CNRS - Ifremer - INRA - Irstea (France), 148 p.

PINEAU, G., (2010), Voyages, mobilité et rythmes de déplacement, *Le Journal des psychologues*, vol. 278, n°5, p. 26.

PINSON, G., (2009), *Gouverner la ville par projet: urbanisme et gouvernance des villes européennes*, Presses de Sciences Po, Paris, 420 p.

POTTING, J. & HAUSCHILD, M. Z., (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*, vol. 11, n°S1, p. 11-13.

POURTIER, L., DEIBER, G. & PIET, H., (2007), *Modelisation de la dispersion atmospherique des odeurs*, Ed. Techniques Ingénieur.

POUYANNE, G., (2004), Des avantages comparatifs de la ville compacte à l'interaction mobilité-forme urbaine. Méthodologie et premiers résultats, *Cahiers Scientifiques du Transport*, vol. 45, .

QUERINI, F. & BENETTO, E., (2015), Combining Agent-Based Modeling and Life Cycle Assessment for the Evaluation of Mobility Policies, *Environmental Science & Technology*, vol. 49, n°3, p. 1744-1751.

QUINET, É., (1998), Des progrès dans l'évaluation des projets de transports urbains, *Metropolis*, p. 106-107.

RAUX, C. & ANDAN, O., (1988), *Les analyses des comportements de mobilité individuelle quotidienne. Une synthèse bibliographique.* (n° 85-24), Ministère de l'Equipement, de l'Aménagement du Territoire et des Transports, Service des Etudes, de la Recherche et de la Technologie, Lyon : LET.

RENAULT, (2011), *Fluence and Fluence Z.E. - Life Cycle Assessment*.

RENAULT, (2017), *Renault Mégane IV - 2017 - Life Cycle Assement results - Renault LCA methodology*.

REVITT, D. M., LUNDY, L., COULON, F. & FAIRLEY, M., (2014), The sources, impact and management of car park runoff pollution: A review, *Journal of Environmental Management*, vol. 146, p. 552-567.

RISCH, E., ROUX, P., BOUTIN, C. & HEDUIT, A., (2012), L'analyse de cycles de vie (ACV) des systèmes d'assainissement: un outil complémentaire d'aide à la décision., *Sciences Eaux & Territoires*, n°9, p. 82-90.

RISSE, N., (2004), *Évaluation Environnementale Stratégique et processus de décision publics : contributions méthodologiques*, Université Libre de Bruxelles, Institut de Gestion de l'Environnement et d'Aménagement du Territoire.

ROCKSTRÖM, J., STEFFEN, W., NOONE, K., PERSSON, \AASA, CHAPIN, F. S., LAMBIN, E. F., … OTHERS, (2009), A safe operating space for humanity, *Nature*, vol. 461, n°7263, p. 472–475.

ROUSSEAUX, P., (2005), Analyse du Cycle de Vie (ACV), *Techniques de l'Ingénieur*, n°G5500, p. 7.

RTE, (2015), *Bilan prévisionnel de l'équilibre offre-demande d'électricité en France - Synthèse*.

RUPRICH-ROBERT, C. & BENCIVENGA, M., (2002), *Evaluation des politiques publiques: nouveau guide pratique*, Ed. de « La Lettre du cadre territorial », Voiron.

SADLER, B. & DALAL-CLAYTON, D. B., (2012), *Strategic Environmental Assessment: A Sourcebook and Reference Guide to International Experience*, Earthscan, 504 p.

SALA, S., BENINI, L., MANCINI, L. & PANT, R., (2015), Integrated assessment of environmental impact of Europe in 2010: data sources and extrapolation strategies for calculating normalisation factors, *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 20, n°11, p. 1568-1585.

SANDÉN, B. A. & KARLSTRÖM, M., (2007), Positive and negative feedback in consequential life-cycle assessment, *Journal of Cleaner Production*, vol. 15, n°15, p. 1469-1481.

SANSOT, P., (1999), *Du bon usage de la lenteur*, Éditions Corps 16, 214 p.

SANTERO, N., (2010), Environmental Life-Cycle Assessment for Asphalt Pavements: Issues and Recommended Future Directions.Présenté à The 11th International Conference on Asphalt Pavements, , Nagoya, Japan, p. 10.

SANTOS, J. M., FLINTSCH, G. & FERREIRA, A., (2017), Environmental and economic assessment of pavement construction and management practices for enhancing pavement sustainability, *Resources Conservation and Recycling*, n°116, p. 15-31.

SASSEN, S., (1996), *La ville globale*, Descartes & Cie, Paris, 530 p.

SAUJOT, M., DE LAPPARENT, M., ARNAUD, E. & PRADOS, E., (2015), *To make LUTI models operational tools for planning.* (nº 150310), Transport and Mobility Laboratory - Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 19 p.

SCHNEIDER, F., CHEVALIER, J. & NAVARRO, A., (1998), Analyse du cycle de vie - Problèmes d'affectation, *Techniques de l'Ingénieur*, n°G5550, p. 19.

SCHWANEN, T., DIELEMAN, F. M. & DIJST, M., (2002), The Impact of Metropolitan Structure on Commute Behavior in the Netherlands: A Multilevel Approach, *Growth and Change*, vol. 35, n°3, p. 304-333.

SCHWANEN, T., DIJST, M. & DIELEMAN, F., (2004), Policies for urban form and their impact on travel: the Netherlands experience, *Urban Studies*, vol. 41, n°3, p. 579-603.

SEETHALER, R., (2004), Using the six principles of persuasion to promote travel behavior change Preliminary findings of a TravelSmart pilot test, In : *Conference of the Australian Institutes of Transportation Research CAITR, CSIRO, Melbourne, Australia (December 2004)*.

SEGERSSON, D., ENEROTH, K., GIDHAGEN, L., JOHANSSON, C., OMSTEDT, G., NYLÉN, A. E. & FORSBERG, B., (2017), Health Impact of PM10, PM2.5 and Black Carbon Exposure Due to Different Source Sectors in Stockholm, Gothenburg and Umea, Sweden, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 14, n°7, p. 742.

SERRES, M., (1992), *Le contrat naturel*, Flammarion, S.L.

SERVANT, L., (1996), L'Automobile dans la ville: l'envers d'un indéniable succès., *Cahier de l'IAURIF*, n°114, p. 7-21.

SHEATE, W. R., DAGG, S., RICHARDSON, J., ASCHEMANN, R., PALERM, J. & STEEN, U., (2003), Integrating the environment into strategic decision-making: conceptualizing policy SEA, *European Environment*, vol. 13, n°1, p. 1-18.

SIDER, T., ALAM, A., ZUKARI, M., DUGUM, H., GOLDSTEIN, N., ELURU, N. & HATZOPOULOU, M., (2013), Land-use and socio-economics as determinants of traffic emissions and individual exposure to air pollution, *Journal of Transport Geography*, vol. 33, p. 230-239.

SIMMONDS, D. C., (1999), The Design of the Delta Land-Use Modelling Package, *Environment and Planning B: Planning and Design*, vol. 26, n°5, p. 665-684.

SIMMONDS, D., WADDELL, P. & WEGENER, M., (2013), Equilibrium versus Dynamics in Urban Modelling, *Environment and Planning B: Planning and Design*, vol. 40, n°6, p. 1051-1070.

SLACK, J. F., KIMBALL, B. E. & SHEDD, B. W., (2017), Chapter F : Cobalt, In : *Critical Mineral Resources of the United States—Economic and Environmental Geology and Prospects for Future Supply*, Klaus J. Schulz, John H. DeYoung, Jr., Robert R. Seal II, and Dwight C. Bradley, p. F1-F20.

SMART GROWTH AMERICA, (2014), *Measuring Sprawl 2014*.

SMEETS, E., WETERINGS, R., BOSCH, P., BÜCHELE, M. & GEE, D., (1999), *Environmental indicators: Typology and overview* (n° 25), European Environment Agency, 19 p.

SOES - MEEM, (2016), *Chiffres clés du climat France et Monde - Edition 2016*, 60 p.

SOES - MEEM, (2017), *Chiffres clés du climat France et Monde - Edition 2017*.

SPIELMANN, M., BAUER, C., DONES, R. & TUCHSCHMID, P., (2007), *Transport Services* (n° 14), EcoInvent.

STEAD, D. & MARSHALL, S., (2001), The relationships between urban form and travel patterns. An international review and evaluation, *European Journal of Transport and Infrastructure Research*, vol. 1, n°2, p. 113–141.

SYTRAL, (2017), *Plan de déplacement urbains - Agglomération Lyonnaise - 2017/2030*.

TABAKA, K., (2009), *Vers une nouvelle socio-géographie de la mobilité quotidienne. Étude des mobilités quotidiennes des habitants de la région urbaine de Grenoble*, Université Joseph Fournier – Grenoble I.

