



HAL
open science

VILMODEs, Ville et mobilité durables, évaluation par la simulation

Jean-Philippe Antoni, Olivier Bonin, Pierre Frankhauser, Hélène Houot,
Jean-Pierre Nicolas, Lorenza Tomasoni, Florence Toilier, Gilles Vuidel

► **To cite this version:**

Jean-Philippe Antoni, Olivier Bonin, Pierre Frankhauser, Hélène Houot, Jean-Pierre Nicolas, et al.. VILMODEs, Ville et mobilité durables, évaluation par la simulation . [Rapport de recherche] Convention 11 MT PREDIT cvs 052, PREDIT; ThéMA; LVMT; LET. 2014. halshs-01676456

HAL Id: halshs-01676456

<https://shs.hal.science/halshs-01676456>

Submitted on 8 Jan 2018

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

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

VILMODes
Ville et mobilités durables
Évaluation par la simulation

Trois scénarios d'aménagement pour Lyon et
Besançon à l'horizon 2030

Auteurs du rapport

Jean-Philippe Antoni¹ (dir.), Olivier Bonin³, Pierre Frankhauser¹, Hélène Houot¹,
Jean-Pierre Nicolas², Clémentine Thierry¹, Lorenza Tomasoni³,
Florence Toilier², Gilles Vuidel¹

Laboratoires

¹ThéMA - UMR 6049 - CNRS et Université de Franche-Comté - Besançon

²LET - UMR 5593 - CNRS et ENTPE - Lyon

³LVMT - UMR T 9403 - Ecole des Ponts, IFSTTAR et Université de Paris-Est -
Marne-la-Vallée



Introduction

EN réponse à l'appel du GO6 du PREDIT « Dynamiques de localisation et mobilité à l'horizon 2025. Prospective, politiques et outils », le présent rapport de recherche est le fruit d'une collaboration de près de trois ans entre trois partenaires essentiels, dont les travaux communs antérieurs apparaissaient peu nombreux malgré des thématiques de recherches extrêmement proches :

- ThéMA (UMR 6049 du CNRS et de l'Université de Franche-Comté), laboratoire de géographie quantitative dont l'équipe "Ville" s'intéresse depuis plus de vingt ans à la question des mobilités et de la forme urbaine, ainsi qu'à leur modélisation pour la prospective territoriale ;
- LVMT (UMR T 9403 de l'Ecole des ponts, de l'IFSTTAR et de l'Université Paris-Est Marne-la-Vallée), laboratoire pluridisciplinaire dont les recherches se concentrent sur la question des villes, de la mobilité et des transport ;
- LET (UMR 5593 du CNRS, de l'ENTPE et de l'Université de Lyon 2), laboratoire d'économie des transports qui dispose d'une longue tradition en matière de modélisation en transport (urbains et interurbains, personnes et marchandises) et sur les interactions entre transport et urbanisme.

L'intérêt de cette collaboration a été double. D'une part, elle a permis d'échanger et de conforter les points de vue acquis de part et d'autre sur la question de la ville et des mobilités durables, en clarifiant les concepts mobilisés par les enjeux actuels de l'urbanisation et de l'étalement urbain. D'autre part, elle a contribué à la mise en commun des savoir-faire, des méthodes et des techniques d'analyse et de modélisation pour fournir une étude comparative couplant leurs outils de prospective les plus performants sur deux terrains d'étude, l'agglomération de Besançon et l'Aire urbaine de Lyon. Ces deux points constituent non seulement une première dans le champs de l'aménagement du territoire à l'échelle nationale, mais également un pari ou une gageure, qui se solde aujourd'hui par un ensemble de procédures renouvelées pour la modélisation urbaine avancée. Elle n'aurait évidemment pas été possible sans les apports technique et thématique réguliers des partenaires complémentaires de ce projet dont les échanges on rendu possible une émulation qui s'inscrit désormais dans le long terme, en particulier :

- LISER (Luxembourg Institute of Socio-Economic Research), centre de recherche en sciences sociales basé à Esch-sur-Alzette (ex-CEPS, Luxembourg) regroupant une centaine de chercheurs en économie et en géographie, dont le département « Géographie et aménagement » a initié la construction de la plateforme de modélisation LUTI Moebius.

- LIVE (UMR 7362 du CNRS et de l'Université de Strasbourg) dont les recherches s'articulent autour de l'image comme outil d'analyse, de représentation, de visualisation et de communication, de la ville comme objet principal d'étude, et de l'environnement qui permet de replacer l'ensemble dans une perspective physique et écologique.
- TUW (*Technische Universität Wien*), dont le laboratoire SRL :SIM (*Interdisciplinary centre for spatial simulation and modelling*) a contribué aux tests des possibilités de simulation apportées par le logiciel Fractalopolis© sur l'espace Vienne-Bratislava, ouvrant la voie à son utilisation sur l'espace de Besançon et Lyon dans le cadre du projet VILMODes

Dans ce contexte collaboratif et interdisciplinaire, le projet s'articule autour des trois mots-clés « urbanisation – transport – environnement », avec comme objectif d'aider à concevoir, à comparer et à évaluer des scénarios d'aménagement urbains selon leur capacité à réduire les nuisances produites par une croissance urbaine non-contrôlée. Avec différents niveaux de contraintes, l'accent a été mis sur l'étude de scénarios de développement des espaces résidentiels, des zones d'activités et des infrastructures de transport, destinés à renforcer et à réorganiser les espaces métropolitains en favorisant un fonctionnement plus intégré dans le but de réduire les distances à parcourir et notamment l'utilisation massive de l'automobile. De même, la question de l'augmentation du coût de l'énergie a été prise en considération, afin de rendre compte du poids des déplacements sur le budget des ménages, et de leur choix de localisation résidentielle ou de leur lieux d'emploi dans le long terme. Dans ce cadre, plusieurs dispositifs ont été explorés :

- La localisation et la relocalisation des espaces résidentiels urbains et périurbains (mobilité résidentielle) afin de renforcer l'accès dans un rayon de proximité « soutenable » ;
- La localisation et la relocalisation éventuelle d'autres activités économiques (notamment les commerces et les services de proximité) dans le même but ;
- La préservation de zones agricoles, potentiellement vivrières et économiquement rentables dans un contexte de périurbanisation, à proximité des lieux de consommation ;
- Les accès aux systèmes de transport en commun, théoriquement plus vertueux que l'usage massif de l'automobile si une possibilité de report modal socialement acceptable est organisée dans l'espace comme dans le temps.

Néanmoins, dans la mesure où il n'est pas toujours possible d'offrir à l'ensemble de la population d'une agglomération un accès direct à des services et commerces, ni à des lieux de travail qui se situent à un niveau élevé (hôpitaux, administrations, services rares, grandes entreprises, etc.), la gestion de l'accessibilité, de la vitesse des transports et des mobilités quotidiennes est restée un enjeu important. Afin d'évaluer l'impact des mobilités de manière globale, ces considérations ne se sont pas limitées à la prise en compte des déplacements « domicile-travail » ; elles ont autant que possible tenu compte de la diversité des attentes des résidents par rapport à leur cadre de vie et leurs pratiques spatiales. Ainsi, la préservation et le développement d'un environnement résidentiel « confortable », notamment en termes de proximités aux aménités urbaines, paraissent aussi importants qu'une accessibilité rapide aux zones de loisirs et de récréation.

Pour témoigner de l'intérêt thématique et scientifique des acquis de ce projet, le présent rapport s'organise en trois chapitres. Le premier chapitre (p. 4) revient sur le contexte qui conduit aujourd'hui les planificateurs et les chercheurs à proposer des « solutions » pour une ville et des mobilités durables, et invite à une réflexion sur les notions complexes de durabilité, d'étalement urbain et de vulnérabilité énergétique, à l'échelle des « nouveaux espaces urbains ». Le deuxième chapitre (p. 22) est d'ordre méthodologique : il présente

successivement les deux scénarios retenus pour l'évaluation de solutions de durabilité urbaine : Renouvellement urbain compact (RUC) et *Fractal oriented development* (FOD), ainsi que le scénario de "Laisser-faire" ou prolongation de tendance (LF) qui a été mis au point pour servir de base de comparaison ; cette partie explicite également le cadre mis en place pour la construction des scénarios, et présente les modèles conceptuels et les programmes informatiques à mobiliser pour en simuler les avantages et les inconvénients exposés dans le Chapitre 1. Enfin, le troisième chapitre (p. 68) présente et met en perspective, essentiellement sous la forme de cartes et de graphiques, les résultats obtenus sur les agglomérations de Lyon et de Besançon à l'horizon 2030. Ces résultats, obtenus par simulation grâce aux modèles présentés dans le chapitre précédent, sont interprétés par une série d'indicateurs *ad hoc* pertinents au regard des arguments avancés au départ, qui croisent les thématiques fondamentales de la ville et des mobilités durables : forme urbaine, attractivité, énergie, mobilité et population. Ils montrent que différentes alternatives semblent aujourd'hui prometteuses pour organiser et planifier des villes et des mobilités urbaines plus durables.

Chapitre 1

Ville et mobilités durables

LA question du développement durable n'est pas par essence une question centrale du projet VILMODes ; elle le devient pourtant *de facto* puisque la grande majorité des acteurs concernés par les les politique des mobilités et de la ville s'accordent aujourd'hui autour des principes énoncés dans le rapport Brundtland (CMED, 1987). Pour parler de « ville et de mobilité durables », il est donc nécessaire, d'une part, de rappeler les concepts qui permettent les définir et, d'autre part, de voir comment ces concepts s'inscrivent dans les territoires, en particuliers dans les espaces urbains. Ce rappel liminaire conduit naturellement à poser la question de l'étalement urbain et de ses conséquences sur les agglomérations française, dans une situation de crise et de vulnérabilité énergétique de plus en plus tangible. Dans ce contexte, le projet VILMODes part du principe que la localisation ou la re-localisation des éléments qui composent les aires urbaines (équipement, services, habitat résidentiel) et des infrastructures qui les rendent accessibles, peuvent contribuer à la durabilité des territoire, ou, au contraire jouer en sa défaveur. Concrètement, elle se traduit par des formes et de densités urbaines (de l'étalement à la compacité), dont il s'agit d'évaluer les avantages et les inconvénients sur les trois piliers (économique, social et environnemental) du développement durable.

1.1 Contexte

L'adjectif « durable » sous-tend aujourd'hui la quasi-totalité des objectifs de l'urbanisation et des mobilités urbaines. Il n'est pas devenu aussi hégémonique qu'il ne l'est actuellement par hasard. Parfois associée à un concept oxymorique et creux (Pumain et Racine, 1999 ; Le Goff, 2009), la notion de développement durable s'appuie en réalité sur plusieurs décennies de débats et d'initiatives qu'il convient de retracer brièvement pour en cerner correctement les tenants et les aboutissants. Cette « histoire » montre qu'un développement dit durable s'appuie nécessairement sur une intervention de la sphère publique inscrite à différentes échelles dans les territoires et les villes (§ 1.1.1)¹, en même temps qu'elle légitime de lutter

1. Cette partie 1.1.1. s'inspire largement de la synthèse sur la notion de développement durable proposée dans Nicolas (2012).

aujourd'hui contre l'étalement urbain et les consommations énergétiques des mobilités qui lui sont associées (§ 1.1.2), en évaluant les possibilités que pourraient offrir des aménagements fondés sur une re-localisation des activités urbaine et une modification du système de transport permettant d'y accéder.

1.1.1 Développement durable : une vision urbaine

Emergeant dans le prolongement de deux siècles de développement économique où la croissance de la production est apparue comme la réponse aux préoccupations de bien-être au sein des sociétés et d'inégalité entre les nations, l'idée de développement soutenable met plus en cohérence les problèmes ressentis aujourd'hui qu'elle n'apporte de solutions aux défis à relever. La définition qui a fait son succès, « un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures de répondre aux leurs » du rapport Brundtland (CMED, 1987), reste en effet trop ouverte pour permettre de poser un cadre où une logique et une seule puisse se dérouler sans ambiguïté. Des approches contradictoires peuvent s'y retrouver et, finalement, hormis les réflexions partant des lois de la thermodynamique et de l'entropie qui interrogent l'idée même de développement (Georgescu Roegen, 1971) ou, à l'autre extrême, celles pour lesquelles la croissance économique représente l'alpha et l'oméga du bien être à venir et des richesses à partager (Beckerman, 1994), tous les courants de pensée ont pu embrasser ou s'intégrer dans l'idée de développement soutenable. En ce sens, l'idée d'un développement durable reste une « idée reçue contemporaine » (Vivien, 2005), loin de pouvoir être qualifiée de « concept » s'intégrant dans un champ théorique bien défini.

1.1.1.1. Interventionnisme local et durabilité forte

Indubitablement, l'idée de développement durable vient de la prise de conscience que les ressources de notre planète et les capacités de régulation et d'adaptation de sa biosphère ne sont pas infinies et connaissent des limites que tôt ou tard nous rencontrerons, si ça n'est pas déjà fait. L'image du *vaisseau spatial Terre* utilisée par K.E Boulding (1966) a notamment servi de base aux réflexions du Club de Rome² qui lance dès le début des années 1970 un débat sur les limites de la croissance et la nécessité d'un autre modèle de développement au niveau des instances internationales et du grand public (Meadows *et al.*, 1972). Dès cette époque, K.E. Boulding pose également le problème du legs aux générations futures en termes économiques de taux d'actualisation (Boulding, 1966). Dans le même temps, comme le souligne Vivien (2010), ces réflexions séminales du développement durable sont également traversées par les préoccupations d'équité territoriale et d'équilibre entre les pays du Nord et du Sud. Ainsi, s'appuyant sur les réflexions de Daly (1971), le rapport Meadows exprime déjà le besoin d'une redistribution des richesses entre les nations.

