

**QUELS IMPACTS DE LA FORME URBAINE
SUR LES MOBILITÉS QUOTIDIENNES ?
UNE APPROCHE PAR LA SIMULATION POUR UNE
COMPARAISON MULTIDIMENSIONNELLE
APPLIQUÉE AU TERRITOIRE LYONNAIS**

NICOLAS PELÉ, CYRILLE FRANCOIS, JEAN-PIERRE NICOLAS
LAET, UMR 5593
UNIVERSITÉ DE LYON

1. INTRODUCTION

L'organisation spatiale des villes a profondément évolué durant le XX^e siècle et les décideurs publics sont amenés à faire des choix sur les politiques d'aménagement des territoires urbains qui peuvent avoir des conséquences importantes sur les comportements de mobilité. Mais existe-t-il un paradigme d'aménagement qui mériterait d'être privilégié ? Celui de la ville compacte, de la ville étalée, de la ville polynucléaire ?... Cette multiplication des modèles d'organisation spatiale résulte de la prise de conscience des impacts économiques, sociaux et environnementaux de l'étalement urbain permis par la généralisation de l'automobile dans nos sociétés.

Dans les années 90, le premier modèle préconisé a été celui de la ville compacte, en opposition à l'étalement urbain et en réaction à la crainte d'une hyperconsommation des sols et d'une dévitalisation des centres urbains (EWING, HAMIDI, 2015). La corrélation mise en avant dans les travaux de NEWMAN et KENWORTHY (1989), montrant que les habitants des villes les plus denses consommeraient moins de carburant pour leur mobilité quotidienne, a ouvert la voie à de très nombreux travaux sur le sujet. La forme urbaine compacte a été défendue avec l'idée que la proximité, la mixité et l'offre de transports rendues possibles par la densité contribuent à la diminution des distances parcourues et à la promotion des modes actifs (DUPUY, 1995 ; EWING, 1994). Il a cependant été montré par la suite que cette variable de densité ne peut tout expliquer à elle seule, et que d'autres paramètres tels que le coût des transports, la taille de l'agglomération, la compacité et le design urbain apparaissent tout aussi importants (CERVERO, KOCKELMAN, 1997 ; CIRILLI, VENERI, 2009). La forme urbaine compacte a également été critiquée pour les externalités qu'elle occasionne, comme la congestion, la concentration de la pollution, ou les contraintes et les coûts sur le marché foncier et l'offre immobilière (GORDON, RICHARDSON, 1997). La démocratisation de la voiture et la réduction des contraintes sur l'usage des sols, au contraire, rendent les territoires périurbains attractifs et étendent la zone d'influence des agglomérations (BRUEGMANN, 2006).

L'extension d'une agglomération peut prendre différentes formes : diffuse avec l'agrandissement de la tache urbaine à partir du centre, ou polycentrique avec la création ou l'absorption de pôles secondaires dans l'aire urbaine (MANGIN, 2004 ; WIEL, 1999 ; WIEL, 2010). Les phénomènes d'étalement urbain et de métropolisation enrichissent ainsi le débat sur la forme urbaine compacte *versus* diffuse en introduisant une distinction entre son caractère monocentrique *versus* polycentrique. Une agglomération monocentrique possède une centralité importante qui favorise les déplacements radiaux alors qu'une agglomération polycentrique réduit la force attractive du centre principal, mais soulève la question de la cohérence d'ensemble : organisée par zones spécifiques (zones résidentielles, commerciales et d'activités, « *edge cities* »), cette dernière entraîne un rallongement des distances parcourues et ne résout pas le problème de la dépendance automobile (SCHWANEN et alii, 2004) ; en revanche, le modèle du *Transit Oriented Development* qui s'inscrit dans le courant du *New Urbanism* cherche à densifier les centres secondaires tout en augmentant la mixité fonctionnelle et l'accessibilité afin de créer des quartiers à la fois vivants et accessibles au centre de l'agglomération (CALTHORPE, 1993 ; TALEN, 2013). Ce modèle d'aménagement couplant maîtrise du foncier et offre de transport veut renforcer les possibilités de choix modal et réduire la dépendance à l'automobile.

Dans ce contexte, l'interrogation principale de cet article porte sur la

manière de comparer différents modèles de forme urbaine et leurs impacts, afin d'apporter de nouveaux éléments au débat scientifique sur les interactions entre transport et urbanisme.

En suivant ce fil directeur, la discussion présentée ici se décompose en trois grandes parties. La première fait un retour sur la littérature pour affiner le questionnement initial et proposer des principes méthodologiques directeurs pour mieux l'appréhender. La seconde partie rend compte du cas d'étude retenu, en présentant le modèle d'interaction transport-urbanisme SIMBAD calibré sur l'aire urbaine de Lyon, les scénarios modélisés et la méthodologie d'analyse. Enfin, la troisième partie expose et discute les résultats obtenus en les décomposant par types de territoires urbains et suivant les trois dimensions du développement durable.

2. SIMULER POUR COMPARER...

2.1. UNE APPROCHE PAR LA SIMULATION

Dans le cadre des débats sur l'impact de la forme urbaine sur la mobilité, de nombreux travaux adoptent une démarche empirique a posteriori à l'aide d'études comparatives entre villes ou, plus localement, à l'aide d'une comparaison entre zones d'une même agglomération, tandis que d'autres reposent sur des approches a priori basées sur le recours à des modèles urbains, théoriques ou de type transport-urbanisme.

Beaucoup d'études portent sur une agglomération particulière, pour laquelle les caractéristiques spatiales et socio-économiques sont bien maîtrisées, et où la mobilité quotidienne est connue ou peut être estimée à l'aide d'enquêtes locales. Leur intérêt est ainsi de pouvoir disposer d'une méthodologie de recueil de données robuste. Par contre, il est difficile d'effectuer des généralisations à partir de ces études, car elles portent sur un contexte socio-économique et culturel ainsi qu'une organisation du système de transport spécifiques. Sans prétendre à l'exhaustivité, on trouvera des exemples de cette démarche à travers les travaux d'APPERT (2004) appliqué à Londres, CAMAGNI et alii (2002) à Milan, DEYMIER et alii (2013) à Bordeaux ou MILAKIS et alii (2015) à San Francisco.

Une deuxième catégorie de travaux croise les données de différentes villes afin de comparer leurs modèles d'organisation spatiale et fonctionnelle et de les relier avec les comportements de mobilité des résidents. Ces études comparatives permettent d'analyser des situations très contrastées et sont développées à la fois aux niveaux nationaux (voir notamment AGUILERA et alii, 2004 et LE NÉCHET, AGUILÉRA, 2012 en France, SCHWANEN et alii, 2004 aux Pays-Bas ou TRAVISI et alii, 2010 en Italie) et international (voir NAESS, 2012 dans les pays d'Europe du Nord, KENWORTHY, 2003 au niveau mondial ou la méta-analyse d'EWING et CERVERO, 2010 qui généralise les conclusions de 38

travaux centrés chacun sur une agglomération particulière, principalement en Amérique du Nord). Cependant la multiplicité des terrains ajoute de nombreux paramètres pouvant influencer la mobilité qu'il faut intégrer dans l'analyse, ce qui peut être parfois techniquement difficile. Ainsi, la taille de l'agglomération, la géographie et l'historique de la ville, de même que des différences culturelles et socio-économiques, complexifient l'appréhension de la relation entre forme urbaine et mobilité. Dans le cas des études internationales, la question de la comparabilité des données et des échelles peut également se poser avec plus d'acuité.

D'autres études analysent la relation entre forme urbaine et mobilité à travers des modèles simulant le fonctionnement urbain avec des niveaux de finesse variables. Les modèles simplifiés permettent de prendre en considération plus facilement diverses politiques d'aménagement du territoire, mais posent la question du réalisme des comportements de mobilité (K_{II} et alii, 2014). Les modèles LUTI -*Land Use and Transportation Interaction*- utilisés à des fins prospectives sont utiles dans une optique d'aide à la décision, en partant d'un état initial connu d'une agglomération puis en simulant les conséquences de différents scénarios d'aménagement (voir par exemple ANTONI et alii, 2015 sur Besançon et Lyon, NUZZOLO et alii, 2014 sur Rome, ECHENIQUE et alii, 2012 sur les régions de Londres et de Tyne and Wear, dans le nord de l'Angleterre ou AW, 2010 sur l'Île-de-France). L'approche prospective par la modélisation permet de garder un terrain d'étude unique, mais ses résultats restent par contre dépendants de toutes les hypothèses des scénarios pouvant affecter les mobilités (projections démographiques, économiques, comportementales, technologiques ou d'usage du sol).

Pour mieux contrôler l'ensemble de ces écueils et apporter ainsi un éclairage plus précis dans les débats sur les liens entre forme urbaine et mobilités quotidiennes, cet article propose dès lors une approche reposant sur la modélisation LUTI avec une logique de simulation, mais hors de toute volonté prospective. Nous nous posons alors la question des effets d'une variation de la forme urbaine au sein d'une ville donnée, toutes choses égales par ailleurs (taille et structure de la population, facteurs explicatifs des comportements de mobilité et de localisation, technologies utilisées, niveau de richesse et activité économique, etc.).

L'objectif est ainsi de faire ressortir les principaux effets de l'organisation spatiale urbaine sur les mobilités quotidiennes. Dans ce cadre, l'ensemble des modes traditionnels (voiture particulière, transports collectifs et modes doux) doivent être modélisés afin de capter les phénomènes de reports modaux, ainsi que l'ensemble des motifs de déplacements afin de ne pas réduire la mobilité quotidienne à la mobilité domicile-travail (WIEL, 1999).

2.2. INTÉGRER LES TROIS PILIERS DU DÉVELOPPEMENT DURABLE DANS UNE VISION MULTI-ÉCHELLE

La question de la partie précédente relève du « comment » comparer pour faire ressortir les liens entre forme urbaine et mobilité. Il convient également de s'interroger sur le « quoi » comparer pour rendre compte des impacts des différentes formes urbaines.

Comme le soulignent ECHENIQUE et alii (2012), les débats sur les enjeux de la forme urbaine restent souvent centrés sur la question environnementale et négligent parfois les dimensions économique et sociale. L'éclairage apporté reste tronqué et les enseignements tirés apparaissent trop partiels pour une réflexion sur les choix de politiques publiques à mener. La solution de suivre les variations d'une variable motrice en amont des divers impacts dans la chaîne de causalité (JOMARD, GUDMUNDSSON, 2010) est intéressante, comme l'usage de la distance parcourue en voiture par personne et par jour, qui donne à la fois une idée des variations des impacts environnementaux et des dépenses des ménages pour leur mobilité -cet indicateur a été beaucoup pris dans la littérature sur ce sujet et se retrouve par exemple dans la méta analyse d'EWING et CERVERO (2010). Cependant, elle est conçue pour apporter une vision globale et synthétique, et elle ne permet pas d'avoir une représentation fine des différentes variations et des éventuelles tendances contradictoires qui peuvent exister suivant les impacts alors que la richesse des résultats d'un modèle LUTI peut en rendre compte.