TANNIER, C., HIRTZEL, J., STEPHENSON, R., COUILLET, A., VUIDEL, G. & YOUSSOUFI, S., (2016), Conception and use of an individual-based model of residential choice in a planning decision process. Feedback from an experimental trial in the city of Besançon, France, *Progress in Planning*, vol. 108, p. 1-38.

TE BRÖMMELSTROET, M., (2009), The relevance of research in planning support systems: a response to Janssen et al, *Environment and Planning B: Planning and Design*, vol. 36, n°1, p. 4-7.

TE BRÖMMELSTROET, M., SILVA, C. & BERTOLINI, L., (2014), *Assessing usability of accessibility instruments*, COST office, Amsterdam.

THÉRIVEL, R. & MINAS, P., (2002), Ensuring effective sustainability appraisal, *Impact Assessment and Project Appraisal*, vol. 20, n°2, p. 81-91.

THEYS, J. & EMELIANOFF, C., (2001), Les contradictions de la ville durable, *Le Débat*, vol. 113, n°1, p. 122.

TNS SOFRES, (2010), *Les Français et les nuisances sonores : principaux résultats*.

TOILIER, F., ALLIGIER, L., PATIER, D. & ROUTHIER, J.-L., (2005), *Vers un modèle global de simulation de la logistique urbaine: FRETURB, version 2*, Laboratoire d'Économie des Transports, 187 p.

TRANSPORT FOR LONDON, (2015), *Assessing transport connectivity in London*, 60 p.

TRANSPORT RESEARCH BOARD, (1998), *The costs of sprawl - revisited*, National Academy Press, Washington, DC, 268 p.

TRAVISI, C. M., CAMAGNI, R. & NIJKAMP, P., (2010), Impacts of urban sprawl and commuting: a modelling study for Italy, *Journal of Transport Geography*, vol. 18, n°3, p. 382-392.

UNITED NATIONS, DEPARTMENT OF ECONOMIC AND SOCIAL AFFAIRS & POPULATION DIVISION, (2014), *World urbanization prospects: the 2014 revision*.

URBALYON & EPURE, (2014), *Chiffres clés de l'aire métropolitaine lyonnaise*.

URRY, J., (2005), *Sociologie des mobilités. Une nouvelle frontière pour la sociologie ?*, Armand Colin, Paris, 254 p.

VAN DELDEN, H., (2009), Lessons learnt in the development, implementation and use of Integrated Spatial Decision Support Systems.Présenté à 18th World IMACS / MODSIM Congress, 13-17 July 2009, , Cairns, Australia.

VAN WEE, B., (2015), Toward a new generation of land use transport interaction models: a viewpoint, *Journal of Transport and Land Use*.

VAN ZELM, R., HUIJBREGTS, M. A. J., DEN HOLLANDER, H. A., VAN JAARSVELD, H. A., SAUTER, F. J., STRUIJS, J., … VAN DE MEENT, D., (2008), European characterization factors for human health damage of PM10 and ozone in life cycle impact assessment, *Atmospheric Environment*, vol. 42, n°3, p. 441-453.

VANCO, F., (2011), *Formes urbaines et durabilité du système de transports. Une application par les coûts de la mobilité urbaine des ménages au sein de l'agglomération Lyonnaise* (Université Lumière-Lyon II).

VENTURA, A., (2012), *Approches systémiques et éco-conception. Une réflexion sur les fondements conceptuels et les applications de l'Analyse de Cycle de Vie*, HDR : Université de Nantes.

VENTURA, A., DAUVERGNE, M., TAMAGNY, P., JULLIEN, A., FEESER, A., COIN, V., … ODIE, L., (2010), L'outil logiciel ECORCE: cadre méthodologique et contexte scientifique, *Routes et sécurité routière*, p. 160.

VERRY, D. & HIVERT, L., (2014), Le Diagnostic Energie Emissions des Mobilités (DEEM): mieux connaître pour mieux réduire, *Technicités*, p. 5.

VINCENT-GESLIN, S., POCHET, P., ORTAR, N., BONNEL, P. & BOUZOUINA, L., (2017), « Je t'aime… moi non plus ». Quels changements dans le rapport des jeunes lyonnais à l'automobile?, *EspacesTemps.net*, p. 18.

VIVERET, P., (1989), *L'évaluation des politiques et des actions publiques. Propositions en vue de l'évaluation du revenu minimum d'insertion. Rapport au Premier Ministre.*, Paris, 193 p.

VRAIN, P., (2003), Ville durable et transports : automobile, environnement et comportements individuels, *Innovations*, vol. 18, n°2, p. 91.

WAAUB, J.-P., (2012), Fondements théoriques et approches méthodologiques de l'Évaluation Environnementale Stratégique (EES), *Liaison Énergie-Francophonie*, n°91, p. 9-16.

WADDELL, P., (2002), UrbanSim: Modeling Urban Development for Land Use, Transportation, and Environmental Planning., *Journal of the American Planning Association*, vol. 68, n°3, p. 297-314.

WADDELL, P., (2011), Integrated Land Use and Transportation Planning and Modelling: Addressing Challenges in Research and Practice, *Transport Reviews*, vol. 31, n°2, p. 209-229.

WAGNER, P. & WEGENER, M., (2007), Urban Land Use, Transport and Environment Models: Experiences with an Integrated Microscopic Approach, *DisP - The Planning Review*, vol. 43, n°170, p. 45-56.

WEGENER, M., (1994), Operational Urban Models State of the Art, *Journal of the American Planning Association*, vol. 60, n°1, p. 17-29.

WEGENER, M., (2004), Overview of land-use transport models, In : D. A. HENSHER et K. BUTTON (éd.), *Handbook of Transport Geography and Spatial Systems*, Emerald Group Publishing Limitedvol. 5, , p. 127-146.

WEGENER, M. & FÜRST, F., (2004), Land-Use Transport Interaction: State of the Art, *SSRN Electronic Journal*.

WEIDEMA, B., (2003), *Market information in life cycle assessment*, Danish Environmental Protection Agency.

WEIDEMA, B. P., FREES, N. & NIELSEN, A.-M., (1999), Marginal production technologies for life cycle inventories, *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 4, n°1, p. 48-56.

WIEL, M., (1999), Mobilité, système d'interactions sociales et dynamiques territoriales, *Espace, populations, sociétés*, vol. 17, n°2, p. 187-194.

WIEL, M. (ED.), (2004), *Ville et mobilité, un couple infernal ?: conférence donnée à Lille le 17 juin 2004*, Éd. de l'Aube, La Tour-d'Aigues.

WIEL, M., (2008), *Pour planifier les villes autrement*, L'Harmattan, Paris.

WILSON, A., (2010), The general urban model: Retrospect and prospect: The general urban model: Retrospect and prospect, *Papers in Regional Science*, vol. 89, n°1, p. 27-42.

WILSON, A., (2016), New roles for urban models: planning for the long term, *Regional Studies, Regional Science*, vol. 3, n°1, p. 48-57.

WILSON, A. G., (2014), *Complex Spatial Systems : The Modelling Foundations of Urban and Regional Analysis*, Routledge.

WINTER, S., EMARA, Y., CIROTH, A., SU, C. & SROCKA, M., (2015), *openLCA 1.4 - Comprehensive User Manual*, GreenDelta.

WITIK, R. A., PAYET, J., MICHAUD, V., LUDWIG, C. & MÅNSON, J.-A. E., (2011), Assessing the life cycle costs and environmental performance of lightweight materials in automobile applications, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 42, n°11, p. 1694-1709.

WOLFF, A., GONDRAN, N. & BRODHAG, C., (2017), Detecting unsustainable pressures exerted on biodiversity by a company. Application to the food portfolio of a retailer, *Journal of Cleaner Production*, vol. 166, .

ZAHAVI, Y. & RYAN, J. M., (1980), Stability of Travel Components over Time, *Transportation Research Record*, vol. 750, p. 19-26.