Dans les années 1970, le courant de l' **écodéveloppement** reprend et porte cette idée,

2. Le Club de Rome est un groupe de réflexion (*Think tank*) réunissant des scientifiques, des économistes, des fonctionnaires et des industriels d'une cinquantaine de pays, dont les préoccupations concernent les problèmes complexes auxquels doivent faire face les sociétés industrialisées ou en développement. Il s'est fait connaître dans les années 1970, après la publication de son premier rapport, *The Limits to Growth* (1972), traduit en français sous une forme interrogative : *Halte à la croissance ?*. Prenant conscience de la pénurie prévisible des sources énergétiques et des conséquences du développement industriel sur l'environnement, les vertus de la croissance y sont remises en cause pour la première fois, et les conclusions annoncent un futur inquiétant pour l'humanité.

tout en insistant, par opposition à la croissance zéro du Club de Rome, sur la nécessité non seulement d'une activité humaine attentive aux contraintes de ressources naturelles, mais aussi d'une croissance économique pour qu'une redistribution puisse s'opérer de manière équilibrée (Sachs *et al.*, 1981). Solidement installés au sein des instances internationales et notamment aux Nations Unies, les tenants de l'écodéveloppement prônent également tout à la fois le principe d'un développement local autocentré et d'une autonomie de décision au sein de chaque communauté, principe qui se retrouvera ensuite dans l'idée de **gouvernance**³, que la vision actuelle classique du développement durable met aujourd'hui fortement en avant.

Transversale à toutes ces réflexions, une distinction est opérée entre croissance et développement ou, autrement dit, entre *avoir plus* et *mieux être* (De Jouvenel, 1976 ; Passet, 1977) : une croissance matérielle des biens ne correspond pas forcément au développement d'une société, où d'autres dimensions plus immatérielles peuvent être en jeu, comme « l'éducation, l'art, la religion, la recherche fondamentale, les sports ou les relations humaines » (Meadows *et al.*, 1972). Ainsi, le choix d'allier les termes « durable » (*sustainable*) et « développement » n'est pas neutre. Les différentes visions en lice concernant « développement » et « croissance », peuvent être exprimées de manière ramassée en quatre propositions : (i) « il faut une décroissance pour avoir une chance de connaître un développement » (Roegen) ; (ii) « recherchons un développement sans croissance » (Meadows) ; (iii) « la croissance est nécessaire pour permettre le développement » (Sachs) ; (iv) « il existe, au bout du compte, équivalence entre les deux termes » (Beckerman). Entre les quatre, les auteurs de *Notre avenir à tous* ont choisi la troisième. Mais le débat n'est pas clos et se prolonge aujourd'hui dans les réflexions sur la **décroissance** (cf. par exemple Latouche et Harpagès, 2010) ou dans l'émergence de nouveaux indicateurs économiques proposés en alternative au traditionnel PIB (Gadrey et Jany-Catrice, 2003 ; Méda, 2008).

En réaction au succès de ces premiers travaux, le courant économique néo-classique dominant va renforcer son discours sur la prise en compte de l'environnement. D'une part, il s'appuie sur les travaux de H. Hotelling (1931) pour insister sur l'idée qu'en cas de raréfaction du type de ressources utilisées, la croissance concomitante de leurs prix rend plus attractives d'autres ressources alternatives, encourageant également l'émergence de nouvelles technologies (Nordhaus, 1974). Par ailleurs, R. M. Solow (1974, 1992) développe l'idée que si la croissance se base en partie sur la consommation et la destruction de ressources naturelles non renouvelables, elle est porteuse d'accroissement du capital productif et de création de nouveaux biens et services qui fournissent de nouvelles satisfactions aux besoins des générations à venir. Il existe ainsi une substitution entre ce qui sera dès lors qualifié de **capital naturel** et **capital manufacturé**, substitution qui ne peut être remise en cause à partir du moment où elle se fait en permettant un accroissement du bien-être général.

3. Rappelons que la gouvernance peut se définir comme une « manière de gouverner incluant des acteurs autres que ceux du monde politique » (Antoni, 2009). La notion de gouvernance, et plus spécifiquement de gouvernance territoriale (ou encore gouvernance locale ou urbaine) a émergé dans les années 1990 comme un système de gouvernement ou de gestion faisant intervenir de nombreux acteurs parmi lesquels certains n'appartiennent pas directement à la sphère du gouvernement (et ne sont donc pas des élus) : les acteurs sociaux et économiques d'un territoire ou d'un quartier, ses usagers et la société civile (les habitants) sont également impliqués dans la prise de décision. En urbanisme, cette nouvelle façon d'envisager la gestion des affaires politiques possède plusieurs avantages : elle rapproche les édiles (ceux qui construisent la ville) des usagers (ceux qui l'utilisent), elle crée les conditions d'un partenariat souvent nécessaire entre secteur public et privé, et elle permet aux citoyens de mieux participer à l'action publique par l'intermédiaire d'une concertation et d'une consultation renforcées.

Au sein des discours sur le développement durable, on voit donc émerger l'opposition entre ce qui sera plus tard qualifié de **durabilité faible** et de **durabilité forte** (Turner, 1992). Les défenseurs de la première, néoclassiques, apparaissent confiants dans les mécanismes de marché et dans l'imagination humaine pour répondre aux défis technologiques posés par les contraintes environnementales et pour envisager la substitution entre biens naturels et biens manufacturés. Les seconds, plus alarmés par l'ampleur et la nature des risques en jeu, mettent en avant le **principe de précaution** et les dangers des phénomènes irréversibles. Ils insistent sur les services particuliers rendus par la nature, que les biens manufacturés ne remplaceront jamais. Classiquement, on distingue alors toute une gradation des positions. D'un côté, pour les tenants de la *deep ecology* (Naess, 1973, 1989), notre planète, ses écosystèmes et ses animaux, en tant qu'êtres vivants, ont autant de droit d'exister que les hommes. Notre humanité et notre puissance technologique nous en rendent juste dépositaires. Les penseurs de l'*ecological economics* (Daly, 1971 ; Costanza *et al.*, 1997) cherchent quant à eux à établir le niveau de capital naturel critique qu'il est nécessaire de laisser aux générations suivantes. Les représentants de l'École de Londres (Pearce, 1976 ; Pearce *et al.*, 1989) tout en prônant un développement économique encadré par les limites environnementales, gardent une référence plus marquée au marché en utilisant par exemple la notion de **consentement à payer** dans la mesure de la valeur économique totale d'un bien environnemental. Au sein du courant néoclassique standard, enfin, on peut distinguer entre ceux qui penchent pour une **intervention de la puissance publique** permettant d'aider au mieux le marché à bien prendre en compte les problèmes environnementaux et sociaux et ceux qui sont pour le laisser-faire le plus large possible car nul autre que les agents économiques eux-mêmes ne peut mieux connaître leurs besoins et leurs possibilités (Smith, 1997).

Fort de ce constat, le projet VILMODe se fonde sur l'hypothèse qu'il ne peut y avoir de durabilité forte sans l'intervention de la puissance publique, selon le constat déjà identifié par P. Merlin (2002) au sujet de l'aménagement du territoire : l'aménagement est une intervention volontaire sur l'espace, qui vise à créer un ordre jugé souhaitable pour assurer « commodité, économie et harmonie ». Entendue dans ce sens, cette intervention volontaire apparaît nécessairement comme une forme de planification qui s'accorde mal avec le libéralisme, notamment parce qu'elle perd sa force si elle n'est pas soutenue par une planification économique, que cette dernière soit rigide ou non. De ce fait, les propositions faites dans le cadre de ce projet sont toutes des propositions qui demandent un engagement fort de la part des autorités planificatrices, et en particulier, dans le contexte des mobilités et des espaces urbains, des collectivités territoriales intervenant à différentes échelles (communes, communautés d'agglomérations ou urbaines, pays, etc.). C'est à chacune de ces échelles que le développement durable peut alors s'inscrire dans les territoires.

1.1.1.2. Une inscription territoriale

Entre Club de Rome et Croissance zéro en 1972, l'écodéveloppement des années soixante-dix et le développement durable de la CMED en 1987, les jalons de la notion sont fortement rattachés aux activités des institutions internationales. Ainsi, en 1992, le Sommet de la Terre finit d'installer le développement durable à l'agenda mondial en réunissant à Rio 172 pays sous l'égide de l'ONU⁴. Mais, un plan d'actions pour le 21^e siècle, l'Agenda 21, est

4. Après Rio, les engagements internationaux se poursuivent malgré des résultats décevants. Le sommet de Johannesburg (2002) fait le point sur les actions proposées dix ans plus tôt et met en avant les questions

également proposé qui, tout en restant décevant dans ses résultats au niveau international, a permis d'engager progressivement les **collectivités territoriales** dans les principes d'action du développement durable grâce à la mise en œuvre des **Agendas 21 locaux**. C'est cette déclinaison locale du développement durable qui amène les disciplines de l'aménagement et de la géographie à s'interroger sur la notion à la fin des années 1990 et début 2000, et à lui apporter une substance territoriale qu'il n'avait pas encore vraiment (voir par exemple Bailly, 2009).

De nombreuses autres initiatives sont lancées à la fin des années 1980 et au début des années 1990, qui vont également dans le sens d'une appropriation des problématiques de développement durable par les acteurs locaux. Des réseaux de villes se montent pour partager les expériences en matière de plans de réduction des émissions de CO₂, comme *Energie-Cités* et l'*Alliance Climat* (Criqui et Lefèvre, 2010). Ainsi, lorsque l'Union Européenne s'engage sur le Facteur 4 en 2007, les villes la suivent en signant la Convention des Maires pour une réduction de 20% de leurs émissions entre 1990 et 2020⁵. L'investissement technologique dans les **éco-quartiers** s'amorce dans les années 1990 et s'accroît la décennie suivante. Ceux-ci participent largement de la vitrine des villes qui s'y engagent. Par ailleurs, leur mise en place alimente les débats sur l'intégration de la dimension sociale dans les réponses urbanistiques aux problèmes environnementaux car certaines de ces expériences génèrent une forte ségrégation tandis que d'autres tentent de favoriser l'habitat social (Emelianoff, 2004 ; Boutaud, 2009).

En parallèle de ces différents mouvements, la charte d'Aalborg, signée en 1994 par les participants à la conférence européenne sur la **ville durable**, propose un cadre de réflexion renouvelé en matière d'urbanisme. En effet, elle remet en question les principes de la charte d'Athènes de 1933 prônant une ville fonctionnelle et hygiéniste, bâtie suivant une logique de sectorisation, et défend l'idée d'une ville compacte et d'une mixité fonctionnelle des quartiers. La démarche sera réaffirmée dix ans plus tard avec les Engagements d'Aalborg qui rencontrent le même succès. C'est dans ce contexte que de nombreuses réflexions plus théoriques tentent de mettre en cohérence **action territoriale locale et développement durable**. En effet, inscrire dans un substrat local, sans les trahir, ces grands principes établis pour une gestion globale de la planète nécessite leur traduction dans la matérialité et l'immédiateté du territoire, entendu ici dans ses trois dimensions existentielle, physique et organisationnelle (Le Berre, 1992). Les principes et les applications du développement durable, qui étaient déjà objets de négociation, d'instrumentalisation et de

de précarité et d'inégalités socio-spatiales, sans s'engager sur de nouvelles résolutions. Les négociations sur le climat se poursuivent avec le protocole de Kyoto (1997) et la conférence de Copenhague en 2009 pour aboutir à un accord sur les moyens à mettre en œuvre. En parallèle de ces négociations internationales, l'Agenda 21 de Rio lance la formule du « penser global, agir local » et amène les acteurs territoriaux à s'emparer de l'idée de développement durable comme principe d'action à leur niveau. L'association de villes ICLEI (*International Council for Local Environmental Initiatives*) lance dès 1991 une campagne test et poursuit un *lobbying* déterminé en leur faveur. Ils permettent de faire entrer les problématiques globales au niveau de l'action locale en croisant les dimensions de cadre de vie et de vivre ensemble avec les préoccupations environnementales et de réchauffement climatique. Leur relatif succès, notamment auprès des villes européennes, s'explique par la légitimation qu'ils apportent aux pouvoirs publics locaux en favorisant la décentralisation et en justifiant la mise en œuvre des politiques publiques locales (Emelianoff, 2010).

5. Le Facteur 4 vise à diviser par 4 les émissions de gaz à effet de serre à l'horizon 2050 en diminuant les consommations d'énergie et de produits dont la production génère de fortes quantités de gaz à effet de serre. La Convention des Maires, qui regroupe différentes autorités locales et régionales européennes (5335 signataires en novembre 2013), fixe quant à elle un objectif à peu près similaire de réduction de 20% des émissions de CO₂ en 2020.

reconstruction permanente au niveau international, se trouvent obligatoirement retraduits à chaque échelon, et pour chaque territoire avec ses spécificités, ses acteurs propres et son organisation particulière.