Par contre, le principe de disposer d'indicateurs complémentaires qui rendent compte à la fois des dynamiques à l'œuvre en termes d'occupation de l'espace et de mobilités quotidiennes et des conséquences de ces dynamiques, a été retenu dans le travail présenté ici. Le cadre des réflexions autour du développement durable déclinées dans le domaine de l'urbanisme et de ses interactions avec les transports et les mobilités quotidiennes (BANISTER, 2008 ; CAMAGNI et alii, 1998 ; LITMAN, 2016; NICOLAS et alii, 2003 ; WIEL, 2010) est également idéal pour embrasser une vision élargie des impacts.

Beaucoup de ces travaux insistent aussi sur une différenciation des impacts en fonction des échelles d'observation (BANISTER, 2008 ; NIJKAMP et alii, 1991). Cette vision multi-échelle implique tout d'abord la prise en compte d'impacts locaux et plus globaux à travers différents indicateurs. Par exemple, sur les aspects environnementaux, les résultats globaux contribuent à la mesure d'enjeux mondiaux comme le réchauffement climatique, mais il est tout aussi nécessaire d'observer les variations entre zones pour repérer d'éventuelles concentrations des nuisances (DIEBOLT et alii, 2005). De même, il peut y avoir des différences importantes dans les évolutions des coûts des ménages (dépenses monétaires, budgets temps, etc.) que de simples moyennes ne repèrent pas (NICOLAS, PELÉ, 2017). La mise en évidence des questions

d'équité sociale et territoriale (MANCIBO, 2010 ; ZUINDEAU, 2006) nécessite donc de disposer d'indicateurs fins que, là encore, la modélisation LUTI permet de prendre en considération dans le domaine des mobilités quotidiennes. Ensuite, une désagrégation spatiale permet de prendre en compte à la fois l'organisation globale du territoire et l'environnement construit du lieu de résidence. Par exemple, les travaux de TRAVISI et alii (2010), qui portent sur 7 métropoles italiennes, montrent que les déterminants locaux ont des impacts différents selon la forme urbaine globale : la densité et la diversité sont plus significatives pour les métropoles polycentriques, alors que la distance au centre et le caractère rural de la zone de résidence sont plus performants pour les métropoles monocentriques.

Cette première discussion a permis d'affiner et de remettre en perspective notre questionnement général sur la manière de comparer différents modèles de formes urbaines et leurs impacts : la proposition qui en ressort passe par la simulation de différentes formes urbaines avec un modèle LUTI permettant d'estimer leurs impacts sur les mobilités quotidiennes, observées à l'aune des trois dimensions du développement durable. Dans ce cadre, l'objectif de la suite de l'article est de tester l'intérêt d'une telle approche. Cela a été fait à travers une application au cas de l'aire urbaine de Lyon, à l'aide du modèle SIMBAD. C'est l'opérationnalisation concrète de ces principes qui est décrite dans la partie suivante, avant de présenter les résultats obtenus dans la dernière partie.

3. UNE APPLICATION SUR LE CAS DE L'AIRES URBAINE DE LYON GRÂCE AU MODÈLE TRANSPORT-URBANISME SIMBAD

Le modèle SIMBAD utilisé dans cette étude a été développé et calibré sur l'aire urbaine de Lyon. Il est présenté dans un premier temps, avant de décrire plus précisément les trois scénarios de forme urbaine retenus pour la comparaison et d'explicitier les indicateurs utilisés pour mesurer les impacts et rendre compte des sorties du modèle.

3.1. LE MODÈLE SIMBAD DÉVELOPPÉ SUR L'AIRES URBAINE DE LYON

SIMBAD est une plateforme de modélisation des interactions entre transport et urbanisme, développée au sein du Laboratoire Aménagement Économie Transports (NICOLAS et alii, 2013). Elle est conçue à l'échelle du bassin de vie de l'agglomération de Lyon et son périmètre permet d'appréhender une bonne diversité de territoires et de populations (3 330 km² pour 1 720 000 habitants).

Le modèle est conçu avec une visée stratégique, pour évaluer des politiques de transport et d'urbanisme au niveau agrégé de l'agglomération et de ses bassins versants, et pour analyser les interactions entre les diverses composantes du système urbain (localisation, mobilité, démographie, économie...).

En revanche, l'utilisation des outils développés dans la plateforme URBANSIM (WADDELL, 2002) pour rendre compte des choix de localisation permet à SIMBAD de développer une représentation désagrégée des comportements, qui repose sur des micro-simulations au niveau des ménages et des entreprises. Par exemple, dans le cas des ménages, leur relocalisation se base tout d'abord sur une probabilité de déménagement puis sur un choix de l'IRIS¹ de résidence. Ce choix est notamment fonction de leurs caractéristiques socio-économiques, de critères d'accessibilité à l'emploi et aux établissements secondaires et de la composition socio-démographique de l'IRIS afin de rendre compte du phénomène d'entre-soi (BOUZOUINA, 2008 ; HOMOCIANU, 2009). Cette approche désagrégée permet de spécifier les résultats au niveau fin des différents ménages de l'aire urbaine. De plus, tous les ménages sont décrits par leurs caractéristiques socio-économiques, qui sont présentes à la fois dans le recensement et dans l'Enquête Ménages Déplacements (dont le revenu par unité de consommation, la taille du ménage, l'âge de la personne de référence, sa catégorie socio-professionnelle, le nombre d'enfants et le nombre d'actifs). Le taux de motorisation par ménage est également utilisé, car il joue un rôle important dans le choix modal et contribue aux dépenses des ménages pour leurs mobilités quotidiennes. Une démarche similaire est utilisée pour la localisation des entreprises en fonction de leur secteur d'activité et de leur taille.

Les étapes de la modélisation des mobilités ont été réalisées au niveau des boucles (une sortie du domicile aller-retour caractérisée par un motif principal) et la robustesse des phases de génération, distribution et choix modal a été testée sur une période de 20 ans (CABRERA, 2013).

L'intégration d'un logiciel d'affectation du trafic (VISUM) dans la chaîne de modélisation de SIMBAD permet ensuite d'estimer la répartition des flux sur l'ensemble du réseau (véhicules particuliers et transports en commun). Les déplacements sont distribués sur l'ensemble des tronçons où les caractéristiques de trafic sont décrites (charge, vitesse, longueur) permettant de quantifier les consommations de carburants et les différents impacts environnementaux associés.

Enfin, la stabilité des résultats a été vérifiée et la robustesse du modèle à un niveau agrégé d'une centaine de zones (pour 777 IRIS) a été testée à partir d'une simulation sur la période 1999-2011 pour laquelle les données observées étaient disponibles (NICOLAS et alii, 2013 ; VALLAT-SANCHEZ, 2016).

Ainsi, de nombreux paramètres peuvent être introduits dans le modèle : démographiques, avec l'évolution du nombre de ménages et de la composition de ces derniers ; économiques, avec l'évolution du nombre d'emplois

¹ IRIS : « Îlots Regroupés pour des Indicateurs Statistiques » : unité géographique utilisée par l'INSEE pour les recensements de population, elle constitue la brique de base en matière de diffusion des données infracommunales (Cf. <https://www.insee.fr/fr/metadonnees/definition/c1523>).

et des secteurs d'activités ; de comportements de mobilité, qui décrivent la demande de mobilité des ménages et leur usage des différents modes de transports ; de localisation des logements et des surfaces d'activités ; liés au réseau de transport, tant en termes d'offre que de tarification. Comme stipulé précédemment, nous avons fait le choix ici d'utiliser le modèle comme outil de simulation et non de prospective afin d'isoler l'effet de la localisation de la population et des emplois sur la mobilité quotidienne. Pour cela un certain nombre de ces paramètres ont été fixés afin de travailler « toutes choses égales par ailleurs ».

Cela se traduit par :

- . un nombre et une composition des ménages ainsi qu'un nombre et une composition d'emplois et d'entreprises constants, ce qui permet de s'affranchir de l'effet de la taille de l'agglomération et de la population ;
- . des taux de mobilité, de motorisation et des préférences de choix modal invariants pour les différents scénarios, qui correspondent à ceux observés lors de l'Enquête Ménages Déplacements Lyonnaise de 2006 et qui sont fonction des caractéristiques socio-économiques et de la localisation des ménages. Ceci permet d'avoir un cadre stable des préférences de mobilité et représentatif du cas de l'agglomération lyonnaise ;
- . des préférences de localisation des ménages et des entreprises en fonction de leurs caractéristiques fixes ; les données utilisées issues du recensement INSEE et du répertoire SIRENE de 2010 fournissent là aussi les bases d'une modélisation des comportements bien calibrée sur le territoire d'étude ;
- . un réseau de transport quasi-constant, le seul changement apporté portant sur le scénario polycentrique (Cf. sous-partie suivante) où un réseau de lignes de TER est modélisé. Le design urbain et l'accessibilité aux transports restent ainsi constants ;
- . un contexte économique et technologique général identique, afin de ne pas influencer sur les choix modaux et la composition du parc automobile.

Enfin, les modifications de la structure urbaine proposées dans les scénarios modélisés doivent rester d'une ampleur limitée afin que les données de comportements mesurées sur l'aire urbaine de Lyon restent valides pour pouvoir mesurer des variations sur la mobilité quotidienne toutes choses égales par ailleurs. Nous avons ainsi choisi de conserver 90 % de la structure urbaine stable et de ne modifier que 10 % de la localisation des logements et des activités, aboutissant ainsi à des scénarios contrastés. C'est ce qui est explicité et présenté dans la partie suivante.

3.2. LA SIMULATION DE FORMES URBAINES CONTRASTÉES APPLIQUÉES AU CAS LYONNAIS

3.2.1. Principes généraux retenus pour les scénarios

Trois scénarios ont été construits afin d'apporter un éclairage sur le débat actuel sur les formes urbaines et la mobilité quotidienne. La dynamique urbaine d'une grande agglomération est souvent une combinaison de densification et d'étalement urbain (BUISSON et alii, 2001). Faire le choix de réaliser des scénarios contrastés en séparant les deux phénomènes permet de faire ressortir les grands enjeux qui sont derrière ces deux dynamiques. De plus, l'objectif ici n'est pas de construire « la » forme urbaine optimale du point de vue de la mobilité, mais bien de proposer et de tester une méthodologie pour estimer les liens entre forme urbaine et mobilité quotidienne et, d'un point de vue appliqué, les conséquences des choix de politiques d'urbanisme et d'aménagement favorisant une forme urbaine plutôt qu'une autre à travers une série d'indicateurs liés à la mobilité quotidienne.