Annexes :

Annexe 1 : Méthodes recommandées par l'ILCD pour l'analyse d'impacts (indicateurs midpoint)

Impact category	Recommended default LCIA method	Midpoint Indicator
Climate change	Baseline model of 100 years of the IPCC	Radiative forcing as Global Warming Potential (GWP100) **[kg CO_2 equivalent]**
Ozone depletion	Steady-state ODPs 1999 as in WMO assessment	Ozone Depletion Potential (ODP) **[kg CFC-11 equivalent]**
Human toxicity, cancer effects	USEtox model (Rosenbaum et al, 2008)	Comparative Toxic Unit for humans **[CTUh]**
Human toxicity, noncancer effects	USEtox model (Rosenbaum et al, 2008)	Comparative Toxic Unit for humans **[CTUh]**
Particulate matter/Respiratory inorganics	RiskPoll model (Rabl and Spadaro, 2004) and Greco et al 2007	Intake fraction for fine particles **[kg $PM_{2.5}$ equivalent]**
Ionising radiation, human health	Human health effect model as developed by Dreicer et al. 1995 (Frischknecht et al, 2000)	Human exposure efficiency relative to U^{235} **[kg U^{235} equivalent]**
Ionising radiation, ecosystems	No methods recommended	
Photochemical ozone formation	LOTOS-EUROS (Van Zelm et al, 2008) as applied in ReCiPe	Tropospheric ozone concentration increase **[kg NMVOC equivalent]**
Acidification	Accumulated Exceedance (Seppälä et al. 2006, Posch et al, 2008)	Accumulated Exceedance (AE) **[mol H+ equivalent]**
Eutrophication, terrestrial	Accumulated Exceedance (Seppälä et al. 2006, Posch et al, 2008)	Accumulated Exceedance (AE) **[mol N equivalent]**
Eutrophication, aquatic	EUTREND model (Struijs et al, 2009b) as implemented in ReCiPe	Fraction of nutrients reaching freshwater end compartment (P) or marine end compartment (N) **[kg P (or N) equivalent]**
Ecotoxicity (freshwater)	USEtox model, (Rosenbaum et al, 2008)	Comparative Toxic Unit for ecosystems **[CTUe]**
Ecotoxicity (terrestrial and marine)	No methods recommended	
Land use	Model based on Soil Organic Matter (SOM) (Milà i Canals et al, 2007b)	Soil Organic Matter **[kg C (deficit)]**
Resource depletion, water	Model for water consumption as in Swiss Ecoscarcity (Frischknecht et al, 2008)	Water use related to local scarcity of water **[m^3 of water]**
Resource depletion, mineral, fossil and renewable	CML 2002 (Guinée et al., 2002)	Scarcity **[kg antimony (Sb) equivalent]**

Source : ILCD Handbook (European Commission/Joint Research Centre, 2011)

Annexe 2 : Description des parcs automobiles des différentes catégories de ménages de l'aire urbaine de Lyon en 2015

Parcs	***Part de diesel***	***Poids moyen (kg)***	***Âge du parc (années)***	***Taux de motorisation (véh./ménage)***
Aire Urbaine	70 %	1 325	7,5	1,10
Bas revenu	73 %	1 313	10,8	0,71
Moyen revenu	69 %	1 319	8,0	1,11
Haut revenu	71 %	1 339	6,0	1,44
Centre	69 %	1 309	8,7	0,86
Couronne	70 %	1 328	8,1	1,18
Périphérie	73 %	1 329	8,3	1,44
Centre-Bas	75 %	1 279	12,2	0,49
Centre-Moyen	63 %	1 306	8,0	0,88
Centre-Haut	70 %	1 344	6,0	1,19
Couronne-Bas	72 %	1 317	10,5	0,80
Couronne-Moyen	68 %	1 323	8,1	1,18
Couronne-Haut	71 %	1 344	5,6	1,57
Périphérie-Bas	71 %	1 350	9,9	1,12
Périphérie-Moyen	74 %	1 321	7,8	1,43
Périphérie-Haut	74 %	1 316	7,0	1,73

Source : traitement auteur de l'EMD 2015

Annexe 3 : Liste des entretiens réalisés :

Liste des entretiens réalisés entre le 16 mai et le 23 octobre 2017 :

- **Damien VERRY** : Chargé d'affaires modélisation et évaluation des déplacements urbains au sein du Département Déplacements Durables à la DtecTV au CEREMA
- **Laurent JARDINIER** : Chargé de missions : recherche et approche nouvelle à la DtecTV au CEREMA
- **Nicolas PECH** : Chef de projets au SYTRAL
- **Xavier OLNY** : Chef de l'unité environnement et santé au CEREMA
- **Beatrice VESSILLER** : 22e vice-présidente de la Métropole de Lyon : Rénovation thermique des logements (parc social, parc privé), Programmes d'intérêt général (PIG) énergétiques, Pilotage des aides de l'ANAH et Fonds de solidarité énergétique
- **Yves CROZET** : Professeur émérite du LAET
- **Marc GOHLKE** : Directeur général du cluster CARA (ex : LUTB)
- **Stéphane CHATELIN** : Directeur de l'association négawatt
- **Alexandre ALLARD** : Consultant sénior à Algoé consulting
- **Lucie VERCHERE** : Chargée de missions Prospective et Dialogue public au Grand Lyon
- **Xuan Thao DO KHAC** : Chargée de missions Développement Durable à la ville de Villeurbanne
- **Etienne VIENOT** : Chargé de missions à Auvergne–Rhône-Alpes Energie Environnement, en charge de l'OREGES
- **Pierre HEMON** : Conseiller de la Métropole de Lyon, membre de la Commission Permanente « Mobilités actives »
- **Marie-Pierre VAGNOT** : Coordinatrice d'ATMO Auvergne Rhône-Alpes
- **Anouk DESOUCHES** (Chargée de missions développement durable en charge des questions stratégiques au Grand Lyon), **Pierre SOUARD** (Responsable Service Mobilité Urbaine au Grand Lyon), **Catherine CLAVEL** (Chargée de missions développement durable en charge de l'observatoire du développement durable au Grand Lyon)

Annexe 4 : Grille d'entretien IDPA :

Objectif personnel de la démarche :

Choisir et justifier les indicateurs environnementaux de mon outil de simulation.

Pour répondre à cet objectif, deux questions plus larges se posent :

Quel est l'état de connaissance et d'usage des indicateurs environnementaux de la mobilité quotidienne de personne ?

Quelles sont les attentes des acteurs en matière d'indicateurs environnementaux de la mobilité pour les années à venir ?

Je vais donc réaliser des entretiens semi-directifs auprès de divers acteurs qui produisent ou utilisent des indicateurs environnementaux pour la mobilité de personne. Les acteurs seront choisis et caractérisés selon trois grands paramètres :

- Leur positionnement dans la chaine de décision et d'action dans lesquelles circulent les différents indicateurs (étude préliminaire, analyste, décideurs, études de suivi).
- Leur échelle spatiale d'analyse ou d'action (local, communal, Grand Lyon, Aire urbaine, département, région, national).
- Leur secteur (institution technique, institution d'élus, entreprises, bureaux d'étude, citoyens, environnement/transport/urbanisme).

La méthode d'entretien est basée sur la méthodologie IDPA (Identification/ Diagnostic/ Prospective/ Action) proposé par Ollagnon, Montbel et Viel. Cette méthode est principalement utilisée dans l'audit patrimonial afin de dégager des actions possibles qui concilient l'ensemble des attentes des acteurs. Cette méthodologie permet à l'auditionné de présenter la situation tel qu'il la perçoit, puis de faire sa propre réflexion de cette situation avec un regard sur l'avenir. Avec à la fin des propositions d'actions de la part de l'auditionné. Afin d'atteindre l'objectif de cette démarche d'entretiens, cette méthodologie permettra de faire ressortir les attentes, les freins et les motivations des différents acteurs sur la notion de représentativité de l'environnement.

À la suite de cette démarche autoréflexive, plusieurs types de résultats, montrant différents enjeux, différentes échelles, seront présentés aux acteurs afin de voir leurs réactions.

I. Identification de la situation, des acteurs et des problèmes vus par l'auditionné

I1- Enjeux et indicateurs environnementaux qu'il rencontre dans sa fonction

On cherche ici à savoir quelle est la taille du champ environnemental perçu et utilisé par l'acteur auditionné.

Formulation(s) de la question : Quels sont les indicateurs environnementaux liés à la mobilité que vous rencontrez ? Et quels sont les enjeux que vous associez à ces indicateurs ? Rencontrez-vous d'autres enjeux environnementaux non représentés par un indicateur ?

I2- Échelles spatiales et temporelles des indicateurs rencontrés.

Il s'agit avec cette question de savoir dans quelles échelles se jouent, selon la personne auditée, les différents enjeux qu'elle aura cités précédemment.

Formulation(s) de la question : À quelles échelles spatiales et temporelles les indicateurs que vous utilisez sont-ils valables ?

I3- Composantes de la mobilité prises en compte dans ces indicateurs.

On interroge ici la personne auditionnée sur le périmètre fonctionnel du système étudié. L'acteur est-il plutôt sur une logique de flux, technologique, économique, sociale … L'auditionné peut être amené à discuter des approches systémiques ou analytiques qu'il met en place ou qu'il rencontre.

Formulation(s) de la question : Quelles sont les composantes de la mobilité que vous évaluez dans vos études/qui sont évaluées dans vos études ? Quels types de mobilité évaluez-vous/sont évalués ?

I4- Source des indicateurs utilisés ou créés.

Cette question permet à l'auditionné de parler des institutions avec qui il travaille pour récolter les informations environnementales. De la confiance qu'il a dans ses sources.

Formulation(s) de la question : Quels sont les sources d'information (logiciel, organisme…) que vous utilisez pour produire vos indicateurs environnementaux/qui vous fournissent les indicateurs que vous utilisez ? Et quel est votre niveau de confiance dans ces sources ?

I5- Communication de ces indicateurs avec les autres acteurs.