Tant les procédures que les objectifs et résultats des politiques de planification d'inspiration « durable » ne peuvent que varier selon les territoires (Selman, 1995). Pour illustration, F. Mancebo (2009) s'est intéressé aux politiques de développement durable mises en œuvre en Europe à différents échelons nationaux, régionaux et locaux. Il constate un foisonnement d'initiatives aux caractéristiques très diverses qui ne deviennent interprétables qu'à partir d'une **grille de lecture** à trois axes, selon la conception des ressources environnementales des planificateurs d'une part, la forme de gouvernance de référence (locale ou centralisée, participative, contractuelle, etc.) d'autre part, et le type d'équité privilégié (intra vs intergénérationnel) enfin.

Dans ce contexte, une première question touche à la hiérarchisation des objectifs de développement durable entre différents niveaux territoriaux. Sur ce point, P. Nijkamp *et al.* (1991) définissent un développement régional durable comme « un développement qui assure à la population de la région un niveau acceptable de bien-être (tant aujourd'hui que pour le futur) et qui soit compatible avec les contraintes écologiques locales à long terme tout en essayant, dans le même temps, de respecter un développement durable global ». Cette vision pose la question de la **hiérarchie explicite des objectifs de durabilité** : « l'absence de viabilité propre à certains espaces à certains moments historiques ne met pas par elle-même en péril le développement durable à l'échelle de la planète » (Godard, 2005). De ce fait, si les objectifs de développement durable du niveau supérieur l'exigent, par exemple dans le cas de besoins de préservation d'espaces naturels, de concentration de l'activité industrielle ou pour entreposer des déchets, des « sacrifices régionaux » (Nijkamp *et al.*, 1991) peuvent être envisagés, diminuant localement le bien-être de la population⁶.

Pour résumer, la déclinaison territoriale des principes d'équité éclairés par les problématiques de développement durable, soulève trois points : (i) le respect des principes de développement durable propres à un niveau ne peuvent être évalués qu'à partir d'un niveau géographique supérieur ; (ii) au niveau en dessous, la recherche d'un développement durable conduit d'une part à veiller à l'équité des échanges (c'est-à-dire un échange qui ne se fasse pas au prix d'une perte de capital naturel ou sans compensation économique équivalente, selon la vision du développement durable adoptée) et d'autre part à l'équité des localisations (en cherchant à préserver au mieux la qualité de l'environnement des différentes zones du territoire) ; enfin, (iii) la meilleure manière de gérer les problèmes de développement durable consiste à chercher à les résoudre au niveau adéquat et certainement pas à partir d'une centralisation excessive.

Ces trois points constituent une hypothèse forte du projet VILMODes : on les retrouve à la fois dans la grille de lecture qui permettra de construire des scénarios conduisant à un

6. Cette thématique de la hiérarchie posée ici en termes de sacrifices parfois nécessaires peut aussi être retournée pour exprimer l'idée que si les territoires urbains n'apparaissent pas durables en eux-mêmes, ils peuvent contribuer à la durabilité d'ensemble. Par exemple, la ville peut être perçue comme génératrice de coûts environnementaux importants et fortement importatrice de biens environnementaux prélevés à l'extérieur de ses frontières : à ce titre, son empreinte écologique est largement négative. Cependant, les économies d'agglomération qu'elle favorise et les économies d'échelle qu'elle permet, tant en déplacements qu'en utilisation d'infrastructures collectives diverses, font que le prélèvement de ressources par personne apparaît moins élevé pour les urbains que pour les résidents du périurbain et du rural. Le titre d'un article de l'urbaniste anglais D. Satterthwaite (1997) rend bien compte de ce débat : *Sustainable cities or cities that contribute to sustainable development?*

développement durable à l'échelle des territoires de Lyon et de Besançon (cf. § 2.1.2), structurés selon des échelles différentes, et dans l'interprétation des conséquences auxquelles ces scénarios conduisent (cf. § 3.2). Cet ensemble s'inscrit de surcroît dans le contexte de deux enjeux particulièrement cruciaux à l'heure actuelle pour la durabilité des territoires : l'étalement urbain et la possibilité d'une pénurie énergétique structurelle compte tenu des besoins prévus du fait de la croissance économique et démographique mondiale.

1.1.2 Etalement urbain et pénurie énergétique

L'étalement urbain est identifié depuis plusieurs décennies comme un phénomène néfaste qui s'oppose directement à la durabilité des villes. Mais malgré une planification engagée et des procédures réglementaires rigoureuses qui visent souvent à limiter l'automobile, à favoriser la mixité urbaine, à maintenir des commerces de proximité, à respecter les espaces naturels et à privilégier les espaces publics et les équipements⁷, les instances en charge des décisions locales continuent d'approuver des opérations qui contribuent à l'étalement urbain.

1.1.2.1. Crise et vulnérabilité énergétique

On peut voir trois raisons aux difficultés rencontrées par les politiques publiques qui visent à lutter contre l'étalement urbain (Antoni, 2010). Premièrement, l'étalement urbain est difficile à appréhender parce qu'il est mal défini : l'expression est généralement absente des dictionnaires ; ainsi, si la simple formule « étalement urbain » suffit souvent à le qualifier intuitivement, le phénomène est nettement plus délicat à appréhender concrètement. Deuxièmement, l'étalement urbain est un processus insidieux, dont la lenteur apparente masque la rapidité réelle ; il ne se voit pas instantanément : à court terme, seuls apparaissent les grues qui se détachent de l'horizon et les chantiers qui parsèment les campagnes environnantes ; à long terme, on réalise cependant qu'à travers ces ajouts successifs et insignifiants en eux-mêmes, c'est toute la ville qui s'étend. Troisièmement, l'étalement urbain est un phénomène transversal et mal cerné, pour lequel chaque secteur apporte un angle d'observation différent : un bureau d'études en transports et déplacements identifie un lien entre la progression du bâti et le réseau routier ; les études foncières montrent que les prix des terrains agricoles augmentent en même temps que l'urbanisation progresse ; un observatoire de l'habitat indique que la densité et la typo-morphologie des constructions s'uniformisent dans les périphéries des villes, etc.

L'ensemble de ces observations permet souvent de caractériser l'étalement urbain en partie ; mais individuellement, elles ne suffisent pas à le faire⁸. Il est effectivement très difficile

7. C'est notamment l'objectif de la loi française SRU (Solidarité et renouvellement urbain) de 2000. Elle répond directement à l'étalement urbain et à ses conséquences, en prenant la mesure des enjeux des villes d'aujourd'hui : lutter contre la périurbanisation et le gaspillage de l'espace en favorisant le renouvellement urbain, inciter (voire contraindre) à la mixité urbaine et sociale, et mettre en œuvre une politique de déplacements au service du développement durable.

8. Nelson *et al.* (1995) ont résumé les différentes définitions d'étalement urbain dans la littérature avec l'objectif de créer une définition du concept pour leur travail. Ils définissent donc l'étalement urbain comme un « développement à usage singulier non-planifié, incontrôlé et non-cordonné qui ne prévoit pas de mixité fonctionnelle au service du voisinage. Il s'agit selon le cas d'un développement à basse densité, enclavé, discontinu, à saute-mouton ou bien isolé ». Carruthers and Ulfarsson (2002) estiment quant à eux que l'étalement urbain provoque une consommation excessive d'espace liée à la sous-évaluation économique

de mettre en commun l'ensemble de ces constats pour les généraliser et formaliser la manière avec laquelle **l'urbanisation et les transports s'y intègrent**. Considéré dans les changements qu'il implique sur la morphologie et la définition de la ville, comme sur les conséquences environnementales et sociales auxquelles il conduit, l'étalement urbain apparaît comme un phénomène majeur dans la répartition actuelle des hommes et des activités sur le territoire, et dans la recomposition des espaces urbains. En même temps qu'il répond à une pression démographique à l'origine d'une crise du logement latente, et qu'il offre un accès à des modes et des cadres de vie privilégiés par la majorité des habitants, il implique des conséquences qui condamnent, à relativement court terme, la durabilité de l'espace géographique des villes. Cette condamnation n'est pas difficile à montrer ; on peut citer par exemple :

- Les îlots de chaleur urbains : si les villes n'occupent que 2% de l'espace terrestre, elles en consomment 75% des ressources énergétiques pour leur fonctionnement, ce qui provoque une augmentation locale des températures, favorisée par la structure agglomérée des bâtiments (Gago *et al.*, 2013), et qui semble contribuer aux perturbations climatiques et environnementales actuelles ;
- La congestion routière : si la mobilité apparaît aujourd'hui comme une nécessité fondamentale pour le fonctionnement des aires urbaines, elle se traduit par un coût temporel et économique important (cf. par exemple Koning, 2009), généralement pris en charge pour les acteurs économiques et publics, mais qui pourrait se reporter sur les usagers par la mise en place de péages urbains (Raux, 2007) ;
- La valorisation sociale des lotissements de maisons individuelles : si J.P. Orfeuil et D. Soleyret (Lepetit et Yvernogeu, 2012) ont parlé d'*effet barbecue* pour relativiser les déplacements périurbains durant les week-end (les habitants s'y consacrent à leur barbecue), on peut leur opposer un *effet tondeuse* qui relativise le retour sur investissement de cette activité de jardin (un entretien corvéable de tonte du gazon est nécessaire avant que l'on puisse allumer son barbecue), et plus généralement des aménités périurbaines ;
- La perturbation de l'habitat écologique périurbain : la construction de routes associée aux mobilités urbaines croissante déstructure la connectivité des habitats faunistiques dans l'écotone périurbain, avec des impacts sur la biodiversité qui restent aujourd'hui difficiles à mesurer (cf. par exemple Foltête *et al.*, 2013).

Dans ce contexte, l'étalement urbain apparaît comme un dilemme pour les décideurs et les acteurs locaux, qui d'une part, souhaitent répondre aux aspirations de la population (comme en témoignent les différentes politiques d'accession sociale à la propriété privée, notamment l'objectif « maison à 100 000 euros » lancé en France en 2008), mais qui, d'autre part, doivent limiter les conséquences qui peuvent en découler, tant sur le plan social que sur le plan environnemental. Dans ce contexte, l'arbitrage est souvent délicat et relève de choix politiques forts, parfois impopulaires, notamment quand il s'agit de limiter la mobilité automobile, de taxer les déplacements ou de construire des logements sociaux là où il n'y en a pas encore. La gestion de l'étalement urbain, et plus généralement de la croissance urbaine, peut donc s'entendre comme une forme de **géopolitique manœuvrée par un jeu d'acteurs complexe** : une population qui souhaite choisir son espace de résidence, des acteurs économiques qui tirent leurs avantages de la « périphérisation » et de la promotion immobilière, et des édiles qui légifèrent au mieux avec les outils de l'urbanisme

des espaces agricoles, à la congestion qui découle des migrations domicile-travail, et à la ségrégation socio-économique provoquée par un marché du logement excluant (*exclusionary*). Neuman (2005), citant Burchell *et al.* (1998) liste ce qui différencie la ville compacte de la ville étalée, montrant qu'il est effectivement très difficile de mettre en commun l'ensemble de ces constats pour les généraliser et formaliser.

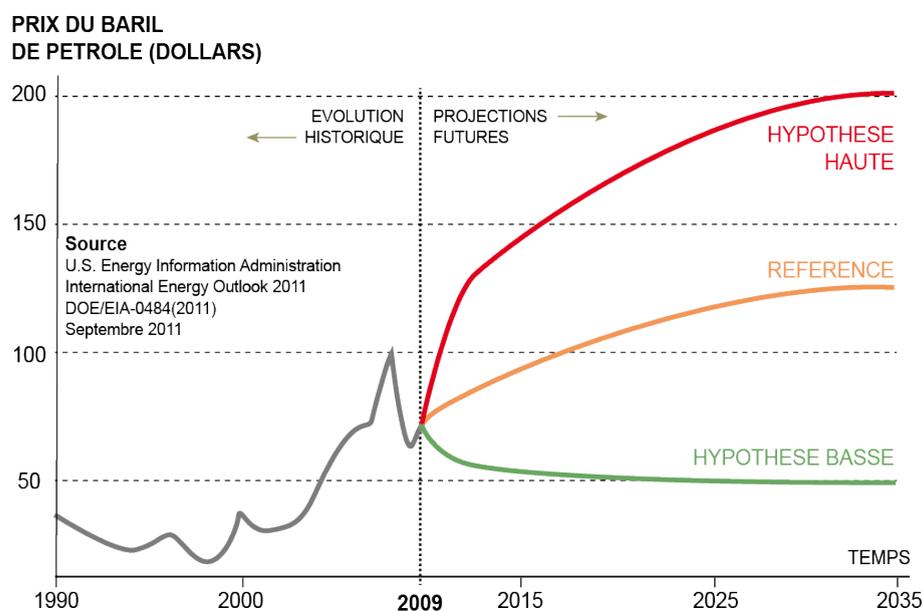


Figure 1.1 – Evolution et projections futures (1990-2035) du prix de l'énergie selon l'EIA. La courbe retenue pour VILMODEs est la courbe orange (référence)

réglementaire. Mais cette gestion s'appuie désormais sur de nouveaux concepts, encore mal définis, délicats à mettre en œuvre et peu concrets, qui font généralement référence à une re-localisation possible des équipements.