Dans cet esprit, trois scénarios ont été élaborés en s'inspirant des travaux déjà réalisés lors du projet PREDIT Vilmodes (ANTONI et alii, 2015) qui consistait à tester divers scénarios de prospective à Lyon et Besançon et d'en mesurer les impacts sur la mobilité quotidienne. Les principes retenus ici ont dès lors été les suivants :

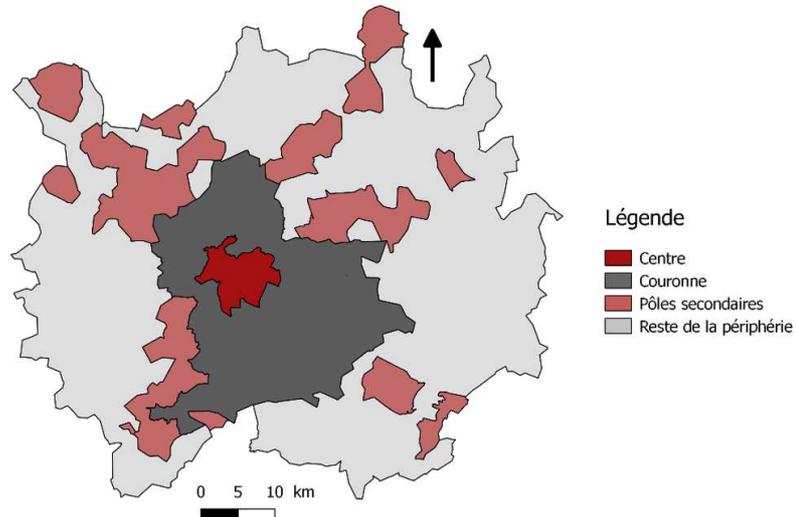
- . un scénario d'aire urbaine étalée, avec une localisation plus importante de la population et des emplois dans les zones éloignées du centre et du réseau de transports collectifs urbains, sans phénomène prononcé de polarisation en périphérie. Ce type de forme urbaine peut s'interpréter comme la résultante d'une absence de politique d'aménagement du territoire ;
- . un scénario d'aire urbaine polycentrique, pensé comme une alternative à la ville étalée, avec un renforcement en termes de population et d'emplois des pôles secondaires périphériques, organisés le long d'un réseau structurant de lignes ferroviaires. Il traduit une volonté politique de gestion de l'étalement urbain selon la logique de *Transit Oriented Development* (CALTHORPE, 1993). De nombreuses agglomérations s'orientent vers ce type d'aménagement, il est donc intéressant d'en mesurer les impacts ;
- . un scénario d'aire urbaine monocentrique, concentré sur un cœur d'agglomération dense, résultant d'une volonté d'arrêt de tout phénomène d'étalement urbain et de densification de la population et des activités. Il vise à renforcer la centralité de l'agglomération.

3.2.2. Construction des scénarios de forme urbaine

Ces trois tendances de forme urbaine ont été déclinées sur l'aire urbaine de Lyon en jouant sur la répartition des logements et des emplois disponibles au sein des 777 IRIS constitutifs de ce territoire. La structure observée en 2009

avec les données INSEE (recensement de la population et fichier SIRENE) a servi de base de référence, à partir de laquelle 10 % des logements et des emplois ont été relocalisés. Ces relocalisations sont effectuées en distinguant trois grands types de zones, avec le « centre », représentant les communes de Lyon et Villeurbanne, la « couronne », correspondant au reste du Grand Lyon et la « périphérie », définie comme le reste de l'aire urbaine (Figure 1). Par ailleurs, au sein de la périphérie, des pôles secondaires ont été identifiés, définis comme les IRIS situés à moins de 2 km d'une gare ferroviaire.

Figure 1 : Découpage du territoire :
trois zones concentriques et pôles secondaires



Centre :
Communes de Lyon
et Villeurbanne
(60 km²)

Couronne :
Périmètre du Grand-Lyon hors
Lyon-Villeurbanne
(670 km²)

Périphérie :
Reste du périmètre de l'aire
urbaine INSEE 1999
(2 580 km²), dont 600 km² de
pôles secondaires

En pratique, les logements ont été déplacés selon les règles suivantes :

- . dans le scénario monocentrique, 10 % de l'ensemble des logements ont été retirés de la périphérie, proportionnellement au nombre de logements existant dans chaque IRIS en 2009 afin de conserver la répartition spatiale de l'habitat au sein de ces territoires. Ensuite, 8 % ont été relocalisés dans le centre urbain de Lyon-Villeurbanne, proportionnellement à la surface de bâti non industriel existant et en fixant un seuil de densité maximale afin de densifier les zones déjà peuplées et de préserver les espaces non urbanisables ; les 2 % restants ont été relocalisés en couronne, dans les IRIS les plus proches du centre et proportionnellement à la surface de bâti existant ;
- . dans le scénario étalé, 10 % de l'ensemble des logements ont été retirés de Lyon-Villeurbanne, proportionnellement au nombre de loge-

ments existants dans chaque IRIS en 2009 afin de conserver la répartition spatiale de l'habitat au sein du centre. Ensuite, 8 % ont été relocalisés en périphérie, proportionnellement à la surface des IRIS afin de forcer l'étalement urbain sur l'ensemble du périurbain, y compris les zones peu urbanisées en 2009 ; les 2 % restants ont été relocalisés en couronne, dans les IRIS les plus éloignés du centre et toujours proportionnellement à la surface des IRIS ;

. dans le scénario polycentrique, 10 % de l'ensemble des logements ont été retirés de Lyon-Villeurbanne, proportionnellement au nombre de logements existants dans chaque IRIS en 2009 afin de conserver la répartition spatiale de l'habitat au sein du centre. Ils ont été relocalisés à l'intérieur des pôles secondaires périphériques qui sont desservis par une gare ferroviaire, à raison de 8 % en périphérie et 2 % en couronne.

Ainsi, l'offre de logements dans le centre est significativement plus importante dans le scénario monocentrique en comparaison des deux autres scénarios d'étalement et l'offre de logements dans la périphérie de l'aire urbaine est égale dans les scénarios étalé et polycentrique, mais davantage concentrée dans les pôles et à proximité de gares dans le cas polycentrique.

La répartition de l'emploi suit une méthodologie similaire afin de respecter la philosophie des scénarios. Cependant, toutes les activités ne peuvent être transférées aisément du centre vers la périphérie, comme dans le cas de certains emplois du tertiaire supérieur, et réciproquement pour l'industrie ou la logistique par exemple. Pour respecter cette contrainte, la couronne a été utilisée comme zone tampon pour accueillir une partie de ces activités :

. dans le scénario monocentrique, 10 % de l'ensemble des emplois ont été retirés de la périphérie, proportionnellement aux emplois existants dans chaque IRIS en 2009 afin de conserver la répartition spatiale de l'emploi au sein de ces territoires. Ensuite, 5 % ont été relocalisés dans le centre et 5 % en couronne, proportionnellement aux emplois par IRIS en 2009 afin de maintenir les zones d'emploi déjà existantes ;

. dans le scénario étalé, 10 % de l'ensemble des emplois ont été retirés de Lyon-Villeurbanne, proportionnellement aux emplois existants par IRIS en 2009 afin de conserver la répartition spatiale de l'emploi au sein du centre. Ensuite, 5 % ont été relocalisés en couronne et 5 % en périphérie, proportionnellement aux emplois par IRIS en 2009 afin de maintenir les zones d'emploi déjà existantes ;

. dans le scénario polycentrique, 10 % de l'ensemble des emplois ont été retirés de Lyon-Villeurbanne, proportionnellement aux emplois existants en 2009 afin de conserver la répartition spatiale de l'emploi au sein du centre. Ensuite, 5 % ont été relocalisés en couronne et 5 % en périphérie en fonction de la proximité avec une gare ferroviaire.

3.2.3. Caractérisation des formes urbaines obtenues

Les scénarios de simulation ainsi construits aboutissent à des organisations spatiales contrastées. Le Tableau 1 présente les quatre formes urbaines finales (référence 2009, étalée, monocentrique et polycentrique) avec la proportion de la population selon la zone de résidence, complétée de deux indices spatiaux qui caractérisent la compacité et la centralité des différentes situations :

- . la distance moyenne entre deux individus donne une indication sur le caractère plus ou moins monocentrique de la forme urbaine (LE NÉCHET, 2015). Elle a été estimée à partir de la répartition de la population sur une grille carrée uniforme d'un pas de 100 mètres de côté. Cet indicateur est particulièrement adapté pour comparer des aires urbaines de même taille et de même population, et permet d'aborder la notion de dispersion de l'agglomération ;
- . la part de la population et des emplois localisés dans les pôles secondaires renseigne sur le phénomène de polarisation/diffusion en périphérie.

Tableau 1 : Caractéristiques des quatre scénarios de forme urbaine

	Scénario de référence	Scénario monocentrique	Scénario étalé	Scénario polycentrique
Population dans le centre	37 %	45 %	27 %	27 %
Population dans la couronne	40 %	42 %	41 %	41 %
Population dans la périphérie	24 %	14 %	32 %	32 %
Dont les pôles secondaires	15 %	15 %	13 %	25 %
Distance moyenne entre 2 individus	15,1 km	12,2 km	18,0 km	17,5 km

Ainsi, le scénario d'une aire urbaine à tendance monocentrique concentre davantage les logements et les activités au cœur de l'agglomération de Lyon (aboutissant à 45 % des individus et 48 % des emplois dans le centre, contre 37 % et 45 % dans le scénario de référence). Ceci se retrouve à travers une distance moyenne entre deux individus nettement plus faible (12,2 km vs. 15,1 km) et une densité moyenne de Lyon-Villeurbanne plus importante (12 500 vs. 10 200 hab/km²). Les distances moyennes entre deux individus obtenues pour le scénario de référence sont cohérentes avec celles obtenues par LE NÉCHET et AGUILÉRA (2012), dont la valeur pour l'aire urbaine de Lyon est de 15,3 km.

Les scénarios étalé et polycentrique répartissent davantage la population et les emplois dans la périphérie dans les mêmes proportions (32 % de la population et 24 % des emplois contre 24 % de la population et 20 % des emplois dans le scénario de référence). En revanche, par construction, les activités et les logements sont davantage concentrés autour des gares dans le

scénario polycentrique alors qu'ils sont répartis de manière plus diffuse sur l'ensemble des communes périurbaines pour le scénario étalé : la densité dans les pôles secondaires est presque doublée dans le cas du scénario polycentrique par rapport au scénario étalé (750 vs. 400 hab/km², pour 350 hab/km² dans la situation de référence).

Les différents scénarios proposés se traduisent donc par un parc de logements et un nombre d'emplois stables au niveau global de l'aire urbaine de Lyon, mais répartis de manière variable. A partir de ces contraintes spatiales, le modèle SIMBAD localise les différents acteurs du territoire -les ménages en fonction de leurs caractéristiques socio-économiques et démographiques, et les entreprises en fonction de leur secteur d'activités et de leur taille- puis simule les mobilités sur le périmètre modélisé pour un jour ouvrable de semaine (NICOLAS et alii, 2013).