En lien avec la question précédente, celle-ci s'interroge sur les interactions entre les acteurs de la chaine de décision et de création de connaissances environnementales.

Formulation(s) de la question : Quelles sont vos relations avec vos sources d'information ou de données ? De même quelles sont vos relations avec les personnes qui utilisent vos résultats environnementaux ou avec qui vous échangez vos résultats ?

D. Diagnostic

L'objectif de ce registre de la grille IDPA est d'amener la personne auditée à réfléchir à l'ensemble des actions qui sont menées à propos du sujet abordé, et de voir en quoi elles répondent ou non aux problèmes évoqués dans la partie Identification.

D1- Quels sont les acteurs actifs dans l'institution d'indicateur et/ou dans la (co-)construction d'indicateurs, quelles sont leurs actions, et quelle est votre évaluation de ces actions ?

L'auditionné est amené ici à présenter les acteurs qui sont à la base de l'utilisation d'indicateurs ou qui participent à l'élaboration de nouveaux indicateurs. Puis il est amené à juger l'action menée par ces derniers.

Formulation(s) de la question : Collaborez – vous avec d'autres acteurs dans le choix et la construction d'indicateurs ? Quels acteurs vous orientent ou imposent vos choix d'indicateurs environnementaux ? Quelles sont leurs actions ? Et sont-elles pertinentes ?

D2- Adéquation entre les échelles des indicateurs et celles des projets/actions/stratégies

À partir des échelles spatiales et temporelles identifiées par la personne dans la première partie, l'auditionné est amené à juger de la pertinence de ces dernières vis-à-vis des sujets et des problématiques évalués.

Formulation(s) de la question : Selon vous les échelles spatiales et temporelles des indicateurs environnementaux que vous utilisez sont-elles en accord avec la finalité du projet/du plan ?

D3- Influence des indicateurs sur ses choix.

Cette question est plus destinée aux décideurs, et elle doit permettre de rendre compte de la force d'un indicateur par rapport à un autre dans le cadre d'une prise de décision.

Formulation(s) de la question : Parmi les indicateurs dont vous disposez pour évaluer un projet/un plan lesquels ont le plus de valeur décisionnelle ? Et quels critères les rendent plus importants ?

D4- Adéquation entre l'offre et la demande d'indicateurs.

Que la question soit adressée à un producteur d'indicateurs ou à un utilisateur, le but est que l'auditionné évalue le processus de co-construction qui existe entre ces deux types d'acteurs.

Formulation(s) de la question : Selon vous l'apport d'information apporté par les différents indicateurs environnementaux liés à un projet/une action/un plan est-il en accord avec la demande faite par les décideurs ?

P. Prospective

L'objectif de la partie de prospective (P) est de voir, après avoir compris quelle était la situation sur l'usage des indicateurs environnementaux et quelles étaient les pistes d'action possibles, comment chaque personne auditée envisage l'avenir, c'est-à-dire qu'elles peuvent être selon elle les évolutions des indicateurs et de leurs usages. L'idée est aussi de se projeter dans l'avenir pour mieux comprendre ce qui se joue aujourd'hui.

P1- Quels sont les horizons spatio-temporels où se joue le cours des choses ?

Ou : Si vous vous projetez dans l'avenir sur la question de la représentativité des enjeux environnementaux, quelles sont les échelles d'espace et de temps qui vous semblent les plus pertinentes/intéressantes à considérer ?

Échelle spatiale : Quels sont les espaces, les entités concernées quand vous vous projetez dans l'avenir ? Cela peut être un espace géographique, politique, le cycle de vie d'un produit, etc. Du local au global, y a-t-il une échelle plus importante ?

Échelle temporelle : Y-a-t-il des échéances (par exemple électorales, en termes de projets, etc.) dont il faut tenir compte pour un éventuel projet/pour se projeter dans l'avenir ?

P2- Quels sont les scénarios tendanciel, négatif et positif ?

Après avoir établi les échelles pertinentes pour se projeter dans l'avenir, l'exercice demandé à la personne auditée consiste à construire trois scénarios révélant ce qu'il pourrait advenir. Chaque scénario doit être une image réaliste de ce qui pourrait arriver (pas de l'utopie ni du rêve, mais une imagination créatrice), et c'est un cheminement (avec une suite de différentes étapes). Ainsi, si la personne auditée donne une image finale sans cheminement, ou à l'inverse une image initiale sans suite, l'auditeur lui demandera d'imaginer les différentes étapes qui soit conduisent à l'image finale, soit en découlent.

Scénario tendanciel : On entend par « scénario tendanciel » l'enchaînement vraisemblable des événements à venir dans le cas où l'on suivrait la tendance actuelle. Autrement dit, la question est la suivante : si la mobilité de personne et la prise en compte des enjeux environnementaux continuent de suivre les tendances actuelles, que va devenir l'évaluation environnementale de la mobilité de personne dans les années à venir ?

Scénario négatif : L'objectif de cette question est d'établir, avec les personnes auditées, un scénario négatif de l'avenir en matière d'usage d'indicateurs environnementaux. Autrement dit, il s'agit de déterminer quels événements négatifs pourraient survenir qui limiteraient la prise en compte de l'environnement dans les décisions. L'objectif est de créer un scénario lié à l'évolution des indicateurs environnementaux et de leurs usages et non des scénarios de mobilités de personnes.

Il peut arriver que le scénario tendanciel établi par la personne auditée soit déjà négatif. Dans ce cas, il est possible de poser la question sous la forme : vous avez établi un scénario tendanciel négatif ; Y a-t-il des événements qui pourraient le rendre encore plus négatif ? Lesquels ? Comment surviendraient-ils ?

Scénario positif : À l'inverse du scénario négatif, l'objectif du scénario positif est d'amener la personne auditée à élaborer la succession des événements positifs qu'elle imagine possible et souhaitable dans l'avenir.

P3- Quels sont les enjeux, les menaces et les atouts ?

Se projeter dans l'avenir en élaborant trois scénarios permet ensuite aux personnes auditées de dégager des idées sur ce qui se joue aujourd'hui sur les indicateurs environnementaux et leurs usages. C'est pour cette raison qu'à ce stade de l'entretien, on cherche à savoir quels sont les enjeux, les menaces et les atouts que la personne auditée retire de l'élaboration de ces scénarios.

Enjeux : Il s'agit de savoir ce qui se « joue » derrière la notion d'évaluation environnementale, ce qui est « en jeu » selon la personne auditée.

Menaces : Qu'est-ce qui pourrait venir menacer la survenue du scénario positif ? Quelles menaces se dégagent de votre scénario négatif, qui viendrait empêcher l'amélioration de la prise en compte de l'environnement dans les décisions ?

Atouts : À l'inverse, sur quels atouts pensez-vous qu'il est possible/souhaitable de s'appuyer pour aller vers le déroulement du scénario positif ?

A. Actions

Après avoir fait avec la personne auditée un état des lieux de la situation (registre I), un état des lieux des pistes d'actions possibles (registre D), puis l'avoir fait se projeter dans l'avenir afin de dégager les enjeux, menaces et atouts liés à la problématique abordée (registre P), ce quatrième registre de la grille IDPA est l'occasion pour les personnes auditées de s'interroger sur les actions à mettre en œuvre (Y en a-t-il ? Lesquelles ? Comment ?).

A1- Quelle peut être l'implication de l'auditionné dans le développement d'indicateurs et de leurs utilisations ?

Quelles actions peuvent être menées par l'auditionné et quelles sont celles qui souhaiteraient mener ?

Formulation(s) de la question : À votre échelle quelles actions pouvez-vous réaliser pour développer de nouveaux indicateurs ou promulguer un indicateur auprès d'autres acteurs ?

A2- Dans la chaine de décision quelles actions devraient/peuvent être menées ?

Ou : Selon vous, quelles actions devraient être mises en place ? Par qui ? Comment ?

Formulation(s) de la question : Dans la chaine d'information et de décision, quelles actions devraient être mises en place pour améliorer la représentativité environnementale ? Par qui ? Comment ?

A3- Quel est votre critère personnel d'une bonne prise en compte des enjeux environnementaux ?