1.1.2.2. De l'étalement à la relocalisation

D'après Galster *et al.* (2001), la littérature ne fournit pas de définition commune de l'étalement, mais il est possible de regrouper les différentes définitions. Dans le même registre, on peut également citer Ewings (1997) : « *Despite a lack of agreement, sprawl is often defined by four land use characteristics : low density ; scattered development (i.e. decentralised sprawl) ; commercial strip development ; and leapfrog development. The last three are spatial-structure-based phenomena of sprawl, as opposed to density based-sprawl* ». Il en ressort que l'étalement urbain, dans une aire urbaine, peut-être défini par la présence simultanée de « niveaux faibles » dans les huit dimensions d'utilisation du sol : densité, continuité, concentration, clustering, centralité, polarisation, mixité fonctionnelle et proximité.

La réponse classique à l'étalement urbain, dans une partie de la communauté scientifique, et dont les médias et politiques se font largement l'écho, est d'encourager le développement d'une ville compacte et dense, mettant en avant le fait qu'elle (i) favorise l'utilisation des transports publics, (ii) permet une bonne accessibilité aux commerces et services et (iii) réduit la ségrégation sociale (Dantzig et Saaty, 1973). Cependant, d'autres auteurs (Banister, 1992 ; Breheny, 1992, 1997 ; Owens, 1992) ont émis des doutes sur l'efficacité de ces politiques en montrant que la ville compacte a souvent pour corollaire (i) une hausse des prix fonciers, (ii) une augmentation de la congestion des axes routiers et (iii) une réduction de l'accès aux espaces verts et naturels. Parallèlement à ces travaux empiriques, certains chercheurs promeuvent des modèles d'aménagement tentant de sortir de l'opposition binaire entre dense et peu dense, comme P. Calthorpe avec le *New Urbanism* (1992), ou P.

Frankhauser (2004) avec la ville fractale.

Ainsi, d'un point de vue académique, la lutte contre l'étalement urbain et ses effets néfastes ne semble pas se situer dans la coercition réglementaire empêchant toute implémentation résidentielle ou commerciale au-delà des limites de la ville (lesquelles restent en elle-mêmes extrêmement difficiles à définir), mais plutôt dans la re-localisation des éléments moteurs de l'urbanisation. Plusieurs formules s'opposent alors : compacter le développement urbain *dans* un *sur* les éléments déjà construits ou les canaliser autour d'infrastructures de transport efficaces. C'est l'étude et l'évaluation de ces différentes possibilités à travers la modélisation informatique qui constitue l'objectif du projet VILMODes.

1.2 Objectifs

Le contexte présenté plus haut justifie en lui-même le projet VILMODes, qui vise à étudier d'un point de vue théorique les possibilités de lutter contre un étalement urbain mal contrôlé et d'anticiper la pénurie énergétique, en évaluant les conséquences des politiques d'aménagement à l'horizon 2030, que ces dernières soient classiques ou plus innovantes. Pour ce faire, le projet se fonde sur un état de l'art et un corpus conceptuel délicats à manipuler de prime abord, qui mobilisent la notion de forme urbaine entendue dans toutes ses variantes, de la ville étalée à la ville compacte (§ 1.2.1). Il conduit naturellement à la prise en compte couplée des relations urbanisation/transport, entendues comme les processus à l'origine de ces formes, et à la description des modèles LUTI qui permettent de les étudier dans une logique intégrée (§ 1.2.2).

1.2.1 Concepts mobilisés et état de l'art

Le jeu de localisation ou de re-localisation des éléments moteurs de l'urbanisation au sein des aires urbaines implique et met en jeu plusieurs notions complémentaires qui restent pour une bonne part assez difficile à appréhender et mal définies. Il apparaît donc nécessaire de préciser certains concepts mobilisés, en particulier les notions de forme urbaine, de densité et de compacité.

1.2.1.1. Formes urbaines

Dans les pays latins, le terme de **forme urbaine** a été initialement introduit pour décrire l'évolution des structures physiques de la ville, principalement son cadre bâti (Muratori 1959, Aymonino *et al.* 1970). La notion de compacité ou d'étalement renvoie alors au mode de construction de l'espace urbanisé ; la forme est entendue comme un objet matériel. Dans son histoire de l'urbanisme, P. Lavedan (1926, 1941, 1952) appréhende la forme urbaine sous l'angle des tracés urbains, donc des réseaux. Il s'agit d'une autre notion de forme urbaine, mais toujours centrée sur l'occupation du sol.

Par ailleurs, le terme de « forme urbaine » peut être entendu comme le décalque de la **forme sociale** : l'espace urbain est alors décrit par son occupation et la distribution des populations et des fonctions, dans les travaux de E. Durkheim (1960) ou ceux de l'école de Chicago (Grafneyer et Joseph, 1984). Cette forme urbaine ne renvoie plus à des structures uniquement matérielles : elle décrit aussi bien les formes physiques que les formes spatiales.

B. Hillier (1984), dans son approche de la *Space syntax*, va plus loin dans la dissociation entre formes physiques et formes spatiales en séparant l'espace de la forme bâtie, et en faisant de l'espace en tant que tel le coeur de sa recherche.

Au-delà de ces différences, il existe une divergence plus fondamentale dans la mesure où le terme peut tout autant recouvrir un caractère purement descriptif, écartant les jugements de valeurs, que renvoyer à des modèles de **ville-type**, comme celui de la ville préindustrielle. Le débat sur la compacification des villes rejoint cet aspect de la définition des formes urbaines : la ville compacte est autant une ville-type qu'une ville dont la structure physique, son occupation et son fonctionnement présenteraient des caractéristiques bien définies.

Dans le monde anglo-saxon également, la multiplicité des concepts de formes urbaines se traduit par une multitude de dénominations : *urban form*, *urban design*, *urban shape*, etc. Anderson *et al.* (1996) proposent une définition à la fois large et pragmatique : « La forme urbaine peut être définie comme la structure spatiale des activités humaines à un temps donné ». Cette définition regroupe sous un même terme la forme sociale et la forme des structures physiques de la ville. Elle a l'avantage d'éviter une lecture trop littérale du concept comme « forme de la ville », lecture qui nécessiterait de définir au préalable le concept de ville en lui-même, et qui renvoie immédiatement à la question des **limites de la ville**, épineuse dans le contexte de l'étalement urbain et de l'apparition d'espaces multipolarisés (Choay, 1993). Selon F. Le Néchet (2010), le fonctionnement d'une ville, distinct de la forme et du contenu, mais capté pour partie dans la définition de la forme sociale, ferait alors partie intégrante de la forme urbaine : « Le fonctionnement est, erronément, peu souvent qualifié de « forme urbaine » dans la mesure où il s'écarte beaucoup d'une référence traditionnelle à des formes variées d'usage du sol ».

Dans le cadre du projet VILMODes, nous adoptons également ce positionnement en postulant que la forme urbaine résulte de l'interaction entre la morphologie (cadre bâti et réseaux) et l'occupation ou l'utilisation du sol, en termes de choix de localisation et mobilité. La forme urbaine est ainsi en même temps cause et conséquence du fonctionnement d'une ville : la séparation entre forme et contenu, ou encore entre formes spatiales et formes sociales, ne conduit pas une logique causale d'explication de l'un par l'autre.

1.2.1.2. Densité

Le terme de forme urbaine n'est pas le seul terme polysémique sur lequel il est délicat de proposer une définition qui fasse consensus. Les concepts de densité et de compacité présentent la même diversité de sens et d'usages. La ville dense, ou ville compacte (les deux termes sont souvent utilisés à tort comme des synonymes) est généralement définie comme opposée à la ville étalée. Littéralement, la densité peut se définir comme un « nombre d'éléments, en général des bâtiments ou des habitants, rapporté à une unité de surface donnée » (Antoni, 2009). Mais, si elle est relativement simple à calculer pour un chimiste ou un physicien (la densité d'un gaz par rapport à l'air correspond au rapport de la masse d'un certain volume de ce gaz à la masse d'un égal volume d'air dans les mêmes conditions de température et de pression), elle apparaît nettement plus complexe quand elle s'applique à la ville.

De façon très simple, la densité apparaît ainsi de prime abord comme un indicateur pertinent pour l'étude des villes et de leurs périphéries, permettant d'y saisir la répartition et

l'importance des constructions ou des personnes. Triviale au premier abord, elle demande néanmoins à être interprétée avec une grande précaution. En effet, la surface à considérer pour le calcul d'une densité peut considérablement varier et permet en réalité d'en calculer trois types : (i) la densité brute calculée par rapport à la surface totale de l'aire de référence, (ii) la densité de population nette pour laquelle le dénominateur comprend l'ensemble de l'aire construite (c'est-à-dire également les zones destinées aux infrastructures et équipements, mais pas les surfaces non bâties), et (iii) la **densité résidentielle** pour laquelle seules les surfaces résidentielles sont prises en compte (sans les routes ni les équipements ou les bâtiments industriels et administratifs). Ainsi, suivant le mode de calcul et la configuration propre à chaque ville, les densités peuvent varier du simple au quadruple, ce qui relativise leur pertinence dans l'élaboration normative d'un projet d'urbanisme, en particulier quand il se double d'une approche comparative. Dans ce contexte, des qualificatifs comme dense, peu dense, étalé, diffus (etc.), sont excessivement dépendants de l'échelle et des territoires : ce qu'on qualifie en Europe de ville étalée apparaît dense et compact pour l'Amérique du Nord, si bien qu'on désigne avec des mêmes mots des réalités très différentes. D'après Acioly (2009), il est de ce fait impossible de déterminer des règles absolues de niveaux idéaux de densité, ou même des niveaux de densité recommandés, particulièrement en ce qui concerne le développement résidentiel⁹.

Parallèlement à ce problème de mesure, la densité des espaces bâtis apparaît également comme une notion à double tranchant : d'un côté, elle possède l'avantage incontestable de rapprocher les choses les unes des autres (et permet alors de renouer avec une certaine proximité) ; mais d'un autre côté, elle est perçue comme un pis aller et peut entraîner un sentiment de répulsion, associé à l'idée d'entassement et de promiscuité. Il convient donc de distinguer la densité de ce que les anglo-saxons nomment le *crowding* et que l'on pourrait traduire par **sentiment d'entassement**. Dans certains cas, la densité semble en effet entraîner un inconfort psychologique (voire physique) ou un stress individuel, provoqués par une surstimulation, qui se traduit de façon négative sur leur comportement (comportement froid et distant, évitement des espaces communs, conversations réduites, attitude passive, repli, apathie, etc.), et finalement un affaiblissement des liens sociaux. Dans d'autres cas par contre, la densité peut engendrer l'effet inverse¹⁰. La densité renvoyant à cette ambivalence et à des référentiels difficiles à définir, nous préférons nous concentrer sur le concept de compacité.

1.2.1.3. Compacité

Le terme de ville compacte renvoie à une ville dont la forme (dans le sens que nous venons de définir) serait compacte. Il convient donc de préciser cette notion de compacité.

9. Plusieurs cas d'étude ont montré que ce qui est considéré comme un niveau bas ou haut de densité, et comme un niveau acceptable, diffère non seulement selon les continents et les pays, mais même selon les villes et les quartiers d'une même ville. Cela rejoint par ailleurs la pensée de V. Fouchier (1997) qui distingue cinq différents types de densité selon l'échelle de référence : densité par unité de micro surface (unité de logement par exemple), densité parcellaire, densité à l'îlot, densité communale ou régionale (ou concentration), densité nationale ou internationale.

10. C'est par exemple ce que décrit Périclès, qui se réjouissait de rencontrer entre cent et cent cinquante personnes en parcourant chaque matin la route qui le menait de chez lui à l'Assemblée. De même, l'architecte néerlandais R. Koolhaas fait l'éloge de la densité : « Face au plaisir de la nature, le plaisir métropolitain est une espèce de perte de l'individu dans une expérience partagée très dense et très compacte. Il y a aussi l'expérience de savoir qu'un million de plaisirs sont accessibles : c'est le potentiel de plaisirs qui représente pour moi le plaisir de la ville exacerbée au maximum ».

En architecture, la compacité renvoie directement à la notion de vide : on peut mesurer la compacité d'un bâtiment par le rapport entre l'aire de son enveloppe et son volume. En mathématiques, la définition de la compacité est une notion topologique relativement abstraite ; dans le cas des espaces vectoriels normés de dimension finie (l'espace au sens usuel du terme), par exemple, les espaces compacts sont les **parties fermées bornées**. Ainsi, une ville compacte serait intuitivement une ville dans laquelle les vides sont remplis le plus possible, une ville fermée (avec une frontière), mais pas nécessairement en un seul morceau.