La simulation avec SIMBAD va dès lors se traduire par des impacts à trois grands niveaux principaux :

- . au niveau global, changement de la répartition spatiale des ménages et des activités ;
- . pour chaque localisation donnée, changement de la composition des ménages et des activités ;
- . à localisation et type de ménages donnés, changement des comportements de mobilité des ménages, en modifiant leur taux de motorisation, la distribution de leurs déplacements dans l'aire urbaine et leur choix modal, du fait des modifications des accessibilités, liées tout à la fois aux changements de localisations et aux éventuelles modifications des conditions de trafic ainsi que de l'offre de transport collectif dans le cas du scénario polycentrique.

Enfin, les simulations ont été réalisées de manière progressive pour éviter des changements brutaux pouvant être mal gérés dans les calculs et conduire à des localisations non abouties des différents types de ménages et d'entreprises. Ainsi, elles se basent toutes sur la situation connue en 2009 pour les localisations (recensement de la population et base SIRENE) et 2006 pour les comportements de mobilité (date d'une enquête ménages déplacements lyonnaise). A partir de cette situation, les différentes contraintes d'usage du sol ont été introduites de manière linéaire en 30 itérations dans le modèle quasi-dynamique qu'est SIMBAD, afin que les interactions entre usage du sol et transports soient prises en compte de manière progressive pour éviter des chocs importants dans les calculs et qu'on tende vers un équilibre.

La partie suivante s'attache dès lors à présenter les indicateurs retenus pour décrire les conséquences des variations de formes urbaines ainsi modélisées.

3.3. UNE MÉTHODOLOGIE D'ANALYSE COMPOSITE : COMPORTEMENTS DE MOBILITÉ, DÉPENSES DE MOBILITÉ DES MÉNAGES ET IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX

Les calculs de SIMBAD sont opérés à un niveau désagrégé. Ainsi, même si les résultats produits ont vocation à être analysés de manière agrégée, cette agrégation peut être réalisée de diverses manières suivant les besoins de l'analyse : par grands types de zones par exemple, mais aussi par types de ménages, par modes, etc. En reprenant les principes mis en place dans la première partie, les mobilités quotidiennes générées par le modèle transport-urbanisme ont permis de développer trois séries d'indicateurs caractérisant chacun des scénarios :

- . Les dépenses des ménages pour leur mobilité quotidienne. Elles incluent l'ensemble des postes de dépenses et pas seulement celles liées au carburant, qui ne représentent qu'environ 30 % du budget mobilité en France (INSEE, 2014). Ces indicateurs fourniront ainsi une image des dimensions économique et sociale, vues du point de vue des ménages. Elles mériteront d'être complétées ultérieurement par des dépenses de la collectivité pour avoir une vision complète de la dimension économique.
- . Les impacts environnementaux de ces mobilités. Ils sont établis à l'aide d'une analyse en cycle de vie (ACV), ce qui permet d'avoir une vision étoffée des différents impacts imputables aux ménages et des sources de ces impacts. Par exemple, pour l'automobile, les gaz d'échappement représentent entre 70 % et 85 % du total des émissions de GES (ADEME, 2013 ; SPIELMANN, ALTHAUS, 2007).
- . Les comportements de mobilité des ménages. Ils se situent en amont des deux familles d'indicateurs précédentes et permettent d'éclairer les dynamiques à l'œuvre derrière les résultats socio-économiques et environnementaux obtenus.

Par ailleurs, ces différentes analyses sont réalisées à la fois au niveau de l'aire urbaine et au niveau fin des ménages afin de comparer la durabilité des trois scénarios de façon globale puis de discriminer les résultats en fonction de la localisation des ménages. L'unité d'analyse de cette étude est « par habitant par jour ouvrable ».

3.3.1. Analyse des comportements de mobilité quotidienne

La première partie de l'analyse porte sur les comportements de mobilité quotidienne des ménages de l'aire urbaine lyonnaise. Son objectif est de fournir une image quantifiée de cette mobilité afin de permettre une comparaison entre les scénarios, puis entre les différentes classes de ménages. Elle permet aussi de rendre compte de certaines contraintes plus spécifiques (les longues distances des ménages actifs du périurbain par exemple) et de la dimension sociale de la mobilité quotidienne.

Pour ce faire, il a été choisi de s'intéresser à la demande de déplacements, à l'usage du système de transport, au budget temps ainsi qu'au taux de motorisation des ménages. Les indicateurs retenus sont alors les suivants :

- . la demande de déplacements, mesurée en nombre de boucles réalisées par jour ;
- . l'usage du système de transport, caractérisé par la distance totale parcourue par un habitant ainsi que par la part modale de la voiture particulière, exprimée respectivement en kilomètres par jour et en pourcentage des boucles réalisées ;
- . la distance parcourue en voiture conducteur, exprimée en kilomètres par jour ;
- . le budget temps, assimilé à la durée totale de déplacement tous modes de transports confondus et exprimé en minutes par jour ;
- . enfin le taux de motorisation correspond au taux d'équipement automobile de la population, exprimé en nombre de véhicules pour 1 000 habitants.

L'ensemble de ces indicateurs décrit la mobilité des individus et permet d'expliquer les indicateurs environnementaux et de dépenses des ménages explicités ci-dessous.

3.3.2. Analyse économique des dépenses des ménages

La deuxième catégorie d'indicateurs porte sur l'estimation des dépenses de mobilité quotidienne des ménages. La méthodologie utilisée est adaptée de celle élaborée et présentée dans NICOLAS et alii (2012), puis reprise par PELÉ et NICOLAS (2016). Il s'agit d'une méthode d'analyse désagrégée par ménage, basée sur le nombre de sorties du domicile par mode et par motif, de la distance parcourue en voiture conducteur et de la motorisation du ménage. Elle prend en compte les dépenses fixes liées à la motorisation telles que l'achat, l'assurance et l'entretien de l'automobile, les dépenses de carburant, de stationnement de jour et de nuit ainsi que celles liées à l'achat de titres de transports collectifs. Les données utilisées sont issues de l'Enquête Budget de Famille 2006 pour l'estimation des prix liés à la motorisation par type de ménage, de COPERT V pour la consommation de carburant et enfin de prix spécifiques à l'agglomération lyonnaise pour le stationnement et les titres de transports collectifs.

Les indicateurs mis en place sont :

- . le budget mobilité total par personne en euros ;
- . le budget total imputable à l'automobile ;
- . le budget total imputable aux transports collectifs ;
- . le budget en carburant, qui est plus spécifiquement relié aux distances parcourues en voiture conducteur.

3.3.3. Analyse environnementale en cycle de vie

La troisième partie de l'analyse évalue les impacts environnementaux de la mobilité des habitants. Trois enjeux environnementaux, le climat, la qualité de l'air et l'énergie, ont été retenus car ils sont placés au cœur du Plan Climat-Air-Energie Territorial (PCAET) devenu obligatoire avec la loi de Transition Énergétique pour la Croissance Verte de 2015. En effet, ce plan est central dans le développement d'une métropole, car il sert de référence dans les principaux documents de planification du territoire (SCoT, PDU, PLU). De ce fait, trois indicateurs sont présentés dans cette analyse :

- . le potentiel de réchauffement climatique, exprimé en CO₂ équivalent qui rassemble l'ensemble des gaz à effet de serre émis ;
- . le potentiel de formation de particules, exprimé en PM₁₀ équivalent qui inclut à la fois les particules émises de moins de 10 µm et les polluants secondaires comme les oxydes d'azote contributeurs de la formation de particules ;
- . et la consommation d'énergie primaire exprimée en kWh qui inclut à la fois la consommation d'énergie finale, mais aussi l'ensemble des pertes énergétiques.

La méthode d'analyse de ces indicateurs est basée sur une analyse de cycle de vie (ACV) appliquée au système de transport (véhicules particuliers et transports collectifs) élaborée par FRANÇOIS et alii (2017). Ce choix est motivé par le fait qu'une part importante des impacts environnementaux a lieu en dehors de la phase d'usage des véhicules (CHESTER, HORVATH, 2009 ; LE FEON, 2014). Le périmètre de l'ACV inclut donc l'usage des véhicules, la production des carburants, la production, la maintenance et la fin de vie des véhicules et des infrastructures de transport. Le calcul des impacts environnementaux est effectué au niveau des tronçons afin de prendre en compte la vitesse de circulation et le type d'infrastructure utilisée. Les facteurs d'émissions et de consommation sont issus de l'outil européen COPERT V (NTZIACHRISTOS et alii, 2014). Les coûts environnementaux sont ensuite ramenés au niveau des ménages, permettant de lier les émissions aux émetteurs et à leurs caractéristiques socio-économiques et spatiales.

3.3.4. Complémentarité des trois approches

L'intérêt de compléter l'analyse des comportements de mobilité à l'aide d'une analyse des dépenses des ménages et d'une analyse des impacts environnementaux en réalisant une ACV est de proposer un outil qui intègre les trois piliers du développement durable dans l'évaluation des mobilités urbaines. Ceci permet notamment de :

- . expliciter certaines corrélations entre les comportements de mobilité et les impacts environnementaux et les dépenses de mobilité ;
- . quantifier les impacts environnementaux de la mobilité quotidienne en ne les transformant pas en valeur monétaire afin de garder une

- perception des impacts à la fois locale (émission de particules) et globale (émissions de GES et consommation d'énergie primaire) ;
- . identifier les enjeux de vulnérabilité économique des ménages, en englobant l'ensemble des dépenses liées à l'automobile et aux transports collectifs ;
- . mettre en avant des enjeux qui ne découlent pas directement des comportements de mobilité, mais qui sont liés plus généralement au système de déplacements, notamment avec la prise en compte des dépenses de stationnement qui ne transparaissent pas directement à travers les taux de motorisation (mais dépendent également des politiques de stationnement et des choix des ménages) et l'approche en analyse en cycle de vie.

En revanche, divers points ne sont pas abordés dans ce travail, qu'il nous semblerait intéressant de développer par la suite pour compléter l'image des dynamiques et des conséquences des mobilités quotidiennes : 1) la question du coût du système de transports urbains, dans une logique d'identification des financeurs de la mobilité quotidienne, avec notamment la prise en compte des investissements et du fonctionnement du réseau de voirie et de transports collectifs ; 2) le budget logement des ménages pour prendre en compte l'ensemble du coût résidentiel au sein duquel pourrait s'opérer des arbitrages entre coût du logement et coût de la mobilité (HAAS et alii, 2006 ; COULOMBEL, LEURENT, 2013 ; MARESCA, MERCURIO, 2014) ; et 3) une spatialisation fine des impacts environnementaux et des populations exposées.