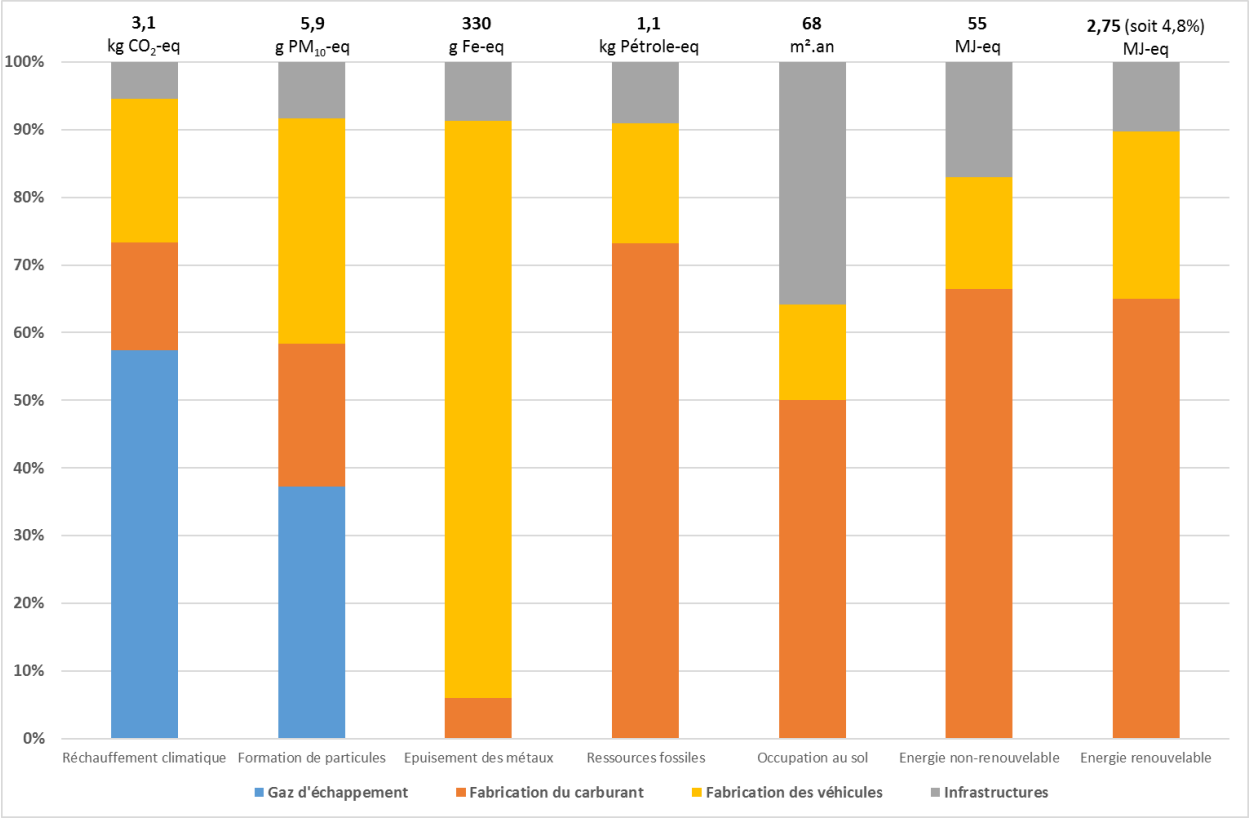
Ou : À quoi verriez-vous, vous personnellement, que tous les enjeux environnementaux sont tous bien pris en considération dans la prise de décision ?

Les critères recherchés sont donc des indicateurs forts de ce qui compte pour les acteurs.

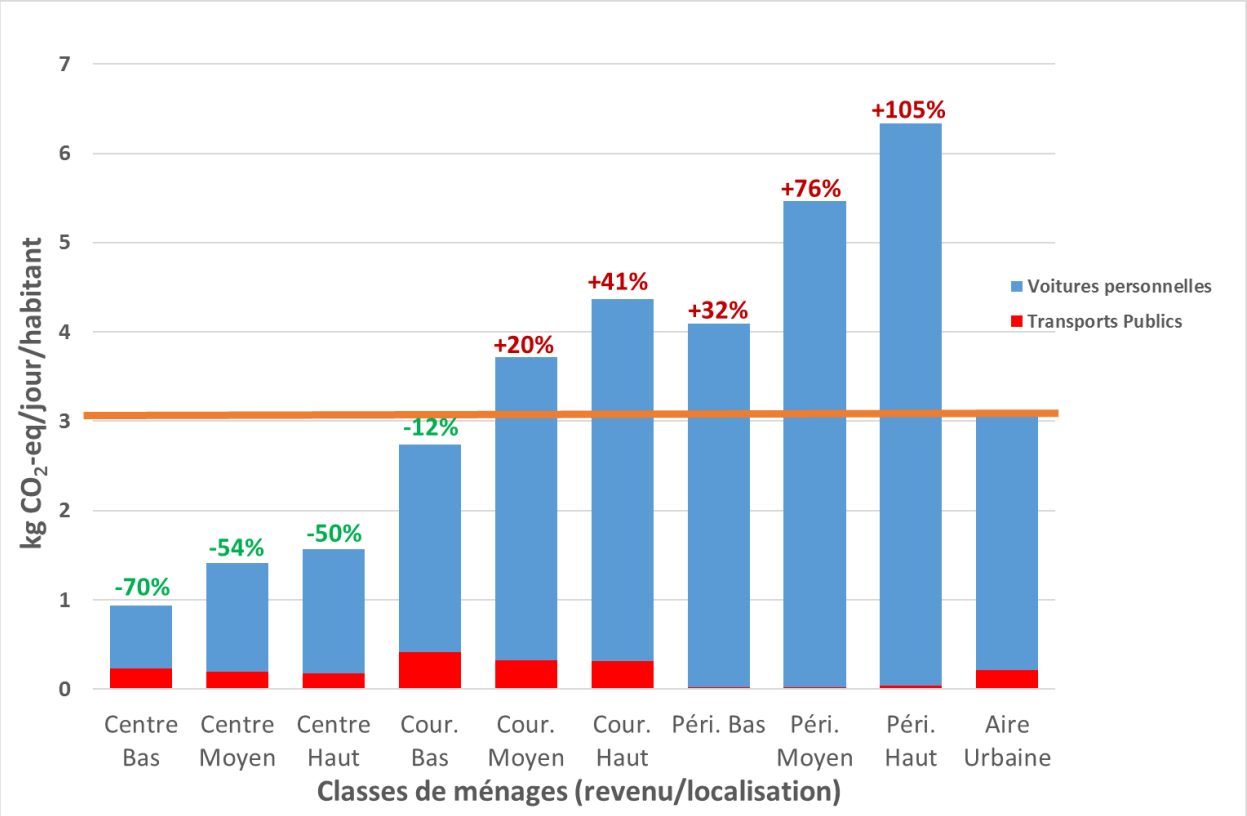
Bonus : Test d'indicateurs auprès des auditionnés.

Le but de cette partie est de recueillir les avis des auditionnés sur 3/4 résultats qui varient certaines échelles et les enjeux environnementaux. Du fait de l'exercice d'autoréflexion réalisé précédemment il sera demandé de fournir un avis par rapport à l'état actuel de l'évaluation environnementale et de ces pratiques, mais aussi sur l'avenir que l'évaluation environnementale peut avoir.

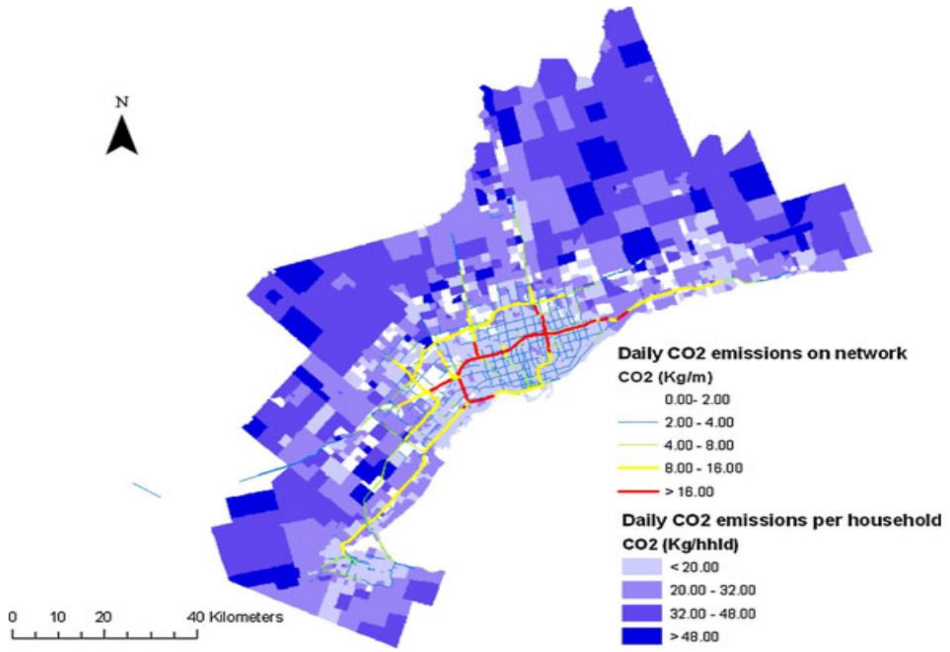
Graphique1 : Impacts environnementaux d'un habitant moyen de l'Aire Urbaine de Lyon pour sa mobilité pour un jour ouvré, en fonction des cycles de vie liés au système de transport.