Comme nous l'avons rapidement mentionné (cf. § 1.1.2), il existe une tendance générale à considérer que le retour à des villes plus denses et plus compactes serait la solution pour rendre les villes plus durables, en réduisant notamment les consommations énergétiques et le retour à l'automobile. Pour autant, le débat est très ouvert quant à la soutenabilité d'un tel modèle (Bourne, 1992 ; Batty, 2008 ; Wiel 2008 ; EEA, 2011) face à une ville étalée ou peu dense (Gordon and Richardson, 1997 ; Peiser, 2001 ; Neuman, 2005), même si la majorité des auteurs tendent à soutenir le premier, notamment d'un point de vue environnemental (Newman and Kenworthy, 1989, 1992), et en tant que « moyen » pour attendre un développement urbain durable (Jenks *et al.*, 2009). Le « **Paradoxe de la ville compacte** » (Wiersinga, 1997) reste bien défendu d'un point de vue social, notamment parce que les habitants semblent en majorité opposés à un tel modèle de densité urbaine. Afin d'apporter une pierre à ce débat, nous proposons d'orienter les réflexions autour de trois formes urbaines à évaluer dans le cadre du projet VILMODEs :

1. **Forme diffuse ou étalée**

Configuration d'un Laisser faire (LF) peu ou pas interventionniste conduisant à un étalement urbain selon les préférences résidentielles et les règles du marché foncier actuellement identifiées ;

2. **Forme compacte**

Intervention publique forte visant à réduire très fortement l'urbanisation résidentielle périphérique pour privilégier un Renouvellement urbain compact (RUC) au sein des tâches urbaines les plus importantes de l'agglomération ;

3. **Forme compacte mais ouverte**

Intervention publique forte appuyée sur un investissement dans les système de transport en commun pour identifier des zones à densifier selon une logique fractale à proximité des stations de transport public, et permettant d'habiter loin (spatialement) tout en restant proche (temporellement), selon une logique que nous qualifions de *fractal oriented development* (FOD).

Ces trois configurations, représentées par la Figure théorique 1.2 (p. 17), correspondent aux trois scénarios testés dans le projet VILMODEs (cf. § 2.1.2), et demandent à être éprouvées dans le long et le moyen termes de la prospective territoriale. Pour ce faire, il est possible de simuler leurs conséquences d'un point de vue social et spatial, en recourant à la modélisation urbanisation/transport.

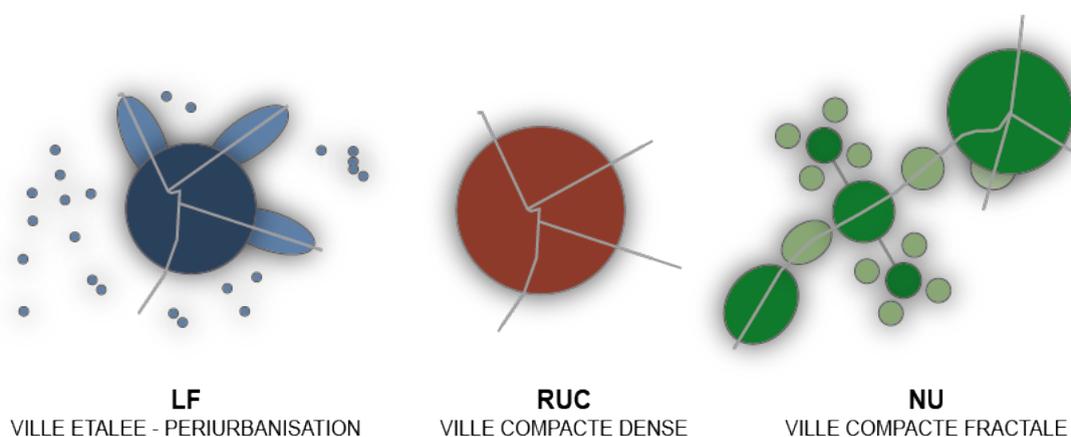


Figure 1.2 – Localisation spatiale théorique des trois scénarios

1.2.2 Modélisation urbanisation/transport

1.2.2.1. L'approche prospective

En économie comme en géographie, la recherche urbaine tente aujourd'hui d'intégrer une démarche prospective et s'efforce de ne pas raisonner dans un cadre absolu (« toutes choses égales par ailleurs »), mais de **réfléchir en termes de scénarios**, souvent contrastés, afin de brasser un panel plus large de devenirs possibles, et de vérifier l'adage désormais célèbre du philosophe M. Blondel : « L'avenir ne se prévoit pas, il se prépare ». Introduite en France par G. Berger en 1957, la prospective s'inscrit également dans cette volonté de mieux maîtriser un destin commun : « L'avenir n'est pas seulement ce qui peut arriver ou ce qui a le plus de chances de se produire. Il est aussi, dans une proportion qui ne cesse de croître, ce que nous aurons voulu qu'il soit ». Dès lors, il s'agit de construire et d'étudier les futurs possibles et leurs conséquences autour des deux champs qui ont servi à la construction du néologisme : la prospection (l'exploration de domaines nouveaux) et la perspective (qui induit les notions de point de vue et de futur). Limitée d'abord au domaine économique et au court terme, la prospective touche aujourd'hui de nombreux domaines, et s'intéresse très largement au long terme, les démarches improvisées et peu systématiques des débuts ayant fait place à une dimension de plus en plus scientifique, au sein de laquelle la formalisation mathématique est de plus en plus présente (Antoni, 2013).

Ainsi, dans le contexte de l'évolution des territoires, J. de Courson (1999) distingue trois manières d'étudier le futur : (i) La projection qui consiste simplement à prolonger mécaniquement des évolutions passées, parfois sans grand souci de réalisme ; (ii) La prévision qui s'appuie généralement sur une projection, mais tente de tenir compte d'autres évolutions afin de déterminer une fourchette de possibilités associées à un degré de confiance plus ou moins connu ; (iii) La prospective, qui décrit les futurs possibles et les cheminements nécessaires pour y parvenir dans un cadre ouvert, dynamique et plus volontariste, traduisant souvent l'engagement de ceux qui construisent les scénarios de demain. Concrètement, pour les urbanistes comme pour les aménageurs, il s'agit ici de savoir, ou plutôt de prévoir, ce que provoquerait la construction d'une route sur la croissance démographique d'une commune, de considérer l'ouverture de son urbanisation et ses conséquences sur le plan de déplacements, et à terme, sur sa politique de transport, d'anticiper l'impact de ces infrastructures ou de ces développements sur l'économie, et de comprendre, dans la me-

sure du possible, comment celle-ci les contraint ou les favorise. Le moyen le plus simple d’y parvenir serait évidemment de tenter l’expérience *in vivo* : construire, urbaniser, observer les conséquences. Mais c’est pratiquement impossible, parce que les opérations d’aménagement se font sur le temps long et apparaissent souvent irréversibles, parce que leur coût est souvent faramineux, parce que ce serait probablement contraire à l’éthique. Une solution crédible consiste alors à **recourir à la simulation**, c’est-à-dire à la construction d’un modèle qui réagit d’une manière semblable à ce que l’on veut étudier et qui permettra de déduire des résultats transposables dans la réalité (Antoni, 2013).

1.2.2.2. Une modélisation intégrée

La simulation de scénarios d’aménagement, fondée sur l’approche de la prospective territoriale, est une démarche encore relativement neuve en urbanisme et dans l’ingénierie des transports. Elle nécessite l’utilisation d’outils adaptés, afin de prendre en compte, de gérer et d’analyser la complexité et l’entrelacement des dynamiques urbaines, avant de les projeter dans le futur. Parmi ces outils, **les modèles LUTI** (*Land use and transport interactions*) offrent aujourd’hui des perspectives importantes pour l’aide à la décision, qui se mesurent dans l’ambition des chercheurs en sciences sociales de modéliser la ville (Antoni, 2013 ; Wegener, 2014).

Nés aux États-Unis dans les années 1980, arrivés plus tardivement en France, les modèles LUTI sont une réponse scientifique désormais presque classique pour prendre en compte les mobilités quotidiennes et résidentielles d’une aire urbaine. Aujourd’hui mis au point et appliqués dans l’ensemble des pays développés et dans certains pays émergents, ces modèles proposent tous des approches différentes du même problème : ils offrent une dimension prédictive ou prospective sur le futur des infrastructures de transport et leur utilisation, en lien avec la forme et l’expansion de l’habitat et des activités humaines qui en découlent, et vice-versa ; ils évaluent ces projections au regard des objectifs concrets du développement durable (émissions de polluants, qualité et mixité du voisinage résidentiel, impacts environnementaux, etc.) ; ils vont jouer à l’avenir un rôle croissant dans la concertation et la prise de décision en matière d’investissements économiques, sociaux ou environnementaux car ils permettent de mettre en perspective les relations entre les décisions de court terme et les projections de long terme.

D’un point de vue conceptuel, la modélisation LUTI part du principe que le système urbain s’appuie sur une complexité manifeste, incarnée par l’existence de plusieurs sous-systèmes, tous interconnectés et interdépendants. Ce sont ces sous-systèmes qui entrent en interaction et qui doivent être pris en compte dans les modèles. M. Wegener (1999) en identifie huit¹¹ qui n’évoluent pas à la même vitesse :

– **Evolutions très lentes**

Elles concernent l’occupation du sol (1) et les réseaux (2), c’est-à-dire les éléments « permanents » de la morphologie urbaine. La réalisation d’infrastructures de transport s’étale sur plus de 10 ans et demeure viable dans le temps (elle est rarement abandonnée).

11. Un neuvième sous-système est également identifié par M. Wegener (1999) : celui de l’environnement urbain, dont la temporalité s’avère complexe à définir puisque les impacts vont des nuisances sonores et de la pollution de l’air (impacts immédiats) ou aux grands changements climatiques globaux (impacts à très long terme) en passant par la contamination des sols ou des eaux (impacts à moyen terme). Ce sous-système est impacté par tous ceux décrits précédemment, tandis que lui-même n’impacterait que les choix de localisation des individus et des activités.

De même, l'occupation du sol est globalement stable, les changements sont marginaux.

– **Evolutions lentes**

Elles concernent les logements (3) et les lieux d'emploi (4) : les bâtiments abritant logements et activités ont une durée de vie d'un siècle voire plus (supérieure aux habitants et aux entreprises qui les occupent). Leur construction s'étale également sur plusieurs années.

– **Evolutions rapides**

Elles concernent l'emploi (5) et la population (6) : les entreprises s'implantent, se délocalisent ou ferment, impactant de ce fait la distribution des emplois sur le territoire. De même, la localisation des ménages influence le marché du logement, de la consommation, du parc automobile, etc.

– **Evolutions immédiates**

Elles concernent les transports (7) et la mobilité (8) : l'implantation des logements et des activités donne lieu à des besoins de déplacements de personnes ou des flux de marchandises. Ces mobilités s'opèrent sur une temporalité horaire (voire à la minute) et peuvent ainsi être très variables, en fonction de la congestion du trafic ou de la fluctuation de la demande de biens.

La mise en valeur de ces sous-systèmes conduit à l'émergence d'interactions en ce qui concerne l'usage des sols et les infrastructures de transport. Wegener et Furth (1999) partent alors du principe que « la séparation des activités humaines crée le besoin de déplacement (etc.) et donc la périurbanisation des villes est liée à la l'augmentation de la division spatiale du travail », impliquant ainsi une hausse de la mobilité. S'appuyant sur les travaux de Kanafani (1983), Masson (2000) relève que « la demande pour le transport urbain est directement liée à la demande d'activités urbaines et découle de celles-ci ». Elle fait émerger la notion de besoin de déplacement, appuyé sur les interactions entre activités socio-économiques dispersées dans l'espace : la demande de transport est générée par les besoins suscités par les activités sociales et économiques distribuées au sein de l'espace de l'agglomération. A l'inverse, l'implantation d'infrastructures de transports va également influencer les choix de déplacement des individus, par les possibilités de mobilités qu'elle offre. Ainsi, l'on a pu voir s'étaler la ville à mesure que se développait les infrastructures et réseaux de transports : de la ville médiévale, dense et compacte, à la ville moderne diffuse, l'apparition de la motorisation et des réseaux routiers et ferroviaires a permis l'expansion urbaine (Wegener and Furth, 1999).

Ces principes sont généralement schématisés par une boucle de rétroaction urbanisation/transport sur laquelle l'ensemble des modèles LUTI s'appuient aujourd'hui de près ou de loin (Figure 1.3). Cette boucle de rétroaction met en évidence des relations telles que la répartition de l'occupation du sol détermine la localisation des activités humaines ; la répartition de ces activités engendre des interactions spatiales caractérisées par des mobilités via le système de transport, pour surmonter les problèmes de distance et d'éloignement ; la répartition des infrastructures de transport crée des opportunités d'interaction spatiale et s'illustre par la création de flux sur les réseaux, faisant apparaître la problématique de l'accessibilité et de la congestion ; la répartition de l'accessibilité détermine les décisions de localisation et influe ainsi sur l'usage des sols. Au coeur de cette boucle d'interactions se trouve ainsi le système de transport, élément fondamental de la mobilité et de la localisation des activités et des individus. L'extrême complexité des paramètres composant ces interactions rendent incontournable le recours à la modélisation mathématique et la

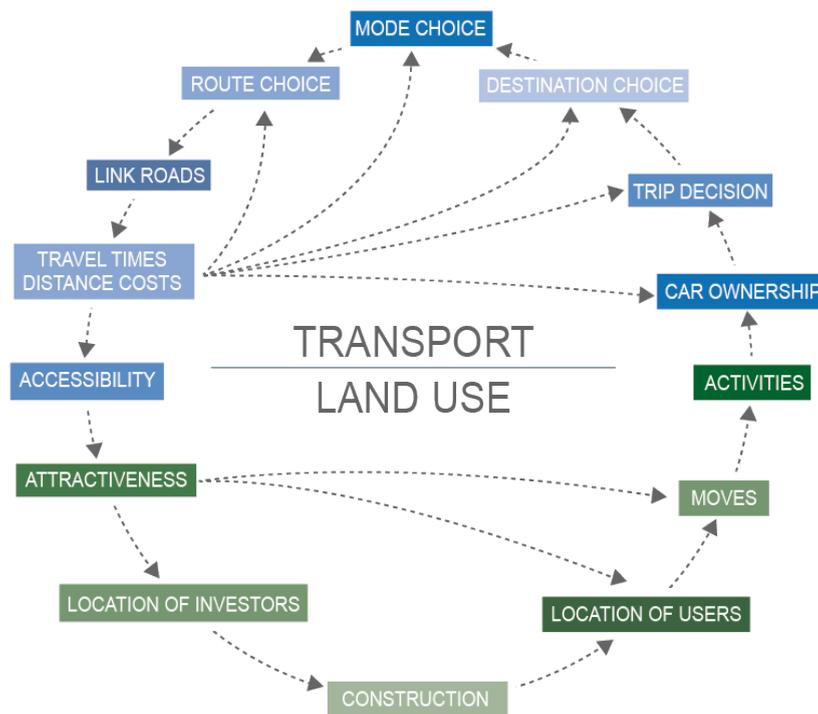


Figure 1.3 – La boucle de rétroaction Urbanisation-Transport de M. Wegener

simulation informatique. Des modèles interactifs doivent donc être élaborés, notamment à destination des projets de planification conduits par les pouvoirs publics.