4. MESURER LES EFFETS DE LA FORME URBAINE : DES IMPACTS DIVERSIFIÉS SUIVANT LES INDICATEURS

Comme nous l'avons vu précédemment, l'implémentation des scénarios de forme urbaine dans le modèle d'interaction transport-urbanisme entraîne trois principales étapes de changements. La première concerne la répartition spatiale des logements et des activités présentée préalablement lors de la description des scénarios. La deuxième correspond à la recomposition de la structure des ménages et des types d'activités au sein de chaque zone, liée notamment, dans le modèle, aux évolutions des accessibilités. Enfin, le troisième temps renvoie au changement des comportements de mobilité des ménages à localisation et type de ménages donnés, du fait des distances à parcourir dans cette ville partiellement redessinée, des évolutions des conditions de trafic et des changements de l'offre de transports collectifs dans le cas du scénario polycentrique.

Nous avons donc analysé les stratégies de localisation des ménages selon les quatre scénarios présentés précédemment, avant d'étudier les effets de la forme urbaine à l'échelle de l'aire urbaine sur les différents indicateurs mis en place. Une compréhension des modifications des comportements à locali-

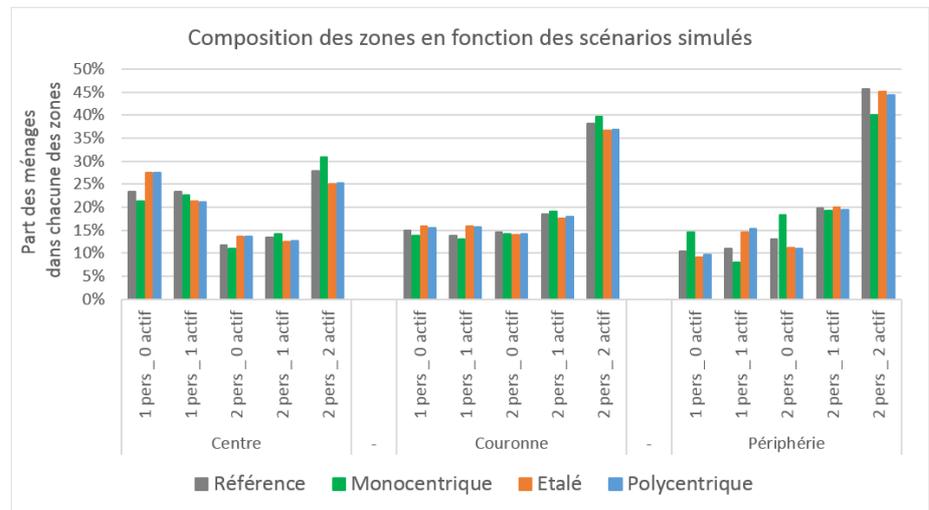
sation donnée clôture cette partie.

4.1. STRATÉGIES DE LOCALISATION DES MÉNAGES SUIVANT LES SCÉNARIOS

Du fait des choix méthodologiques du modèle SIMBAD (Cf. Section 3.1), chacun des scénarios modélisés fait apparaître des stratégies particulières de localisation des ménages.

Dans le cas du scénario monocentrique, les ménages actifs ont tendance à se regrouper davantage dans le centre de l'agglomération du fait du recentrement de l'emploi (Figure 2), à l'inverse des scénarios étalé et polycentrique. Ces différences dans la répartition de la population suivant les scénarios sont importantes à considérer, car elles impactent les indicateurs de mobilité, du fait entre autres que les individus actifs ont des taux de mobilité et un usage de la voiture plus important que les personnes inactives.

Figure 2 : Composition des zones en fonction des scénarios simulés



La modification de la répartition de la population fait également apparaître une augmentation du prix de l'immobilier dans le cas du scénario monocentrique (+5 % en moyenne). Même si ce phénomène n'est pas au cœur de la présente analyse, il fait partie des débats sur les formes urbaines avec la notion du coût résidentiel (GORDON, RICHARDSON, 1997 ; MARESCA, 2013) et des phénomènes de gentrification (RENNE et alii, 2016), et il mérite d'être souligné du fait des enjeux qu'il représente au niveau de l'économie globale du système et des ménages de l'aire urbaine.

4.2. ANALYSE AGRÉGÉE : IMPACTS SUR L'ENSEMBLE DE L'AIRE URBAINE

La première partie de l'analyse se base sur la compréhension des variations des indicateurs estimés pour un individu moyen à l'échelle de l'aire urbaine.

Le Tableau 2 regroupe l'ensemble des résultats en fonction du scénario de référence et des trois scénarios de formes urbaines alternatives.

Afin d'analyser ces variations de manière synthétique, elles ont été représentées sous la forme du diagramme en toile d'araignée (Figure 3). Les valeurs indiquées correspondent aux écarts relatifs des indicateurs de chaque scénario par rapport au scénario de référence de Lyon en 2009, scénario représenté sur le cercle en pointillé des valeurs nulles.

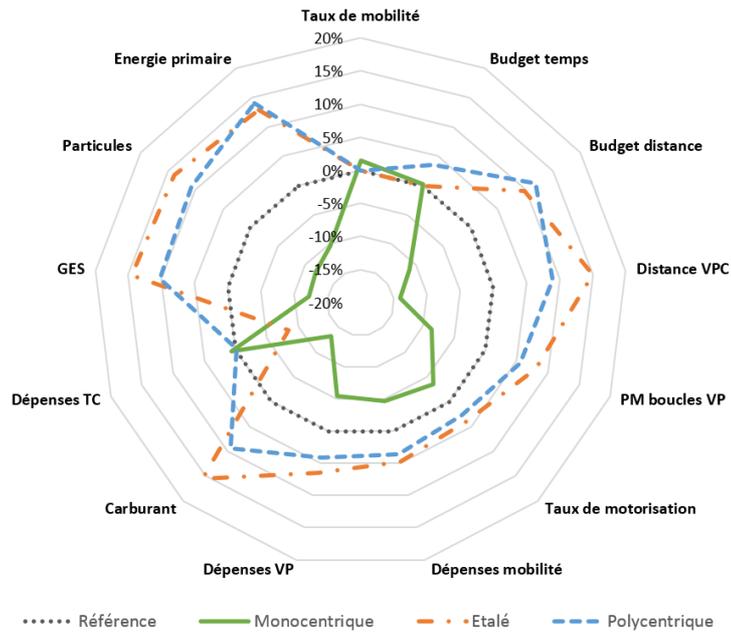
Tableau 2 : Indicateurs de mobilité, de dépenses des ménages et d'impacts environnementaux en fonction des quatre scénarios

	Scénario de référence	Scénario monocentrique	Scénario étalé	Scénario polycentrique
<i>Mobilités</i>				
Budget distance (km/pers/jour)	15,3	13,6	16,8	17,1
Budget temps (min/pers/jour)	44,6	44,7	44,6	46,2
Taux de mobilité (boucle/pers/jour)	1,4	1,4	1,4	1,4
Distance parcourue en voiture conducteur (véhicule.km/pers/jour)	10,0	8,6	11,5	10,9
Part modale déplacements automobile	60,7 %	55,5 %	65,6 %	64,1 %
Taux motorisation (véhicules/1000hab.)	474	457	493	487
<i>Dépenses des ménages</i>				
Dépenses mobilité (€/pers/jour)	3,8	3,6	4,0	3,9
Dépenses automobile (€/pers/jour)	3,4	3,2	3,6	3,5
Carburant (€/pers/jour)	0,8	0,7	1,0	0,9
Dépenses transports collectifs (€/pers/jour)	0,4	0,4	0,4	0,4
<i>Impacts environnementaux</i>				
GES (kg CO ₂ eq/pers/jour)	3,1	2,7	3,6	3,4
Particules (g PM ₁₀ eq/pers/jour)	6,0	5,3	6,9	6,7
Energie primaire (kWh/pers/jour)	15,6	14,0	17,6	17,8

Au niveau de l'aire urbaine, le nombre de boucles par habitant par jour est constant à 1,4 boucles, ce qui est cohérent avec la conservation de la démographie dans les différents scénarios. En revanche, les comportements de mobilité ainsi que leurs impacts environnementaux et économiques varient significativement.

Analysons à présent successivement les impacts d'une concentration en centre-ville, d'un étalement de la population et d'une polarisation de la population en périphérie par rapport au scénario de référence.

Figure 3 : Synthèse des indicateurs par personne en fonction des scénarios de forme urbaine



Lecture : Par rapport au scénario de référence, le budget distance est 11 % plus faible dans le scénario monocentrique, 10 % plus grand dans le scénario étalaé et 12 % plus grand dans le scénario polycentrique

4.2.1. Impacts d'une concentration de la population et des activités dans le centre

La concentration des logements dans le centre de l'aire urbaine a pour conséquence de rapprocher les lieux d'habitation des lieux où se réalisent les activités des individus. Une part plus importante de la population a également accès à un service de transports collectifs urbains (75 % de la population de l'aire urbaine réside à moins de 1 km d'un arrêt contre 65 % dans le scénario de référence). Cette hausse de l'accessibilité est une conséquence des politiques de compaction (NUZZOLO et alii, 2014 ; POUYANNE, 2004).

Ceci entraîne un report modal très important en faveur des transports collectifs et des modes doux : -9 % de part modale de la voiture et -14 % de distance parcourue en voiture conducteur. Étant donné que la vitesse moyenne des transports collectifs est plus faible que celle de la voiture (de l'ordre de 40 % à l'échelle de l'aire urbaine) et que le budget temps est constant, le budget distance tous modes est réduit de 11 %. La baisse des distances en voiture s'accompagne d'une baisse de la dépense en carburant (-13 %), des émissions de GES (-12 %) et de particules fines (-12 %) et de la consommation d'énergie primaire (-10 %) ainsi qu'une légère hausse des dépenses en

transports collectifs (+1 %). Par ailleurs, les ménages du centre étant en moyenne moins motorisés, une baisse de la motorisation de 4 % est observée. Couplée à la baisse de la dépense en carburant, le budget mobilité moyen diminue de 5 %.

A l'échelle de l'aire urbaine, la forme monocentrique apparaît comme la forme la plus économe en termes de dépenses de consommation énergétique des ménages pour la mobilité quotidienne des personnes (EWING, HAMIDI, 2015 ; POUYANNE, 2004). Ces résultats jouent en faveur d'une ville plus compacte, cependant cette échelle d'analyse cache des disparités territoriales qui seront développées dans la Section 4.3.

4.2.2. Impacts d'une diffusion de la population et des activités dans la périphérie

Les résultats sont très différents dans le cas du scénario étalé, avec une hausse de l'usage de l'automobile : +8 % de part modale de la voiture et +15 % des distances parcourues en voiture, soulignant la dépendance automobile de ce type de forme urbaine (DUPUY, 1995). Le budget distance global est ainsi augmenté de 10 %, à mettre en comparaison de la stagnation du budget temps. La hausse des distances parcourues en voiture s'accompagne d'une hausse de la dépense en carburant (+16 %), des émissions de GES (+14 %) et de particules fines (+14 %) et de la consommation d'énergie primaire (+13 %) ainsi qu'une baisse des dépenses en transports collectifs (-8 %). Par ailleurs, les ménages de la périphérie étant en moyenne davantage motorisés, une hausse de la motorisation de 4 % est observée. Couplée à la hausse de la dépense en carburant, la dépense moyenne de mobilité augmente dès lors de 5 %.