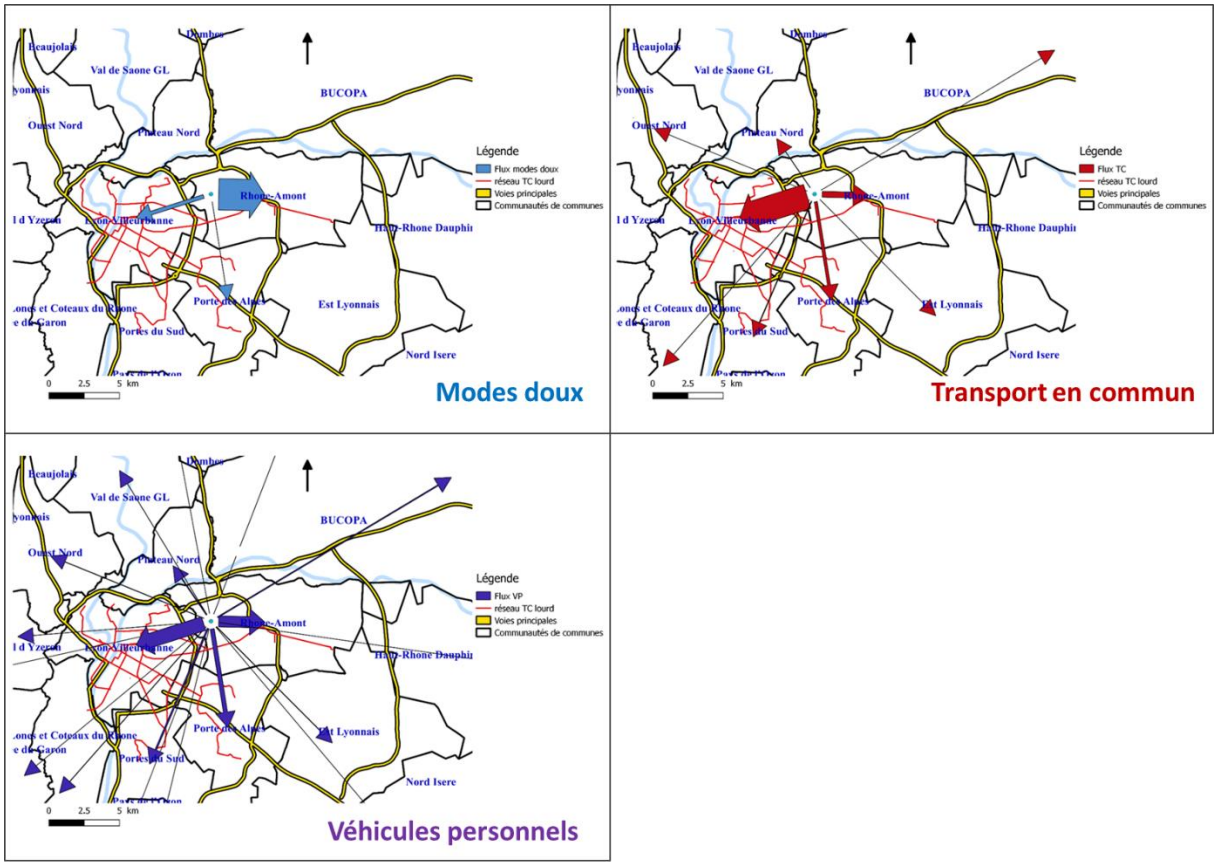
Graphique2 : Émission de gaz à effet de serre pour la mobilité d'un habitant de l'Aire Urbaine de Lyon pour un jour ouvré en fonction de son revenu et de sa localisation.



Graphique3 : Superposition des émissions de CO2 sur les axes routiers et des émissions quotidiennes de CO2 des ménages en fonction de leurs localisations dans le Grand Toronto. (Source : Hatzopoulou et al., 2011)



Annexe 5 : Illustrations de la distribution des sorties de ménages de Vaulx-en-Velin centre pour le travail entre le véhicule personnel, le transport en commun et les modes doux



Source : traitement auteur

Annexe 6 : Principales caractéristiques socio-économiques des ménages et d'utilisation du système de transport pour les 20 découpages de l'aire urbaine de Lyon

	Population	Taille du ménage	Bas revenus	Moyen revenus	Haut revenus	Taux de motorisation	Sorties par habitant	Part modale VP	Part modale TC	Part modale MD	Distance par habitant	Taux remplissage des voitures
Lyon-Villeurbanne	642 410	2	22%	59%	20%	0,86	1,38	40%	25%	35%	8,7 km	1,24
Plateau Nord	77 542	2,3	22%	60%	19%	1,05	1,39	58%	21%	21%	15,3 km	1,27
Rhône-Amont	97 657	2,64	25%	62%	14%	1,16	1,37	64%	14%	22%	17,3 km	1,25
Porte des Alpes	97 869	2,46	23%	62%	15%	1,11	1,36	66%	13%	21%	15,0 km	1,24
Portes du Sud	92 762	2,45	29%	61%	10%	1,06	1,37	63%	15%	22%	15,3 km	1,27
Lones et Coteaux du Rhône	125 028	2,35	19%	61%	20%	1,14	1,37	65%	13%	22%	17,1 km	1,25
Val d'Yzeron	52 482	2,46	13%	58%	29%	1,26	1,37	69%	13%	18%	16,0 km	1,21
Ouest Nord	50 277	2,47	13%	57%	30%	1,33	1,38	68%	12%	20%	16,2 km	1,24
Val de Saône GL	45 266	2,51	16%	61%	23%	1,34	1,36	74%	11%	15%	22,0 km	1,21
BUCOPA	68 842	2,6	16%	63%	21%	1,43	1,31	81%	6%	13%	22,6 km	1,3
Haut-Rhône Dauphinois	43 828	2,68	16%	63%	21%	1,42	1,3	85%	6%	9%	28,7 km	1,29
Est Lyonnais	35 940	2,79	14%	64%	22%	1,5	1,3	83%	7%	10%	21,9 km	1,25
Nord Isère	86 528	2,84	21%	62%	16%	1,42	1,33	81%	7%	12%	28,5 km	1,34
Pays de l'Ozon	22 656	2,68	14%	63%	24%	1,48	1,3	85%	6%	8%	26,5 km	1,25
Rives Rhône	17 094	2,6	15%	65%	20%	1,45	1,29	85%	6%	9%	29,0 km	1,27
Vallée du Garon	26 927	2,61	14%	60%	26%	1,36	1,35	75%	9%	17%	20,7 km	1,19
Ouest Lyonnais	90 566	2,63	14%	61%	25%	1,47	1,3	85%	6%	9%	24,7 km	1,26
Beaujolais	38 935	2,57	13%	61%	26%	1,48	1,3	83%	6%	10%	23,4 km	1,28
Val de Saône	27 120	2,71	15%	62%	23%	1,46	1,29	81%	5%	14%	21,4 km	1,24
Dombes	13 711	2,74	16%	64%	19%	1,53	1,31	85%	8%	7%	26,7 km	1,28

Source : traitement auteur, à partir des données de SIMBAD pour 2009

Annexe 7 : Élaboration de trois scénarios de forme urbaine : monocentrique, étalé et polycentrique

		Scénario Monocentrique	**Scénario Etalé**	**Scénario Polycentrique**
Principe général logements		10 % de l'ensemble des logements disponibles sont retirés de la périphérie, pour en relocaliser 8 % dans le centre et 2 % dans la couronne.	10 % de l'ensemble des logements disponibles sont retirés du centre, pour en relocaliser 8 % dans la périphérie et 2 % dans la couronne.	10 % de l'ensemble des logements disponibles sont retirés du centre, pour en relocaliser 8 % dans la périphérie et 2 % dans la couronne.
Principe général emplois		10 % des emplois sont retirés de la périphérie, pour en relocaliser 5 % dans le centre et 5 % dans la couronne.	10 % des emplois sont retirés du centre, pour en relocaliser 5 % dans la couronne et 5 % dans la périphérie.	10 % des emplois sont retirés du centre, pour en relocaliser 5 % dans la couronne et 5 % dans la périphérie.
Logements	Suppression logements	10 % du parc de logements total est retiré de la périphérie proportionnellement au nombre de logements existants en 2009, afin de conserver l'organisation de l'habitat au sein de la périphérie.	10 % du parc de logements total est retiré du centre proportionnellement au nombre de logements existants en 2009, afin de conserver l'organisation de l'habitat au sein de Lyon-Villeurbanne.	10 % du parc de logements total est retiré du centre proportionnellement au nombre de logements existants en 2009, afin de conserver l'organisation de l'habitat au sein du Lyon-Villeurbanne.