Conclusion

Dans le contexte socio-économique évoqué ci-dessus, et dans le cadre des avancées scientifiques qui constituent aujourd’hui la pointe de la recherche dans ce domaine, VILMODEs a pour objectif d’évaluer par la simulation différents scénarios de développement urbain à horizon 20 ans. Le projet souhaite ainsi éclairer les effets de politiques visant à densifier la ville, par des politiques de renouvellement urbain et de découragement d’usage de l’automobile, mais également d’autres politiques plus ambitieuses qui mettraient en œuvre les principes de la ville durable.

Les simulations effectuées dans VILMODEs se veulent des évolutions prospectives des territoires plutôt que des utopies ou des modèles théoriques trop extrêmes. Ainsi, une importance particulière est-elle accordée au diagnostic territorial, et à la manière de mettre en œuvre les politiques envisagées avec les outils d’aménagement dont disposent les pouvoirs publics : plans locaux d’urbanisme, modifications réglementaires, projets de transport, etc. Les scénarios sont évalués au crible de la durabilité, en regardant classiquement le volet économique, social et environnemental de chaque scénario. Cependant, dans leur construction même, un autre critère de durabilité est introduit : la capacité des villes à continuer de croître et de se développer dans le futur. Un scénario durable le sera donc également par sa capacité à ne pas saturer l’espace disponible, et atteindre plus ou moins rapidement un seuil de durabilité au-delà duquel le modèle de développement urbain se heurtera.

Ces scénarios peuvent correspondre à une évolution spontanée des territoires, c'est-à-dire sous l'effet des seules actions des acteurs économiques (individus, entreprises, promoteurs, etc.), ce qu'on désigne sous l'appellation « Laisser-faire » (ce que les anglo-saxons nomment parfois *business as usual*). Ils peuvent également correspondre à des évolutions impulsées, de manière non limitative, par des modifications du cadre réglementaire (notamment les Plans Locaux d'urbanisme, PLU), des opérations de rénovation urbaine, le développement de nouvelles infrastructures de transport, ou encore la modification de plans de circulation ou le déploiement de nouveaux services de mobilité.

Enfin, concernant la simulation et l'évaluation des scénarios de développement urbain, le parti-pris de VILMODe est de ne pas développer un n -ième nouveau modèle, mais de tirer profit de la richesse et de la diversité des modèles existant développés par les partenaires, dans le cadre d'une recherche collaborative et interdisciplinaire, tant d'un point de vue thématique que technique.

Chapitre 2

Scénarios, modèles et simulations

L'AMÉNAGEMENT des espaces urbains peut aujourd'hui s'appuyer sur une batterie renouvelée d'outils, de concepts et de méthodes, qui insistent sur la complexité des projets d'urbanisme et sur la difficulté qui découle à prévoir les conséquences humaines, sociales et économiques du développement des villes. De par la complexité de leur fonctionnement et les problèmes spécifiques qu'elles engendrent, les villes sont en effet devenues l'une des principales préoccupations des collectivités territoriales. Dans le domaine scientifique, cette idée est relayée par de nouvelles approches épistémologiques, qui invitent à mieux prendre en compte la complexité, en introduisant de nouvelles méthodes afin de consolider la recherche sur la notion de « territoires durables ». Dans ce contexte, les approches traditionnelles et sectorisées de l'urbanisme apparaissent de moins en moins efficaces pour considérer les processus à l'œuvre dans la totalité de leur complexité, et de plus en plus de projets tentent désormais de s'appuyer sur des simulations fondées sur des scénarios prospectifs. Ces simulations reposent nécessairement sur une modélisation préalable, dont découlent des outils développés de manière spécifique. Les modèles LUTI (*Land Use and Transit Integrated*), comme nous l'avons vu dans le Chapitre 1, sont un excellent exemple de modèles-outils pour l'aide à la décision en aménagement. Ils prennent aujourd'hui une dimension opérationnelle très directe du fait de l'évolution des possibilités de calculs informatiques. Cela étant, ces modèles ne sont toujours que des outils, et s'ils produisent des résultats, ces derniers ne reflètent que les hypothèses de calcul du modèle, combinées à l'image des scénarios qui y ont été introduits. La construction de scénarios pertinents, et la philosophie qui les sous-tend, apparaît donc comme une étape absolument fondamentale de la démarche de modélisation en aménagement et en urbanisme.

2.1 Philosophie des scénarios

Nous voulons tout d'abord préciser la position que nous avons adoptée dans le projet VILMODes pour la construction des scénarios vis-à-vis d'une part des doctrines et savoirs dans le domaine de l'urbanisme et de la géographie, et d'autre part des possibilités de mise en œuvre des scénarios et de simulation des modèles. La question des scénarios

d'aménagement à l'échelle d'une région métropolitaine est sensible, comme nous l'avons vu dans le premier chapitre. Les impératifs de la lutte contre le changement climatique incitent à remettre en cause le modèle d'étalement urbain pourtant largement plébiscité par la population, dans un contexte européen de villes centres denses et attractives, malgré un coût de l'énergie tendant à se renchérir et une augmentation de la congestion sur les routes. Par ailleurs, les modèles LUTI sont nécessairement très réducteurs au regard de la complexité des opérations d'aménagement qui ont réellement lieu, ainsi que des stratégies individuelles et collectives des différents acteurs, du ménage à la collectivité territoriale en passant par les aménageurs et les promoteurs, pour ne citer que les principaux acteurs du développement territorial.

Notre approche dans VILMODes n'a pas consisté à chercher à valider les modèles LUTI utilisés en testant leur sensibilité (ou bonne réaction) à différentes options radicales d'aménagement, ou à la variation radicale de différents paramètres, comme le coût de l'énergie. Ce travail de calibration et de validation des modèles a déjà été effectué pour MobiSim comme pour Simbad, et constituerait en lui-même un autre projet de recherche. Mentionnons que c'est l'objet du projet CITIES subventionné par l'ANR, dans lequel sont impliqués certains des partenaires de VILMODes. Le projet VILMODes a constitué, et c'est là son originalité, à utiliser de manière raisonnée et vraisemblable, dans la mesure du possible, des modèles préexistants et ayant fait leur preuves, et non à développer encore un nouveau modèle. Nous entendons par *manière raisonnée et vraisemblable* le fait de ne pas laisser les choix de scénarisation être guidés par les possibilités des modèles, mais bien de partir des contraintes et problématiques des terrains pour chercher ensuite à traduire les scénarios en paramètres et données d'entrée des modèles. La variation du coût de l'énergie ne constituant qu'une faible part du coût total de la mobilité (moins de 30% en général, et moins de 20% des dépenses liées à la mobilité locale quotidienne pour les résidents de l'aire urbaine de Lyon 2006, chiffre moyen qui gomme la diversité des situations), nous avons constaté qu'il était inutile de multiplier les scénarios d'évolution de ce paramètre; les travaux antérieurs sur les modèles nous ont montré que les réactions des agents face à une augmentation du coût de la mobilité sont conformes à ceux observés.

Notre approche n'a pas non plus consisté à chercher à prouver que la ville compacte dense constitue un modèle de développement plus durable que celui de l'étalement urbain, ou encore à comparer le modèle de la cité jardin de Howard à celui du *new urbanism* de Calthorpe, ou encore de la ville fractale de Frankhauser. VILMODes n'a pas pour objectif d'alimenter le débat entre différents paradigmes de développement *dans le cadre général*, mais de construire de manière raisonnée des scénarios possibles de développement urbain *sur les deux terrains considérés de Besançon et Lyon*, en se nourrissant bien sûr des savoirs de l'urbanisme, des approches de la littérature, mais également en prenant en compte les spécificités de chaque terrain, les trajectoires de développement des territoires, et la faisabilité politique de la mise en œuvre des scénarios. Idéalement, les scénarios que nous souhaitons construire sont des scénarios durables, performants sur le plan économique et environnemental, et socialement acceptables ainsi que politiquement faisables. Même si ces deux derniers critères ne sont pas directement évaluables par les modèles LUTI utilisés, ils ont guidé notre réflexion.

Ainsi, nous avons mobilisé pour la mise au point d'un scénario de renouvellement urbain des approches théoriques et des réflexions sur la densité, le comblement des « dents creuses », la valorisation du patrimoine architectural et historique, des installations militaires et industrielles, de manière *pragmatique*, sans chercher à calquer sur nos territoires un modèle

abstrait qui aurait été défini en chambre. De la même façon, pour le scénario d'urbanisation fractale encourageant les modes collectifs et les modes doux et actifs, nous nous sommes nourris des travaux sur le TOD, le *new urbanism*, la ville fractale, mais sans faire de ces modèles des absolus : nous les avons considérés comme une boîte à outils, dans laquelle il était possible de puiser afin de construire un scénario de développement relativement compact mais ouvert de la ville, préservant les trames vertes et bleues, l'accès à la nature, et possédant une diversité de densités de population et de bâti à toutes les échelles. La construction de ce scénario s'est ainsi nourrie des travaux sur la ville fractale, qu'ils soient théoriques comme S-GHOST ou plus pragmatiques, fondés sur l'accessibilité, comme Mup-City, mais nous les avons hybridés avec d'autres approches.

Le logiciel Fractalopolis© a permis de faire un diagnostic des écarts du territoire à la fractalité souhaitée, et d'aider à proposer des cibles de densité à toutes les échelles. C'est ensuite manuellement, avec de nombreux degrés de liberté, en fonction de la connaissance du territoire, de son histoire, de ses potentialités, que nous avons transposé ces cibles théoriques dans un plan local d'urbanisme fourni aux modèles de simulation. De même, le scénario de renouvellement urbain ne s'est pas appuyé sur une détection automatique des zones de faible densité pour les remplir automatiquement, mais a construit une approche raisonnée de la *ville sur la ville*.

C'est pourquoi nous soulignons que si la simulation apparaît comme un outil puissant pour poser les bases d'une réflexion de prospective territoriale, elle n'invente pas de solution quant à l'évolution ou l'aménagement de l'espace : elle offre simplement une mise en perspective des conditions d'évolution qui lui sont données au départ. La simulation apparaît de ce fait doublement contrainte : (i) par les scénarios que l'on souhaite simuler, et (ii) par les modèles qui permettent de le faire. Dans ce contexte, il apparaît fondamental de proposer des scénarios rigoureusement construits selon des niveaux de contraintes réalistes (§ 2.1.1) et suffisamment différenciés les uns par rapport aux autres pour répondre aux interrogations qui questionnent la théorie de la forme urbaine et des mobilités quotidiennes et résidentielles (§ 2.1.2).

2.1.1 Un cadre commun de mise en œuvre

En toute logique, les scénarios proposés doivent d'abord s'adapter à la nature et à l'histoire du territoire étudié. Par exemple, envisager un développement polycentrique n'a de sens que pour une agglomération où des pôles secondaires susceptibles de servir de support à un tel développement auront déjà émergé. De même, la simulation d'un développement compact dense ne présente d'intérêt que s'il existe de réserves foncières et une morphologie d'agglomération adaptée. Par ailleurs, il est également probable que les simulations réalisées à horizon 2030 dépendent très fortement des scénarios démographiques et de la dynamique économique locale. On peut d'ailleurs se demander si, dans l'évolution d'une agglomération, le contexte macroéconomique n'a pas fondamentalement un effet plus important que les politiques d'aménagement.

2.1.1.1. Etapes de construction des scénarios

Pour toutes ces raisons, il est légitime de réaliser les simulations en s'appuyant sur des outils déjà calibrés et éprouvés sur les territoires considérés : MobiSim© pour Besançon,

et Simbad© pour Lyon (cf. 2.2.1)¹. Ainsi, la construction des scénarios se fonde sur la prise en compte des possibilités et des limites de ces deux modèles. Du point de vue de la modélisation, la définition et la prise en compte de ces scénarios posent différentes difficultés :

1. La première est d'ordre pratique : les modèles LUTI ne permettent pas, en général, d'intégrer facilement et de manière explicite des modifications réglementaires ou des opérations de rénovation urbaine par exemple. Il faut donc définir pour chaque scénario le jeu de paramètres adaptés, étant données la logique du modèle et ses capacités de calcul ;
2. La deuxième est d'ordre plus fondamental : l'objectif des politiques d'aménagement urbain est, de manière souvent explicite, d'envoyer un signal vers les usagers de manière à les inciter à modifier leur comportement. La scénarisation suppose donc, si l'on estime que des modifications de comportement (ou de préférences individuelles) sont susceptibles d'apparaître à horizon 20 ans, de pouvoir éventuellement les intégrer dans les simulations à un certain horizon temporel.