L'analyse montre que la forme urbaine étalée est moins économe et plus impactante que le scénario de référence, reprenant ainsi les principales raisons avancées pour justifier plus de contrôle de l'étalement urbain (BRUEGMANN, 2006 ; TRAVISI et alii, 2010). La relation entre distance entre deux individus et consommation d'énergie présentée par LE NÉCHET (2015) est également vérifiée dans notre analyse.

4.2.3. Impacts d'une polarisation de la population et des activités dans la périphérie

La polarisation de la population de périphérie autour de pôles ferroviaires donne des résultats plus nuancés, avec un usage de la voiture plus important que le scénario de référence, mais plus faible que le scénario étalé : +6 % de part modale de la voiture et une hausse de 9 % de distances parcourues en voiture (contre respectivement +8 % et +15 % pour le scénario étalé). L'usage du mode ferroviaire se traduit également par des distances parcourues tous modes plus importantes (+12 %) et un budget temps qui s'allonge légèrement de 4 %.

L'augmentation des distances parcourues en voiture entraîne un budget en carburant en hausse (+9 %), ainsi que des émissions de GES et de particules plus importantes (+10 % et +11 %). Cette progression reste inférieure à celle du scénario étalé, excepté pour la consommation d'énergie primaire (+14 %), car l'ensemble des pertes énergétiques sont prises en compte pour la production de l'électricité nécessaire aux transports en commun dont le train.

Enfin, le taux de motorisation augmente (+3 %), mais plus faiblement que dans le cas du scénario étalé du fait de la polarisation de la population dans des pôles périphériques plus denses. Le budget en transport collectif stagne, du fait des effets contradictoires de la baisse de la population dans le centre de l'agglomération et de l'implantation du réseau ferroviaire. Ces différents mécanismes se traduisent par une hausse du budget mobilité (+4 %).

Les résultats obtenus pour le scénario polycentrique montrent ainsi un usage de la voiture plus fort que le scénario de référence, mais légèrement plus faible que pour le scénario étalé. Ce résultat est en cohérence avec la comparaison des villes européennes de LE NÉCHET et AGUILÉRA (2012), ainsi qu'avec l'approche de simulation de NUZZOLO et alii (2014).

4.3 ANALYSE DÉSAGRÉGÉE : IMPACTS DIFFÉRENCIÉS SELON LE LIEU DE RÉSIDENCE DES MÉNAGES

Cette première analyse des différents scénarios de forme urbaine ne suffit cependant pas pour donner une image du caractère durable ou non de l'agglomération. Elle montre des gains potentiels pour un habitant moyen de l'aire urbaine, mais cache d'importantes disparités en fonction de la localisation des ménages (Cf. Annexe 1).

Dans une volonté d'approche multidimensionnelle, nous avons donc spatialisé les résultats obtenus afin d'apporter des éclairages sur la différenciation des impacts selon la localisation dans l'aire urbaine. En effet, la mise en place d'une politique d'aménagement à l'échelle globale peut avoir des effets différenciés selon la localisation : on peut par exemple supposer qu'une organisation polycentrique tende à faire baisser sensiblement les distances parcourues des ménages de périphérie sans action sur ceux du centre. Il est néanmoins important de préciser que ce travail de spatialisation n'est pas réalisable à un niveau spatial trop fin, étant donné la construction et le calibrage du modèle utilisé. Nous avons donc fait le choix d'analyser les résultats pour trois classes de ménages réparties en fonction de leur localisation : centre, couronne et périphérie.

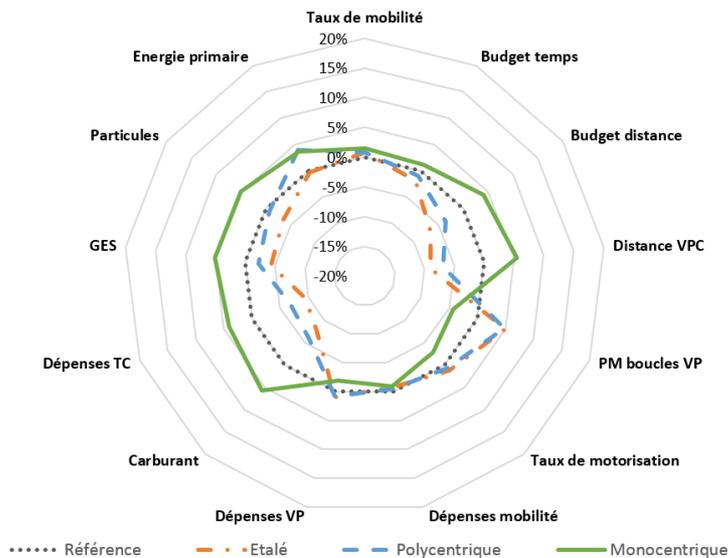
4.3.1. Analyse des ménages du centre

Dans chacun des scénarios, les ménages habitant dans le centre de l'agglomération sont les moins dépendants de la voiture et parcourent le moins de

distance pour leur mobilité quotidienne (8,2 km/jour/personne et 433 véhicules pour 1 000 habitants dans le scénario de référence). Leurs dépenses quotidiennes et leurs impacts environnementaux sont ainsi plus faibles que ceux des ménages plus éloignés du centre de l'agglomération.

Cependant, les trois formes urbaines alternatives simulées affectent différemment les ménages du centre et font ressortir certains enjeux, dont celui de la congestion et du desserrement de l'emploi. La Figure 4 représente les évolutions relatives des indicateurs de mobilité des scénarios monocentrique, étalé et polycentrique par rapport au scénario de référence.

Figure 4 : Synthèse des indicateurs pour les habitants du centre de l'agglomération en fonction des quatre scénarios de forme urbaine



Les variations des indicateurs pour les ménages du centre de l'agglomération dans le cas des scénarios polycentrique et étalé sont similaires et relativement faibles (inférieures à 10 % par rapport au scénario de référence). La voiture est davantage utilisée, avec une part modale de déplacements légèrement plus élevée (+5 %), mais des déplacements en voiture nettement plus courts (de l'ordre de 10 %). Cela s'explique en partie du fait d'une baisse du nombre d'actifs dans le centre, qui réalisent les déplacements les plus longs, et d'autre part d'une meilleure adéquation entre les actifs et l'emploi. Le budget en transports collectifs diminue donc, ainsi que le budget d'achat de carburant et les impacts environnementaux (GES et particules). En revanche, la possession automobile augmente légèrement (+1 %), du fait des plus faibles densités de population. Les dépenses associées à la possession automobile (hors carburant) représentant plus de 70 % du budget mobilité (PELÉ, NICOLAS, 2016), ce dernier stagne pour les ménages du centre.

Dans le cas du scénario monocentrique, les variations sont davantage marquées. La différence de composition des ménages du centre, présentée dans la Section 4.1, explique une partie de cette variation, puisque l'augmentation de la part d'actifs dans le centre compact engendre des distances parcourues plus longues. La distance parcourue en voiture est plus importante (+6 %), avec pour conséquence une hausse des dépenses de carburant (+6 %) et des impacts environnementaux plus forts (de l'ordre de +5 %). Cependant, l'usage de la voiture mesuré en nombre de boucles est en baisse dans la forme monocentrique (-4 %), les modes doux et les transports en commun étant plus utilisés du fait du rapprochement des activités et des ménages qui favorise les modes alternatifs à la voiture. On observe d'ailleurs une hausse des dépenses en transports en commun (+4 %). La motorisation des ménages est en baisse (-3 %), entraînant au total une baisse de 1 % du budget mobilité.

L'effet de congestion attendu dans ce scénario densifié ne ressort pas ici comme la cause principale du rallongement des distances parcourues en voiture, mais une analyse plus détaillée de l'affectation du trafic montre davantage de détours et de chemins alternatifs dans le scénario monocentrique, témoignant de l'augmentation des charges sur les principaux tronçons du centre de l'agglomération.

4.3.2. Analyse des ménages de la couronne

Les simulations réalisées dans cette étude affectent peu les contraintes des ménages habitant dans la couronne de l'aire urbaine lyonnaise. En effet, les scénarios proposés dans cette étude modifient principalement la localisation des acteurs dans le centre et dans la périphérie de l'agglomération. Ainsi les variations selon les différents scénarios sont faibles (Figure 5).

Néanmoins, le budget distance des habitants de la couronne est minimal dans les scénarios étalé et polycentrique, avec des impacts environnementaux et des dépenses de carburant légèrement plus faibles. Ces distances plus courtes résultent d'une meilleure proximité à l'emploi, liée à une plus grande concentration des entreprises en couronne dans ces deux scénarios. Dans le cas du scénario polycentrique, la présence des lignes ferroviaires diminue légèrement l'usage de la voiture, mais le report modal est faible (-2 % de part modale de déplacements), car la couronne est déjà reliée au système de transports collectifs urbains de l'agglomération.

4.3.3. Analyse des ménages de la périphérie

Les politiques simulées de gestion de l'étalement urbain portent principalement sur l'aménagement de la périphérie de l'agglomération : l'analyse des ménages y résidant est donc primordiale dans ce travail (Figure 6).

Les ménages qui résident dans cette zone sont les plus dépendants de la voiture et ils parcourent les plus grandes distances (23,6 km/jour/personne

dans le scénario de référence). Le budget distance cumulé en voiture des habitants de la périphérie représente à lui seul environ 50 % du total parcouru par l'ensemble des habitants de l'aire urbaine dans le cas des scénarios étalé et polycentrique, alors qu'ils ne représentent que 32 % de la population.