Suite		**Scénario Monocentrique**	**Scénario Etalé**	**Scénario Polycentrique**
Logements	Ajouts logements	8 % du parc de logements est relocalisé dans le centre, proportionnellement à la surface de bâti existant (hors bâtiments à vocation industriels) tout en fixant un seuil de densité maximal de logement par IRIS égal à 15 000 logements/km²). Cette méthode permet de densifier les zones déjà peuplées et préserver les espaces non urbanisables tels que les parcs urbains en gardant des densités de population réalistes. 2 % du parc de logements est relocalisé dans les IRIS de la couronne situés proches de Lyon-Villeurbanne (centroïde à moins de 7km de la préfecture de Lyon), proportionnellement à la surface de bâti existant. Ceci permet de densifier les IRIS de la couronne qui sont les plus proches du centre.	2 % du parc de logements est relocalisé dans les IRIS de la couronne non proches de Lyon-Villeurbanne, proportionnellement à la surface de l'IRIS. Cette méthode permet d'urbaniser les zones les moins accessibles en TC de la couronne. Les IRIS sans aucun logement restent sans logement (pour préserver les parcs notamment). 8 % du parc de logements est relocalisé dans les IRIS de la périphérie, proportionnellement à la surface de l'IRIS. Cette méthode permet de forcer l'étalement urbain sur l'ensemble de la périphérie, y compris les zones peu urbanisées en 2009, sans favoriser les pôles secondaires déjà existants en 2009.	2 % du parc de logements est relocalisé dans les IRIS de la couronne qui ne jouxtent pas les communes de Lyon-Villeurbanne et qui sont reliés à une gare, en fonction de la proximité de la gare et du centroïde de bâti de l'IRIS. 8 % du parc de logements est relocalisé dans les IRIS de la périphérie qui sont reliés à une gare, en fonction de la proximité de la gare et du centroïde de bâti de l'IRIS. Cette méthode permet de densifier les pôles secondaires de périphérie et de la couronne accessibles en TC dans la logique du TOD.

Suite		**Scénario Monocentrique**	**Scénario Etalé**	**Scénario Polycentrique**
Emplois	Suppression emplois	10 % du nombre total d'emplois sont retirés de la périphérie, proportionnellement au nombre d'emplois existants en 2009, afin de conserver l'organisation de l'emploi au sein de la périphérie.	10 % du nombre total d'emplois sont retirés du centre, proportionnellement au nombre d'emplois existants en 2009, afin de conserver l'organisation de l'emploi au sein du centre.	10 % du nombre total d'emplois sont retirés du centre, proportionnellement au nombre d'emplois existants en 2009, afin de conserver l'organisation de l'emploi au sein du centre.
	Ajouts emplois	5 % du nombre d'emplois sont relocalisés dans le centre proportionnellement au nombre d'emplois de 2009. Cette méthode permet de concentrer l'emploi dans les zones d'emplois déjà existantes. 5% du nombre d'emplois sont relocalisés dans la couronne proportionnellement au nombre d'emplois de 2009.	5 % du nombre d'emplois sont relocalisés dans la couronne proportionnellement à la somme du nombre d'emplois de 2009. Cette méthode permet de diffuser l'emploi dans les zones où il était déjà présent en 2009. 5% du nombre d'emplois sont relocalisés dans la périphérie proportionnellement au nombre d'emplois de 2009.	5 % du nombre d'emplois sont relocalisés dans la couronne en fonction de la proximité de la gare et du centroïde de bâti de l'IRIS (selon la même méthode que pour les nouveaux logements). Cette méthode permet de concentrer les emplois autour des zones qui sont accessibles en TC et dans lesquelles des nouveaux logements ont également été positionnés. 5 % du nombre d'emplois sont relocalisés dans la périphérie en fonction de la proximité de la gare et du centroïde de bâti de l'IRIS (selon la même méthode que pour les nouveaux logements).

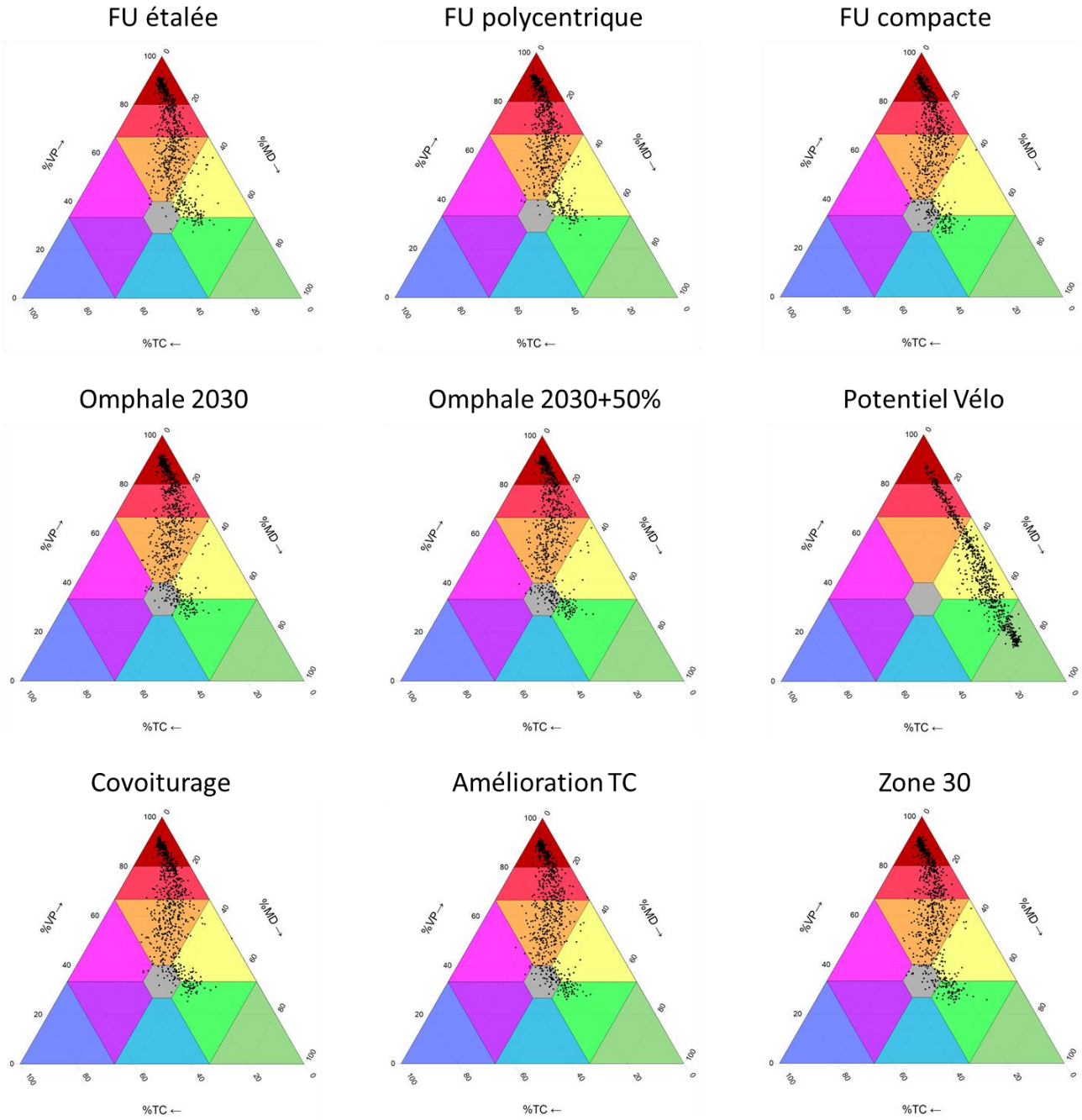
Source : Pelé (2018)

Annexe 8 : Répartitions de la population et des emplois des trois scénarios de forme urbaine suivant le découpage en 20 zones administratives