Ces deux difficultés, en particulier la seconde, sont délicates à intégrer dans un modèle car, en modifiant les préférences individuelles, on se place dans des situations où la comparabilité de différents scénarios n'est plus assurée. En effet, la modification des préférences individuelles correspond dans une certaine mesure à un « forçage » du modèle dans le sens attendu. Elle est cependant indispensable dans le cas où, par construction des modèles, certains paramètres ne sont pas déterminés de manière endogène, mais fixés à partir d'hypothèses externes, comme par exemple la proportion de ménages préférant s'installer en ville dense plutôt qu'à la campagne dans Mobisim©.

Dans ce contexte, nous définissons un **scénario** comme une série d'hypothèses portant à la fois sur l'évolution du contexte macroéconomique et démographique des agglomérations, sur la nature des interventions publiques visant à orienter le développement urbain dans des directions conformes aux aspirations politiques de la société, ainsi qu'éventuellement sur les évolutions attendues des comportements. La cohérence entre les différents scénarios proposés s'appuie sur un corpus de prévisions commun, et sur les mêmes outils et la même méthodologie pour la construction de l'ensemble, l'évaluation des résultats des scénarios s'effectuant à l'aide d'une grille d'indicateurs commune (cf. § 3.2)². De manière générale, le processus de définition, simulation et évaluation d'un scénario peut ainsi se décomposer en cinq grandes étapes :

1. **Spécification du contexte** d'évolution démographique et économique, notamment le prix de l'énergie. L'évolution du prix de l'énergie est celui estimé par l'EIA (*Energy Information Administration*), l'agence indépendante de la statistique au sein du ministère de l'énergie des Etats-Unis, qui propose trois scénarios d'évolution : continuation de tendance, baisse des prix et hausse des prix (Figure 1.1), parmi lesquels nous retenons celui du renchérissement médian (courbe orange).
2. **Définition de la dynamique souhaitée** et identification des moyens d'actions (politiques d'aménagement) à déployer en vue d'obtenir cette dynamique. Nous nous

1. Ainsi, l'objectif de VILMODes n'est pas une comparaison des performances des modèles, mais bien leur emploi dans un cadre méthodologique commun. L'étude d'un même territoire avec deux modèles différents pourra donner un éclairage complémentaire aux résultats des simulations.

2. En réalité, seule la simulation des scénarios par un modèle de type LUTI (MobiSim© à Besançon et Simbad© à Lyon) s'effectue avec des outils spécifiques à chaque territoire.

plaçons ici dans une perspective « espace centrée », dans laquelle des unités spatiales portent toute l'information : il n'y a à cette étape ni individus, ni acteurs, ni comportements ou stratégies.

3. **Spécification / simulation de la mise en œuvre de ces politiques**, principalement sous la forme d'un équivalent Plan Local d'Urbanisme (dit « PLU simulé ») donnant les zones constructibles ainsi qu'éventuellement des contraintes d'urbanisme sur ces zones, et de modifications du système de transport. Pour les scénarios de compactification, le PLU simulé définit par exemple une enceinte à la ville dense en dehors de laquelle il est interdit de construire, et à l'intérieur de laquelle les zones les plus favorables à l'urbanisation sont identifiées sur des critères d'occupation du sol et d'accessibilité. Une méthodologie commune et les mêmes outils ont été utilisés ici sur les deux territoires bisontin et lyonnais, notamment avec le recours aux logiciels MUP-City© et Fractalopolis© (cf. § 2).
4. **Simulations pour estimer les impacts des scénarios**, de manière à simuler les choix de localisation et les mobilités quotidiennes pour évaluer l'impact des incitations et des évolutions globales (démographie et prix de l'énergie) sur les formes et le fonctionnement de la ville (mobilités quotidiennes et résidentielles). Le lien concret entre l'étape 3 et l'étape 4 se fait par la transformation du PLU simulé en logements susceptibles d'être occupés.
5. **Evaluation des impacts** des scénarios suivant les trois piliers du développement durable, mobilisant une série d'indicateurs communs (cf. § 3.2), calculés à partir des sorties propres à chaque modèle et à ses modules spécifiques.

Sur le plan de leur périodicité, les étapes 1 et 2 sont effectuées une seule fois pour chaque scénario : elles correspondent à une orientation globale. L'étape 3 peut en revanche être effectuée périodiquement, en fonction de la politique étudiée : l'ouverture d'une ligne de transport peut s'étaler dans le temps. L'étape 4 est quant à elle effectuée tous les ans et l'étape 5 est effectuée uniquement à l'horizon 2030 (fin des simulations) de manière à produire une évaluation finale de chaque scénario.

2.1.1.2. Scénarios et niveaux de contrainte

De manière à aider la lecture et l'interprétation des scénarios, leur construction est intégrée dans une grille à trois niveaux, qui distingue les contraintes, les politiques d'aménagement et les modifications attendues (Figure 2.1) :

1. **Le niveau des contraintes** correspond à une absence d'intervention publique dans l'évolution des agglomérations. Dans ce contexte, la scénarisation est réduite à son minimum : la simulation est conduite à l'aide des processus internes aux modèles calibrés sur les espaces lyonnais et bisontin. Le seul paramètre modifié par l'utilisateur des programmes est le coût de l'énergie, pris en compte selon l'hypothèse de l'enchérissement maximal (Figure 1.1). Ce niveau constitue la base pour la construction du scénario de référence (scénario LF), auquel différentes politiques d'aménagement seront comparées.
2. **Le niveau des politiques d'aménagement** consiste à prendre en compte la réglementation et les incitations foncières, le renouvellement urbain, le développement

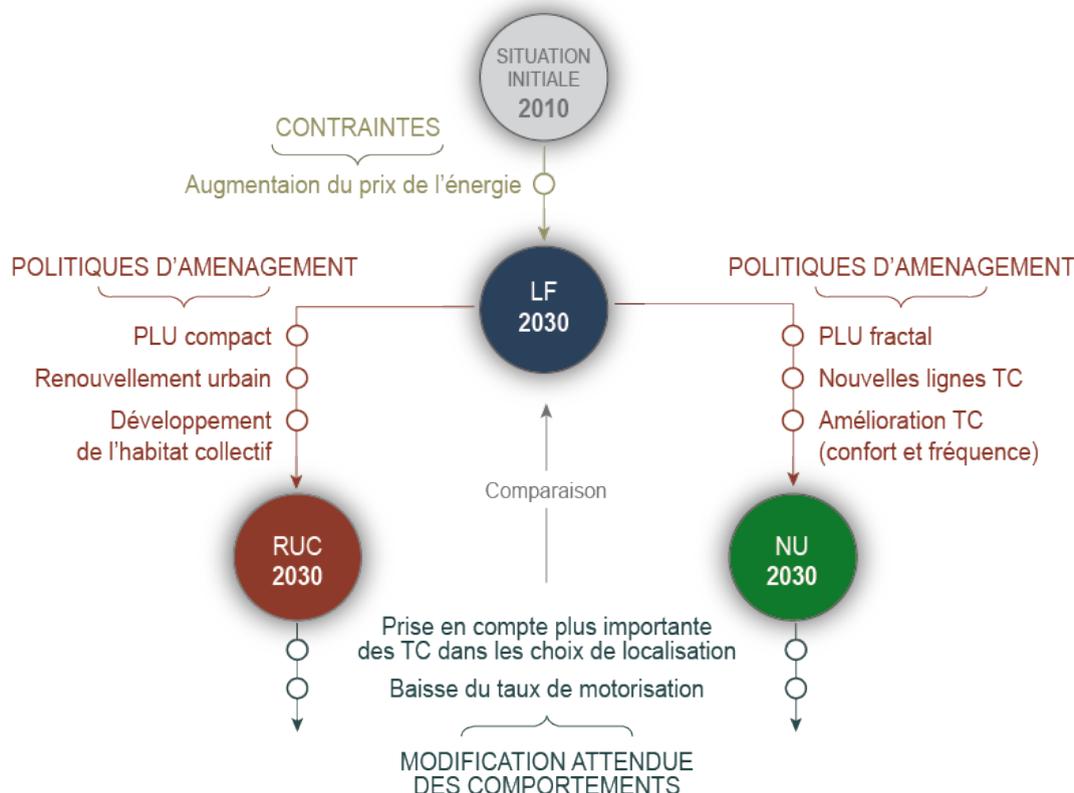


Figure 2.1 – Niveaux de contrainte et logique de construction des scénarios

de lignes de transport en commun, l'augmentation du confort dans les transports en commun, l'incitation à la construction de logements collectifs, etc. A ce niveau, deux développements sont particulièrement mis en avant. D'une part, la ville compacte et renouvelée, qui correspond au modèle généralement mis en avant par le pouvoir politique et les médias (scénario RUC), et d'autre part, la ville fractale fondée sur un système de transport en commun performant (scénario FOD).

3. **Le niveau des évolutions attendues** consiste à supposer que les diverses actions d'aménagement décrites au niveau précédent produisent des évolutions des comportements, que nous désignons par « évolutions attendues ». Comme nous l'avons déjà souligné, l'intégration de ces évolutions de comportement procure aux scénarios RUC et FOD un statut un peu particulier, puisque nous modifions des paramètres internes aux modèles de simulation, ce qui perturbe les conditions de leur comparaison. Il nous apparaît important cependant de supposer que dans un contexte d'énergie chère les transports en commun peuvent jouer un rôle de plus en plus important dans les choix de localisation (importance de la proximité d'un pôle de transport en commun) et de motorisation des ménages. Etant donné que cette évolution des comportements correspond à une réponse à des évolutions globales, cette option n'est activée qu'à la fin de la période de simulation.

2.1.2 Les trois scénarios retenus

Comme nous venons de l'évoquer, les étapes de construction des scénarios, ainsi que les niveaux de contraintes qui leur sont associés permettent de définir trois grands scénarios à implémenter dans les modèles de simulations. Le premier (LF) constitue une référence pour les comparaisons et simule une continuation des tendances observées sur chaque territoire, sans intervention publique particulière. Il est comparé à deux "solutions" interventionnistes fortes pour les aménagements futurs : la ville compacte (RUC) et la ville fractale (FOD). A titre d'illustration, la Figure 1.2 propose une représentation théorique des localisations spatiales associées à chacun de ces scénarios, et le Tableau 2.1 en résume les avantages et les inconvénients.

2.1.2.1. Description des scénarios

La définition du premier scénario est immédiate : il s'agit d'un scénario de Laisser-faire (LF), consistant à ne supposer aucune modification des politiques de transport et d'urbanisme. Ainsi, à Lyon comme à Besançon, les réseaux modélisés correspondent à l'état 2010 et ne prennent ensuite en compte que les grands projets déjà programmés jusqu'en 2030 (exemple de l'introduction du tramway en 2015 à Besançon et ou des prolongements de métro à Lyon). De même, la croissance résidentielle permettant d'accueillir l'augmentation prévue de la population lyonnaise sur la période (fournie par le scénario médian du modèle OMPHALE de l'INSEE)³ est répartie sur l'ensemble du territoire. Ce scénario sert de base de comparaison pour les autres options, plus interventionnistes.

A partir de la référence fournie par le scénario LF, le deuxième scénario tente de répondre à l'incitation à la densité et à la compacité soulignée dans le § 1.2. Cette réponse passe par des politiques de densification du bâti ou de complément des vides, et plus généralement par des opérations de renouvellement urbain, que nous désignons par la formule « Renouvellement urbain compact » (RUC). La ville compacte est ainsi caractérisée par une limite de l'agglomération « sacralisée », au sein de laquelle l'habitat se développe par remplissage des vides et des opérations de renouvellement urbain. Une fois le périmètre urbain entièrement densifié, le développement s'effectue nécessairement dans la troisième dimension, donc sous forme de logements collectifs plus hauts. La définition des limites de l'agglomération s'appuie à la fois sur sa compacité morphologique et sur la qualité des transports en commun qui la desservent. Par rapport au scénario LF, la grande différence réside dans le fait que seules les taches urbaines les plus importantes sont urbanisées. La répartition pavillonnaire/collectif (presque collectif seulement) est également modifiée puisque les logements collectifs sont privilégiés pour appuyer une densité centrale forte.

Le troisième scénario s'appuie sur une approche un peu différente. Elle vise à obtenir une agglomération dont l'organisation spatiale suit un principe d'une « concentration déconcentrée ». Ce scénario correspond à une approche originale développée dans le cadre du projet VILMODes : il propose le recours à l'approche de la ville fractale (Frankhauser *et al.*, XXX) pour développer des scénarios d'aménagement qui s'inscrivent dans la logique *Transit oriented development* (urbanisme orienté vers les transports en commun) élaboré par P. Calthorpe (1992). Nos proposons de ce fait de nommer ce scénario *Fractal oriented*

3. En ce qui concerne l'évolution de la population dans l'Agglomération de Besançon, elle est fournie par MobiSim© et ne requiert pas l'introduction exogène de données calculées par l'INSEE (modèle OMPHALE par exemple).