Figure 5 : Synthèse des indicateurs pour les habitants de la couronne de l'agglomération en fonction des quatre scénarios de forme urbaine

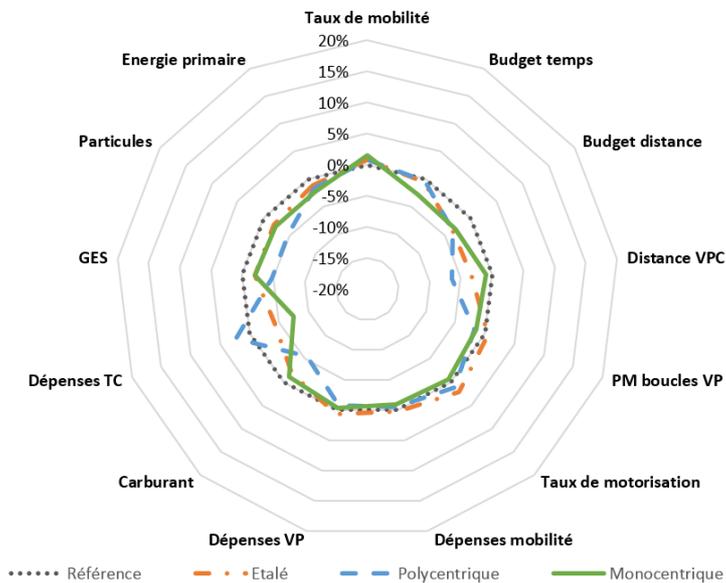
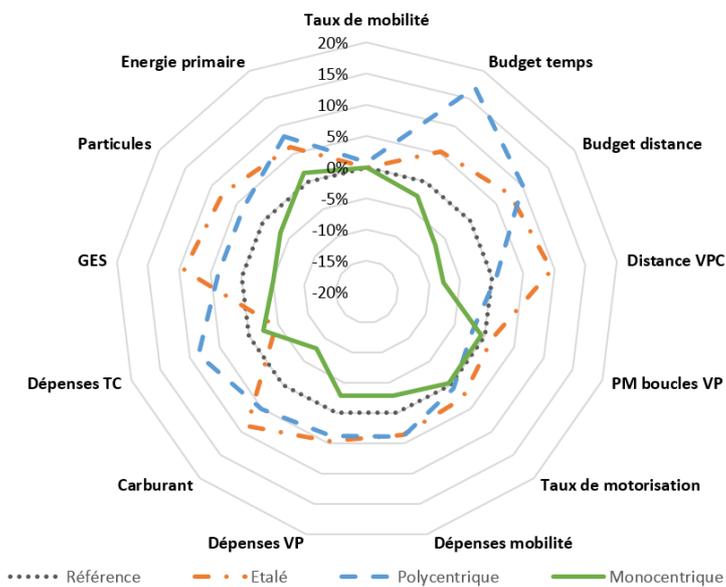


Figure 6 : Synthèse des indicateurs pour les habitants de la périphérie de l'agglomération en fonction des quatre scénarios de formes urbaines



La mise en place du réseau de transport ferroviaire et la priorisation de l'urbanisation autour des gares engendrent un léger report modal de la voiture particulière vers les transports collectifs, avec une baisse de la part modale de la voiture de 2 %. La distance parcourue en voiture augmente en revanche légèrement (+1 %). Ces chiffres sont à mettre en comparaison avec ceux obtenus dans le scénario étalé : +1 % de part modale et +10 % de distances parcourues en voiture. En revanche, les distances totales augmentent dans le scénario polycentrique, dues à des trajets en transport en commun souvent plus longs que les trajets en voiture. Le budget temps alloué à la mobilité quotidienne des ménages de la périphérie est également en forte hausse (+17 %, contre seulement +5 % dans le scénario étalé), car les déplacements en transport en commun sont plus lents -lorsque l'on prend en compte les temps d'attente et de correspondance. Les dépenses en transports collectifs augmentent dans le scénario polycentrique (+9 %), mais restent faibles. Le taux de possession automobile est en légère hausse dans le cas du scénario polycentrique (+1 %), du fait notamment de la hausse des individus actifs seuls fortement motorisés, et augmente davantage dans le scénario étalé (+3 %). Du fait de la hausse des distances parcourues, les émissions de GES et de particules augmentent de l'ordre de 4 % pour le scénario polycentrique et 9 % pour le scénario étalé. Il est intéressant de noter que la consommation d'énergie primaire est nettement supérieure dans le scénario polycentrique, du fait d'une consommation électrique supplémentaire liée à la circulation des trains et à la fabrication de l'électricité qui, en France, a un rendement de 38,5 % (CGEDD-MEDDE, 2013). Ce dernier point soulève la question de l'efficacité énergétique du mode ferroviaire (et de la propulsion électrique en général) et de la nécessité de bien dimensionner l'offre. Les dépenses en carburant suivent les variations des distances parcourues, entraînant une hausse du budget mobilité de 4 % pour les deux scénarios.

Dans le cas du scénario monocentrique, les ménages de la périphérie ont des distances parcourues en voiture nettement inférieures au scénario de référence (-8 %). Ces évolutions s'expliquent principalement par une baisse de la proportion de ménages actifs. Le taux de motorisation est le même que le scénario de référence, résultant de deux mouvements contradictoires avec une tendance à la hausse liée à la diminution des densités et une tendance à la baisse liée à la diminution des ménages actifs. Ces tendances se traduisent par un budget mobilité plus faible (-3 %) et une empreinte environnementale plus faible pour ces ménages

5. CONCLUSION : DES TENDANCES GÉNÉRALES CONFIRMÉES ET L'INTÉRÊT D'UNE APPROCHE MULTIDIMENSIONNELLE DÉMONTRÉE

Cet article propose une méthode alternative aux méthodes le plus souvent utilisées pour mesurer les impacts des formes urbaines sur les mobilités quotidiennes. Le raisonnement par la simulation permet de jouer sur les

localisations en raisonnant toutes choses égales par ailleurs, et notamment sans introduire d'hypothèses d'évolutions des comportements et des technologies comme dans la démarche prospective, ni de s'interroger sur d'éventuelles différences géographiques, économiques, sociales ou culturelles qu'il faudrait prendre en compte en cas de comparaisons d'agglomérations.

Ceci étant, les résultats que nous obtenons en simulant différents scénarios de forme urbaine appliqués au cas de l'aire urbaine lyonnaise à partir du modèle SIMBAD fournissent des conclusions convergentes avec les autres méthodologies. On peut ainsi souligner qu'à l'échelle d'un bassin de vie, une politique de compaction diminue les coûts économiques et environnementaux de la mobilité grâce à une baisse de l'usage de l'automobile et une diminution des distances parcourues, principalement dues à une part plus importante de la population dans le centre. Une politique de développement de pôles secondaires autour de gares ferroviaires a également des impacts favorables grâce à un report modal en faveur du transport en commun dans les zones périphériques.

Il nous est également apparu important d'avoir une approche élargie pour rendre compte de la complexité du système urbain et, en son sein, des impacts d'une forme urbaine sur les mobilités. Ceci a été fait en proposant d'une part des indicateurs de mobilité durable élaborés autour de trois axes complémentaires (pour rendre compte des comportements de mobilité des individus, des dépenses des ménages pour se déplacer et des impacts environnementaux mesurés à partir d'une analyse en cycle de vie) et d'autre part en jouant sur différentes échelles d'analyse des résultats. La richesse des modèles LUTI -en contrepartie de la lourdeur et de la difficulté de leur mise en œuvre- permet ce type d'analyse qui a ainsi pu être menée sur le cas lyonnais.

Une analyse multi-indicateurs réalisée à différents niveaux d'agrégation souligne la complexité des phénomènes en jeu, nécessitant d'avoir une vision nuancée sur la forme urbaine « optimale ». Par exemple, par rapport à une forme urbaine plus étalée, une forme polycentrique organisée autour du concept de *Transit Oriented Development* diminue les émissions atmosphériques, mais rallonge les budgets temps de mobilité quotidienne, tandis qu'une forme monocentrique augmente les distances parcourues des habitants du centre de l'agglomération.

Dans cet article, la complémentarité des analyses économiques, environnementales et sociales rend compte de la durabilité de l'agglomération, mais chacune de ces analyses peut être approfondie. L'analyse des comportements de mobilité peut être spécifiée par motifs de déplacements permettant l'analyse de la mobilité domicile-travail par exemple. Les dépenses de mobilité peuvent être davantage détaillées par poste (notamment sur la question du stationnement). Les résultats environnementaux de l'ACV peuvent aussi être

complétés afin de représenter d'autres impacts environnementaux (occupation du sol, utilisation de ressources, pollution photochimique ...) ou de différencier les impacts par phases du cycle de vie.

Les modèles LUTI désagrégés comme SIMBAD ouvrent également de nouvelles pistes telles qu'une analyse fine des résultats en fonction des caractéristiques des ménages. Une première exploration en fonction de leur localisation entre centre, couronne ou périphérie a été réalisée ici, mais elle pourra être prolongée en fonction de leur activité et de leur position dans le cycle de vie, en s'intéressant par exemple aux étudiants, aux actifs seuls, aux familles et aux retraités, ce qui complétera l'analyse en exploitant les capacités du modèle désagrégé. Il sera néanmoins toujours nécessaire de rester à une échelle agrégée, car ces modèles ne sont pas calibrés pour fournir des résultats à des échelles spatiales fines, telles que l'IRIS ou la commune.

Enfin, ce premier travail a été consacré aux effets de différentes formes urbaines sur la mobilité quotidienne des ménages ainsi que leurs dépenses et leurs impacts environnementaux induits. Pour pleinement contribuer aux débats sur les enjeux de la forme urbaine, il devra être élargi sur trois axes importants, à savoir l'estimation du coût du système de transports pour la collectivité (puisque seule la vision des ménages a été analysée ici), la spatialisation des polluants et l'identification des populations exposées (pour rendre compte des enjeux d'équité environnementale), ainsi que la question du foncier et du coût résidentiel des ménages (car la balance entre coût du transport et coût de localisation reste un élément fondamental de la compréhension de la dynamique urbaine). Ces trois thématiques peuvent être appréhendées à l'aide des modèles LUTI et mériteront d'être abordées par la suite.

BIBLIOGRAPHIE

ADEME (2013) **Élaboration 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.** 283 p.

AGUILERA A., MADRE J.-L., MIGNOT D. (2004) Métropolisation, formes urbaines et mobilité. Présentation du dossier. **les Cahiers Scientifiques du Transport**, n° 45, pp. 5-14.

ANTONI J.-P., BONIN O., FRANKHAUSER P., HOUOT H., NICOLAS J.-P., THIERRY C. ..., VUILED G. (2015) **VILMoDes-Ville et mobilités durables.** Rapport de recherche, 139 p.

APPERT M. (2004) Métropolisation, mobilités quotidiennes et forme urbaine : le cas de Londres. **Géocarrefour**, Vol. 79, n° 2, pp. 109-118.

AW T. (2010) **La ville nouvelle de Marne-la-Vallée et son insertion dans la dynamique francilienne : évaluation des enjeux du renforcement de la structure polycentrique sur les systèmes de déplacements**. Paris, Thèse de doctorat, Université Paris-Est.

BANISTER D. (2008) The sustainable mobility paradigm. **Transport Policy**, Vol. 15, n° 2, pp. 73-80.

BOUZOUINA L. (2008) **Ségrégation spatiale et dynamiques métropolitaines**. Lyon, Thèse de doctorat, Université Lumière-Lyon II.

BRUEGMANN R. (2006) **Sprawl: A compact history**. Chicago, 301 p.

BUISSON M.-A., MIGNOT D., AGUILERA-BELANGER A. (2001) Métropolisation et polarités intra-urbaines. Le cas de Lyon. **Revue d'Économie Régionale & Urbaine**, n° 2, pp. 271-296.

CABRERA J. (2013) **Quelle prise en compte des dynamiques urbaines dans la prévision de la demande de transport ?** Lyon, Thèse de doctorat, Université Lumière-Lyon II.