	Référence 2009		FU étalée		FU compacte		FU polycentrique	
	Population	Emplois	Population	Emplois	Population	Emplois	Population	Emplois
Lyon-Villeurbanne	642 179	407 318	475 707 (-26%)	328 129 (-19%)	788 413 (+23%)	439 239 (+8%)	480 727 (-25%)	328 223 (-19%)
Plateau Nord	77 618	24 658	76 910 (-1%)	26 272 (+7%)	85 110 (+10%)	27 164 (+10%)	77 968 (0%)	27 992 (+14%)
Rhône-Amont	97 815	43 705	98 824 (+1%)	50 838 (+16%)	100 880 (+3%)	46 907 (+7%)	94 677 (-3%)	44 573 (+2%)
Porte des Alpes	97 709	59 827	99 600 (+2%)	65 711 (+10%)	101 808 (+4%)	64 105 (+7%)	99 946 (+2%)	61 505 (+3%)
Portes du Sud	92 823	53 574	92 803 (0%)	61 052 (+14%)	98 701 (+6%)	57 512 (+7%)	96 964 (+4%)	63 282 (+18%)
Lones et Coteaux du Rhône	124 878	48 994	124 748 (0%)	55 333 (+13%)	130 666 (+5%)	51 883 (+6%)	132 715 (+6%)	61 464 (+25%)
Val d Yzeron	52 771	25 601	54 361 (+3%)	28 009 (+9%)	54 821 (+4%)	26 918 (+5%)	55 190 (+5%)	29 353 (+15%)
Ouest Nord	50 326	34 594	52 786 (+5%)	37 860 (+9%)	54 844 (+9%)	35 174 (+2%)	54 333 (+8%)	37 043 (+7%)
Val de Saone GL	45 346	15 846	49 152 (+8%)	17 068 (+8%)	44 499 (-2%)	16 518 (+4%)	55 140 (+22%)	20 179 (+27%)
Grand Lyon (hors centre)	639 286	306 798	649 183 (+2%)	342 141 (+12%)	671 328 (+5%)	326 180 (+6%)	666 934 (+4%)	345 390 (+13%)
BUCOPA	68 710	42 393	97 598 (+42%)	52 089 (+23%)	38 900 (-43%)	29 616 (-30%)	90 952 (+32%)	49 582 (+17%)
Haut-Rhône Dauphinois	43 996	12 562	59 516 (+35%)	15 422 (+23%)	25 020 (-43%)	8 533 (-32%)	43 815 (0%)	12 414 (-1%)
Est Lyonnais	35 796	20 630	44 590 (+25%)	22 729 (+10%)	35 523 (-1%)	22 256 (+8%)	35 376 (-1%)	20 243 (-2%)
Nord Isère	86 604	31 578	105 974 (+22%)	37 530 (+19%)	49 601 (-43%)	22 118 (-30%)	104 813 (+21%)	35 455 (+12%)
Pays de l'Ozon	22 723	8 316	27 613 (+22%)	8 158 (-2%)	22 616 (0%)	8 090 (-3%)	23 607 (+4%)	8 188 (-2%)
Rives Rhône	17 133	7 866	26 545 (+55%)	9 079 (+15%)	9 844 (-43%)	4 466 (-43%)	23 310 (+36%)	9 449 (+20%)
Vallée du Garon	26 939	11 301	29 688 (+10%)	14 657 (+30%)	15 278 (-43%)	6 790 (-40%)	41 512 (+54%)	15 378 (+36%)
Ouest Lyonnais	90 479	32 709	121 166 (+34%)	38 818 (+19%)	51 622 (-43%)	21 230 (-35%)	109 676 (+21%)	35 899 (+10%)
Beaujolais	38 782	20 215	52 372 (+35%)	23 978 (+19%)	22 085 (-43%)	13 124 (-35%)	73 371 (+89%)	29 548 (+46%)
Val de Saône	27 124	11 539	36 731 (+35%)	13 435 (+16%)	15 501 (-43%)	8 265 (-28%)	27 466 (+1%)	10 765 (-7%)
Dombes	13 689	9 165	26 758 (+95%)	10 836 (+18%)	7 709 (-44%)	5 833 (-36%)	31 882 (+133%)	14 558 (+59%)
Périphérie	471 975	208 274	628 550 (+33%)	246 730 (+18%)	293 699 (-38%)	150 323 (-28%)	605 779 (+28%)	241 480 (+16%)

Source : traitement auteur, à partir des données de SIMBAD-ACV

Annexe 9 : Parts modales moyennes des résidents des IRIS de l'aire urbaine de Lyon suivant les scénarios simulés



Source : traitement auteur, à partir des données de SIMBAD-ACV

Annexe 10 : Émissions de GES par habitant suivant le découpage en 20 zone de l'aire urbaine de Lyon et des différents scénarios

Émissions de GES par habitant (kg CO_2-eq)	Référence	FU étalée	FU polycentrique	FU compacte	Omphale 2030	Omphale 2030 +50%	Potentiel Vélo	Covoiturage	Amélioration TC	Zone 30
Lyon-Villeurbanne	1,46	1,44	1,45	1,64	1,35	1,32	1,10	1,37	1,44	1,39
Plateau Nord	2,83	2,84	2,75	3,14	2,76	2,68	2,43	2,71	2,79	2,74
Rhône-Amont	3,58	3,47	3,48	3,74	3,46	3,51	3,20	3,37	3,56	3,65
Porte des Alpes	3,13	3,05	3,02	3,16	3,05	2,99	2,65	2,94	3,00	3,18
Portes du Sud	3,08	3,00	2,86	3,09	2,92	2,90	2,62	2,88	2,96	3,09
Lones et Coteaux du Rhône	3,52	3,37	3,36	3,49	3,34	3,32	2,99	3,25	3,40	3,57
Val d Yzeron	3,38	3,26	3,34	3,37	3,27	3,31	2,91	3,19	3,30	3,37
Ouest Nord	3,32	3,37	3,48	3,33	3,12	3,10	2,88	3,12	3,21	3,27
Val de Saone GL	4,75	4,82	4,71	4,85	4,61	4,61	4,44	4,47	4,70	4,84
Grand Lyon (hors centre)	3,38	3,32	3,30	3,44	3,25	3,23	2,93	3,17	3,29	3,40
BUCOPA	4,71	5,01	4,63	4,71	4,51	4,59	4,44	4,49	4,62	4,65
Haut-Rhône Dauphinois	6,33	7,33	6,55	5,63	6,24	6,14	6,10	6,13	6,30	5,92
Est Lyonnais	4,92	5,23	5,03	4,67	4,79	4,83	4,69	4,75	4,93	5,03
Nord Isère	5,62	6,14	5,81	4,65	5,47	5,47	5,38	5,33	5,55	5,59
Pays de l'Ozon	5,78	5,98	5,92	5,69	5,53	5,61	5,43	5,59	5,86	6,18
Rives Rhône	6,46	7,13	6,64	6,28	6,58	6,41	6,28	6,23	6,51	6,92
Vallée du Garon	4,55	4,39	4,20	4,58	4,35	4,27	4,14	4,27	4,36	4,53
Ouest Lyonnais	5,46	5,83	5,58	5,45	5,60	5,57	5,27	5,22	5,50	5,57
Beaujolais	5,17	5,37	5,29	5,14	4,98	4,91	4,91	4,76	4,98	5,14
Val de Saône	4,86	5,14	5,21	4,53	4,84	4,81	4,51	4,55	4,89	4,98
Dombes	6,04	6,39	5,87	6,22	6,12	5,87	5,86	5,62	5,88	6,02
Périphérie	5,38	5,79	5,44	5,09	5,30	5,27	5,13	5,12	5,34	5,39

(Suite) Émissions de GES par habitant (kg CO_2-eq)	Référence	Petit gabarit	EURO 6	Electrique (2012)	Electrique (2030)	Electrique (Gaz)	Electrique (renouvelable)	Gaz (5%)	Biogaz
Lyon-Villeurbanne	1,46	1,33	1,46	1,26	1,27	1,38	1,24	1,52	0,93
Plateau Nord	2,83	2,55	2,84	2,45	2,46	2,68	2,41	2,93	2,20
Rhône-Amont	3,58	3,23	3,59	3,12	3,13	3,41	3,06	3,71	2,94
Porte des Alpes	3,13	2,83	3,14	2,73	2,74	2,98	2,68	3,24	2,23
Portes du Sud	3,08	2,80	3,09	2,71	2,72	2,94	2,67	3,19	2,46
Lones et Coteaux du Rhône	3,52	3,17	3,53	3,03	3,04	3,33	2,97	3,64	2,80
Val d'Yzeron	3,38	3,01	3,39	2,85	2,86	3,17	2,79	3,51	2,65
Ouest Nord	3,32	2,97	3,32	2,81	2,82	3,12	2,75	3,44	2,58
Val de Saône GL	4,75	4,27	4,77	4,09	4,11	4,52	4,01	4,93	3,87
Grand Lyon (hors centre)	3,38	3,05	3,39	2,92	2,93	3,21	2,87	3,50	2,66
BUCOPA	4,71	4,26	4,70	4,11	4,13	4,51	4,04	4,87	3,99
Haut-Rhône Dauphinois	6,33	5,70	6,32	5,49	5,52	6,06	5,39	6,56	5,30
Est Lyonnais	4,92	4,40	4,93	4,20	4,22	4,66	4,11	5,10	3,80
Nord Isère	5,62	5,07	5,62	4,93	4,95	5,39	4,84	5,81	4,68
Pays de l'Ozon	5,78	5,19	5,80	4,91	4,94	5,47	4,81	5,99	3,74
Rives Rhône	6,46	5,85	6,45	5,63	5,65	6,18	5,53	6,69	5,24
Vallée du Garon	4,55	4,08	4,54	3,91	3,93	4,32	3,84	4,72	3,62
Ouest Lyonnais	5,46	4,93	5,45	4,73	4,75	5,22	4,64	5,67	4,54
Beaujolais	5,17	4,71	5,16	4,54	4,55	4,97	4,46	5,35	4,38
Val de Saône	4,86	4,37	4,86	4,21	4,22	4,65	4,12	5,05	4,11
Dombes	6,04	5,53	6,04	5,37	5,39	5,83	5,29	6,24	5,29
Périphérie	5,38	4,85	5,38	4,67	4,69	5,14	4,59	5,57	4,42

Source : traitement auteur, à partir des données de SIMBAD-ACV