CALTHORPE P. (1993) **The Next American Metropolis: Ecology, Community, and the American Dream**. New York, Princeton Architectural Press, 175 p.

CAMAGNI R., CAPELLO R., NIJKAMP P. (1998) Towards sustainable city policy: an economy-environment technology nexus. **Ecological Economics**, Vol. 24, n° 1, pp. 103-118.

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, pp. 199-216.

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, pp. 199-219.

CGEDD-MEDDE (2013) **Le facteur 4 en France : la division par 4 des émissions de gaz à effet de serre à l'horizon 2050**. Paris, 230 p.

CHESTER M.V., HORVATH A. (2009) Environmental assessment of passenger transportation should include infrastructure and supply chains. **Environmental Research Letters**, Vol. 4, n° 2, p. 024008.

CIRILLI A., VENERI P. (2009) Spatial structure and mobility patterns: towards a taxonomy of the Italian urban systems. **Rivista di Economia et statistica del territorio**, Vol. 2009, n° 1, pp. 25-62.

COULOMBEL N., LEURENT F. (2013) Les ménages arbitrent-ils entre coût du logement et coût du transport : une réponse dans le cas francilien. **Économie et statistique**, Vol. 457, pp. 57-75.

- DEYMIER G., GASCHET F., POUYANNE G. (2013) Formes urbaines et coûts de la mobilité : une approche à partir du compte déplacement territorialisé de l'agglomération bordelaise. **les Cahiers Scientifiques du Transport**, n° 64, pp. 61-90.
- DIEBOLT W., HELIAS A., BIDOU D., CREPEY G. (2005) **Les inégalités écologiques en milieu urbain**. Rapport de l'inspection générale de l'environnement, 71 p.
- DUPUY G. (1995) **Les territoires de l'automobile**. Paris, Economica Anthropos, 216 p.
- ECHENIQUE M.H., HARGREAVES A.J., MITCHELL G., NAMDEO A. (2012) Growing Cities Sustainably. **Journal of the American Planning Association**, Vol. 78, n° 2, pp. 121-137.
- EWING R. (1994) Characteristics, Causes, and Effects of Sprawl: A Literature Review. **Environmental and Urban Issues**, vol. Winter, pp. 1-15.
- EWING R., CERVERO R. (2010) Travel and the Built Environment: A Meta-Analysis. **Journal of the American Planning Association**, Vol. 76, n° 3, pp. 265-294.
- EWING R., HAMIDI S. (2015) Compactness versus Sprawl: A Review of Recent Evidence from the United States. **Journal of Planning Literature**, Vol. 30, n° 4, pp. 413-432.
- FRANÇOIS C., GONDRAN N., NICOLAS J.-P., PARSONS D. (2017) Environmental assessment of urban mobility—a method based on life cycle assessment of the results of a LUTI model. **Ecological Indicators**, Vol. 72, pp. 597-604.
- GORDON P., RICHARDSON H.W. (1997) Are compact cities a desirable planning goal? **Journal of the American Planning Association**, Vol. 63, n° 1, pp. 95-106.
- HAAS P.M., MAKAREWICZ C., BENEDICT A., SANCHEZ T.W., DAWKINS C.J. (2006) **Housing & Transportation Cost Trade-offs and Burdens of Working Households in 28 Metros**. Center for Neighborhood Technology & Virginia Tech report, 197 p.
- HOMOCIANU G.M. (2009) **Modélisation de l'interaction transport-urbanisme : choix résidentiels des ménages dans l'aire urbaine de Lyon**. Lyon, Thèse de doctorat, Université Lumière-Lyon II.
- INSEE (2014) **Depuis 2008, la consommation automobile pâtit de la crise économique**. INSEE Première, n° 1520, 4 p.
- JOUMARD R., GUDMUNDSSON H. (2010) **Indicators of environmental sustainability in transport**. INRETS, 422 p.

KENWORTHY J.R. (2003) Transport energy use and greenhouse gases in urban passenger transport systems: A study of 84 global cities. In **International Sustainability Conference**, Fremantle, Western Australia, 28 p.

KII M., AKIMOTO K., DOI K. (2014) Measuring the impact of urban policies on transportation energy saving using a land use-transport model. **IATSS Research**, Vol. 37, n° 2, pp. 98-109.

LE FEON S. (2014) **Évaluation environnementale des besoins de mobilité des grandes aires urbaines en France-Approche par Analyse de Cycle de Vie**. Saint-Etienne, EMSE.

LE NÉCHET 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**.

LE NÉCHET F., AGUILÉRA A. (2012) Forme urbaine et mobilité domicile-travail dans 13 aires urbaines françaises : une analyse multiéchelle. **Recherche Transports Sécurité**, Vol. 28, n° 3-4, pp. 259-270.

LITMAN T. (2016) **Well measured**. Victoria Transport Policy Institute, 107 p.

MANCIBO F. (2010) **Le développement durable**. Paris, Armand Colin, 124 p.

MANGIN D. (2004) **La ville franchisée : Formes et structures de la ville contemporaine**. Paris, Editions de la Villette, 480 p.

MARESCA B. (2013) **La précarité énergétique pose la question du coût du logement en France**. CRÉDOC, 4 p. (Consommation et modes de vie n° 258).

MARESCA B., MERCURIO G. (2014) Le coût résidentiel : coût privé, coût public de l'étalement urbain. CREDOC, 76 p. (Cahier de Recherche n°C231).

MILAKIS D., CERVERO R., WEE B. VAN (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, pp. 59-86.

NAESS P. (2012) Urban form and travel behavior: experience from a Nordic context. **Journal of Transport and Land Use**, Vol. 5, n° 2, pp. 21-45.

NEWMAN P.G., KENWORTHY J.R. (1989) **Cities and automobile dependence. An international sourcebook**. Gower, Aldershot, 388 p.

NICOLAS J.-P., BONNEL P., BOUZOUINA L., CABRERA J., PASCAL L., PLUVINET P., ZUCCARELLO P. (2013) **La prospective urbanisme-transport avec la plateforme SIMBAD**. Laboratoire d'Économie des Transports, 168 p. (Rapport de recherche).

NICOLAS J.-P., PELÉ N. (2017) Measuring trends in household expenditures for daily mobility. The case in Lyon, France, between 1995 and 2015. **Transport Policy**, Vol. 59, n° Supplement C, pp. 82-92.

NICOLAS J.-P., POCHE P., POIMBOEUF H. (2003) Towards sustainable mobility indicators: application to the Lyons conurbation. **Transport Policy**, Vol. 10, n° 3, pp. 197-208.

NICOLAS J.-P., VANCO F., VERRY D. (2012) Mobilité quotidienne et vulnérabilité des ménages. **Revue d'Économie Régionale & Urbaine**, n° 1, pp. 19-44.

NIJKAMP P., LASCHUIT P., SOETEMAN F. (1991) **Sustainable development in a regional system**. VU University Amsterdam, Faculty of Economics, Business Administration and Econometrics, 34 p. (no 0093).

NTZIACHRISTOS L., SAMARAS Z., KOURIDIS C., HASSEL D., MCCRAE I., HICKMAN J., ... (2014) **COPERT Guidebook 2014: Exhaust emissions from road transport**. Guidebook, 160 p.

NUZZOLO A., COPPOLA P., PAPA E. (2014) Urban Form and Sustainability: Modelling Evidences From the Empirical Case Study of Rome. In **European Transport Conference 2014**, Francfort, Allemagne, 20 p.

PELÉ N., NICOLAS J.-P. (2016) L'impact du lieu de résidence sur la mobilité quotidienne des périurbains : une approche par la modélisation de leurs dépenses. In **ASRDLF 2016**, Gatineau, Canada, 11 p.

POUYANNE G. (2004) Des avantages comparatifs de la ville compacte à l'interaction forme urbaine-mobilité. Méthodologie et premiers résultats. **les Cahiers Scientifiques du Transport**, n° 45, pp. 49-82.

RENNE J.L., TOLFORD T., HAMIDI S., EWING R. (2016) The Cost and Affordability Paradox of Transit-Oriented Development: A Comparison of Housing and Transportation Costs Across Transit-Oriented Development, Hybrid and Transit-Adjacent Development Station Typologies. **Housing Policy Debate**, Vol. 26, n° 4-5, pp. 819-834.

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, pp. 579-603.

SPIELMANN M., ALTHAUS H.-J. (2007) Can a prolonged use of a passenger car reduce environmental burdens? Life Cycle analysis of Swiss passenger cars. **Journal of Cleaner Production**, Vol. 15, n° 11-12, pp. 1122-1134.

TALLEN E. (2013) **Charter of the new urbanism: congress for the new urbanism**. New York, McGraw-Hill Education, 302 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, pp. 382-392.

VALLAT-SANCHEZ T. (2016) **Les échelles de validation d'un modèle Transport-Urbanisme : application au module de localisation des activités du modèle SIMBAD**. Lyon, Mémoire de Master 2 Transports Espaces Réseaux, Université Lumière Lyon, 185 p.

WADDELL P. (2002) UrbanSim: Modeling Urban Development for Land Use. **Transportation, and Environmental Planning, Journal of the American Planning Association**, Vol. 68, n° 3, pp. 297-314.

WIEL M. (1999) Mobilité, système d'interactions sociales et dynamiques territoriales. **Espace, populations, sociétés**, Vol. 17, n° 2, pp. 187-194.

WIEL M. (2010) **Étalement urbain et mobilité**. Paris, La Documentation Française, 88 p.

ZUINDEAU B. (2006) Spatial approach to sustainable development: Challenges of equity and efficacy. **Regional Studies**, Vol. 40, n° 5, pp. 459-470.

ANNEXE

INDICATEURS DE MOBILITÉ, DE DÉPENSES DES MÉNAGES ET D'IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX EN FONCTION DE LA LOCALISATION RÉSIDENTIELLE POUR LE SCÉNARIO DE FORME URBAINE DE RÉFÉRENCE

Scénario de référence (2009)	Centre	Couronne	Périphérie
Budget distance (km/pers/jour)	8,2	16,9	23,6
Budget temps (min/pers/jour)	43,3	49,3	38,7
Taux de mobilité (boucle/pers/jour)	1,4	1,4	1,3
Distance parcourue en voiture conducteur (véhicule.km/pers/jour)	3,9	11,0	17,7
Part modale déplacements automobile	39,5	67,6	83,0
Taux motorisation (véhicules/1000hab.)	433	474	537
Dépenses mobilité (€/pers/jour)	3,3	3,7	4,7
Dépenses automobile (€/pers/jour)	2,7	3,7	4,2
Carburant (€/pers/jour)	0,3	0,9	1,4
Dépenses transports collectifs (€/pers/jour)	0,5	0,3	0,5
GES (kg CO ₂ eq/pers/jour)	1,4	3,5	5,1
Particules (g PM ₁₀ eq/pers/jour)	2,6	6,9	9,9
Energie primaire (kWh/pers/jour)	7,4	17,2	25,6