	LF	RUC	FOD
Urbanisation	Urbanisation à proximité de l'ensemble des taches bâties	Densification dans les zones urbaines à partir du centre ville	Densification (collectifs) autour des axes de transport
Stratégie contre l'étalement urbain	Aucune	Renforcement de la centralité	Valorisation des « quartiers gare »
Fonctions urbaines	Mixité centrale en ségrégation possible dans les espaces péricentraux et périurbains	Mixité fonctionnelle	Mixité fonctionnelle
Consommation d'espace	Etalement dans les franges urbaines	Préservation de l'espace rural	Reconnexion des territoires dispersés
Transport en commun	TC performant dans et vers les zones centrales	TC performant dans et vers la zone centrale	TC Hautement performant à toutes les échelles
Fonctionnement de la ville	Adaptation à un modèle polycentrique	Adaptation à un modèle monocentrique	Adaptation à un modèle de ville mono et polycentrique (selon l'échelle)
Accessibilité	TC efficaces au centre, partiellement disponibles en périphérie, et recours à la VP obligatoire au-delà	Valorisation de l'accessibilité au centre (modèle centre-périphérie)	Valorisation de l'accessibilité aux réseaux de transport en commun
Modes doux	Aucune valorisation particulière	Valorisation des modes doux en centre ville	Valorisation des modes doux pour l'accès aux TC dans le centre comme dans le périurbain (rabattement)
Retombées socio-économiques attendues	Ségrégation des espaces péricentraux et périurbains	Gentrification par augmentation du prix des logements et augmentation des inégalités territoriales	Réduction des inégalités territoriales (accessibilité favorisée dans le rural comme dans l'urbain)
Retombée environnementales attendues	Artificialisation des espaces agricoles et trafic routier important	Préservation des terrains agricoles et du foncier H1 : Réduction du nombre de déplacements VP au centre et réduction de la pollution <i>vs</i> Augmentation de la congestion liée à la forte densité centrale et augmentation de la pollution	Réduction du nombre de déplacements VP, augmentation de la part modale TC, préservation de terrains agricoles fonciers

Table 2.1 – Grille de lecture des trois scénarios de développement urbain

développent (FOD) et consacrons le point suivant à sa description plus précise.

2.1.2.2. Spécificités du scénario FOD

Ce scénario a été conçu dans l'optique de produire une alternative au RUC qui préserve deux caractéristiques moins présentes dans le scénario précédent : l'habitat individuel, et les zones de plus faible densité, associées à un accès direct à la nature. C'est naturellement un cahier des charges un peu contradictoire que de souhaiter obtenir à la fois une ville relativement compacte, avec une diminution de la part de l'automobile, et des zones de faible densité ainsi que de l'habitat individuel. La faible densité et l'habitat individuel sont consommateurs d'espace, si bien que l'étalement s'accroît, et qu'il est difficile, sur le plan économique, de desservir des zones peu denses par des transports collectifs performants. On est donc confronté à ce qui prend l'apparence d'un cercle vicieux : la faible densité crée l'éloignement, et l'éloignement combiné à la faible densité rend indispensable le recours à la voiture individuelle.

Nous avons donc choisi dans ce scénario de développer la ville en renforçant son armature autour du réseau de transports en commun existant, en visant l'émergence de pôles secondaires, dans une approche polycentrique rationnelle inspirée du modèle de Christaller, mais en travaillant la question des quartiers de gare sans recourir uniquement à la densification maximale à proximité des gares, pour laisser des zones de plus faible densité et des espaces ouverts. Plutôt que d'adopter l'approche très programmatique de P. Calthorpe dans son TOD, nous avons reformulé les contraintes du polycentrisme et des diversités de niveaux de densité, y compris dans les pôles secondaires, sous la forme d'un modèle multi-fractal que nous utilisons ici pour diagnostiquer les écarts à une distribution de densités de référence possédant les dimensions fractales souhaitées, et aider à préconiser des cibles locales de densité, à toutes les échelles.

En adoptant des principes de géométrie fractale pour la définition de l'occupation du sol, son principe assure à la fois des espaces de densité suffisante pour permettre la densification des commerces et des aménités et l'émergence de transports en commun, et des espaces de plus faible densité compatibles avec de l'habitat individuel et susceptibles d'accueillir des ménages recherchant des localisations plus rurales, le tout dans un même tissu urbain cohérent⁴. De même, en répartissant de manière adéquate les cellules de différents niveaux de densité dans l'espace, il est possible d'assurer des conditions favorables au développement de la biodiversité, dont la préservation des trames vertes et bleues. Cette approche est croisée avec une approche orientée vers les transports en commun de manière à rompre avec le modèle de la ville en tache d'huile pour aller vers une ville qui se développe autour des nœuds d'un réseau de transport en commun, ramifié, à bon niveau de service. Ainsi, la relative augmentation des distances entre les points extrêmes de la ville est-elle compensée par la possibilité d'effectuer des trajets relativement rapides et vertueux. De même, la logique fractale, par son principe d'emboîtement d'échelle permet de définir des pôles secondaires liés aux stations de transport en commun et d'encourager ainsi un développement polycentrique de l'agglomération. Cette position peut être justifiée par trois séries d'arguments :

4. Le modèle fractal utilisé part en général d'une structure connexe du type « tapis de Sierpinski ». En revanche comme la bordure d'un tapis de Sierpinski tend vers l'infini le tissu n'est pas compact – cependant il concentre la masse vers et finalement « sur » l'ossature définie par le réseau.

1. L'incitation à la compacité ou à la recompactification urbaine, quand elle est comprise de manière restrictive, c'est-à-dire en imposant une contrainte de connexité (ville d'un seul tenant, de forme plus ou moins circulaire autour de son noyau historique), prend des allures de retour sur le passé. Cette forme de compacité, pensée comme le phénomène inverse de l'étalement urbain, sacralise une limite à la ville, mettant en avant le modèle de la ville fortifiée ceinte d'un rempart présente en France jusqu'au 19^e siècle. Le seul degré de liberté pour accueillir les habitants est alors l'augmentation des densités de bâti, par remplissage des vides et développement vertical de la ville (constructions en hauteur).
2. Si ce modèle semble intéressant à première vue pour réduire les distances parcourues en automobile, la ville compacte pensée comme une ville close toujours plus dense pose la question des espaces naturels, indispensables à la biodiversité aussi bien qu'au bien-être des habitants, et plus spécifiquement la question de la continuité des espaces non anthropisés (trames vertes et bleues)
3. On peut enfin s'interroger sur la soutenabilité sociale du modèle de la ville dense fermée. La compétition pour l'espace dans des espaces déjà denses produit une hausse rapide des prix des logements, produisant ainsi de l'exclusion sociale ainsi qu'un problème de congestion des réseaux de transport difficile à gérer.

Dans le cadre du projet VILMODes, il semble important de revenir aux notions de forme urbaine et de compacité (cf. 1.2.1) pour proposer un autre modèle de compacité qui soit *a priori* durable sur l'ensemble de ses volets : économique, social et environnemental. Une telle ville durable doit donc permettre l'émergence de plusieurs pôles de densité variables, en fonction de leur intérêt économique (économies d'agglomération résultant de la concentration d'activités économiques). Ces pôles doivent être accessibles entre eux, de manière à limiter la circulation automobile résultant de l'accroissement démographique du territoire urbain étudié. Enfin, l'ensemble de la ville, tout en possédant une frontière qui décourage l'étalement urbain, doit avoir la possibilité de se développer et d'étendre ses limites sans « sauts quantiques » tels que l'extension d'une ville au delà de ses fortifications. Concrètement, le scénario FOD prévoit donc que l'urbanisation se concentre en priorité autour des gares et arrêts de transport en commun, selon une logique fractale qui permet de préserver les parcs urbains qui sont à la fois des lieux de loisir, des axes de transport (pistes cyclables) et qui participent à la satisfaction des ménages pour leur mobilité résidentielle.

A titre d'illustration, les Figures 2.2, 2.3, 2.4 et 2.5 présentent le développement résidentiel tel qu'il est prévu dans chacun des trois scénarios à l'horizon 2030, à l'issue des simulations effectuées à l'aide de MobiSim© sur l'Agglomération de Besançon et de Lyon. Ces cartes montrent un contraste important entre chaque scénario, et présentent une instanciation concrète sur un terrain d'étude réel, du schéma théorique à l'origine de la construction des scénarios LF, du RUC et du FOD (Figure 1.2), qui confirme le pertinence des choix retenus pour chacun d'entre eux.

2.2 Présentation des modèles

La simulation des scénarios des trois modèles proposés à l'horizon 2030 sur les espaces bisontin et lyonnais requiert des modèles suffisamment souples pour que les hypothèses qu'ils contiennent puissent être actionnées comme autant de leviers pour la prospective

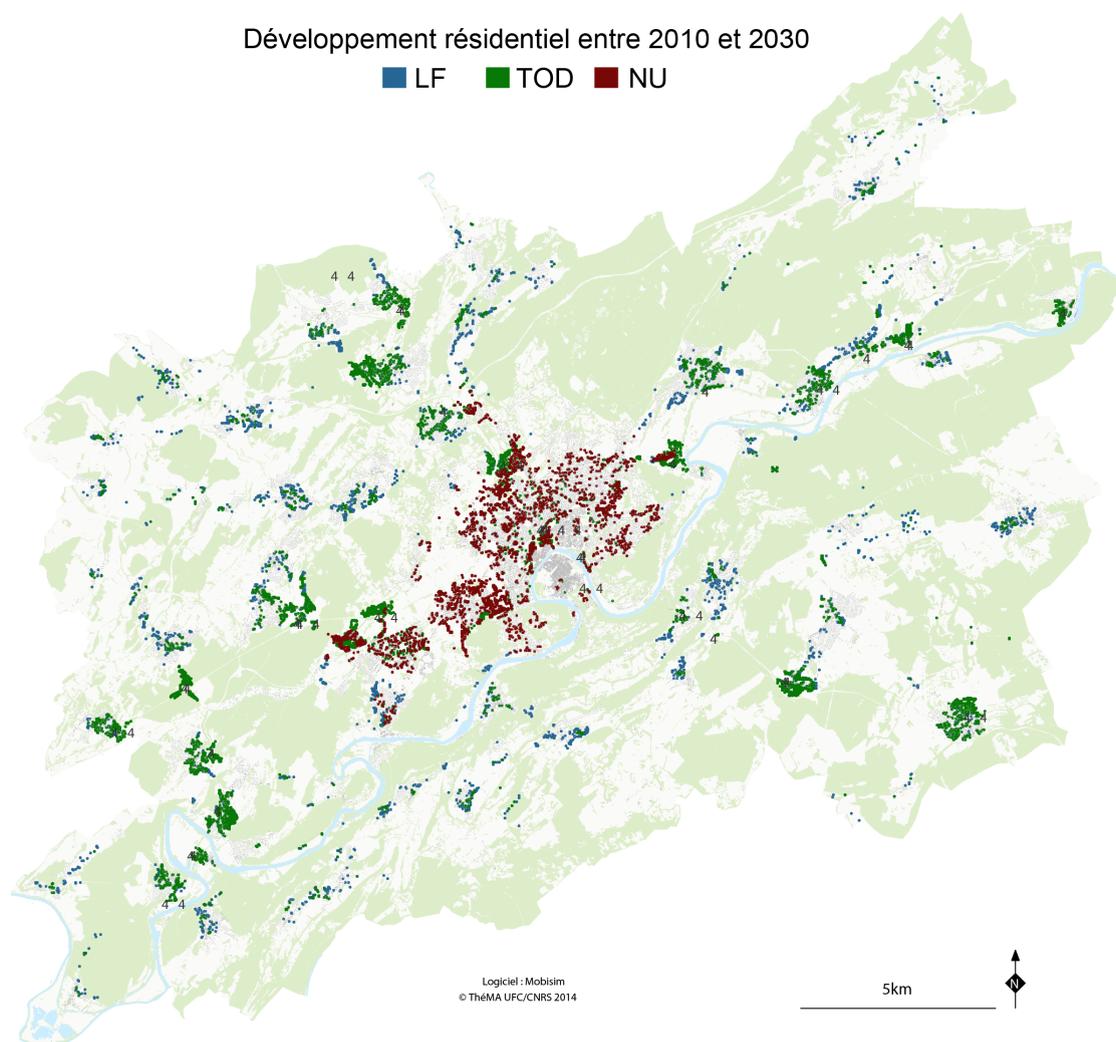


Figure 2.2 – Localisation spatiale simulée pour chaque scénario à Besançon.

et l'aménagement du territoire. Ici, les modèles LUTI (cf. § 1.2.1) apparaissent au cœur de la démarche de modélisation par leur prise en compte intégrée des problématiques de forme urbaine et de mobilités (§ 2.2.1). Ils n'apparaissent toutefois pas suffisants s'ils sont employés seuls, et nécessitent d'être couplés avec des modèles complémentaires plus spécifiques (§ 2.2.2), qui fournissent des *inputs* innovants pour calibrer le développement résidentiel et contraindre les mobilités qui peuvent y prendre place.

2.2.1 Les modèles LUTI

Le projet VILMODEs requiert deux modèles LUTI respectivement calibrés sur l'agglomération de Besançon et l'aire urbaine de Lyon : MobiSim© et Simbad©. Sans entrer dans les détails techniques, il convient de présenter rapidement les hypothèses qui sont à la base de leurs points communs et de leurs différences, sans entrer dans les détails pour lesquels nous renvoyons le lecteur vers les publications associées à ces différents modèles).

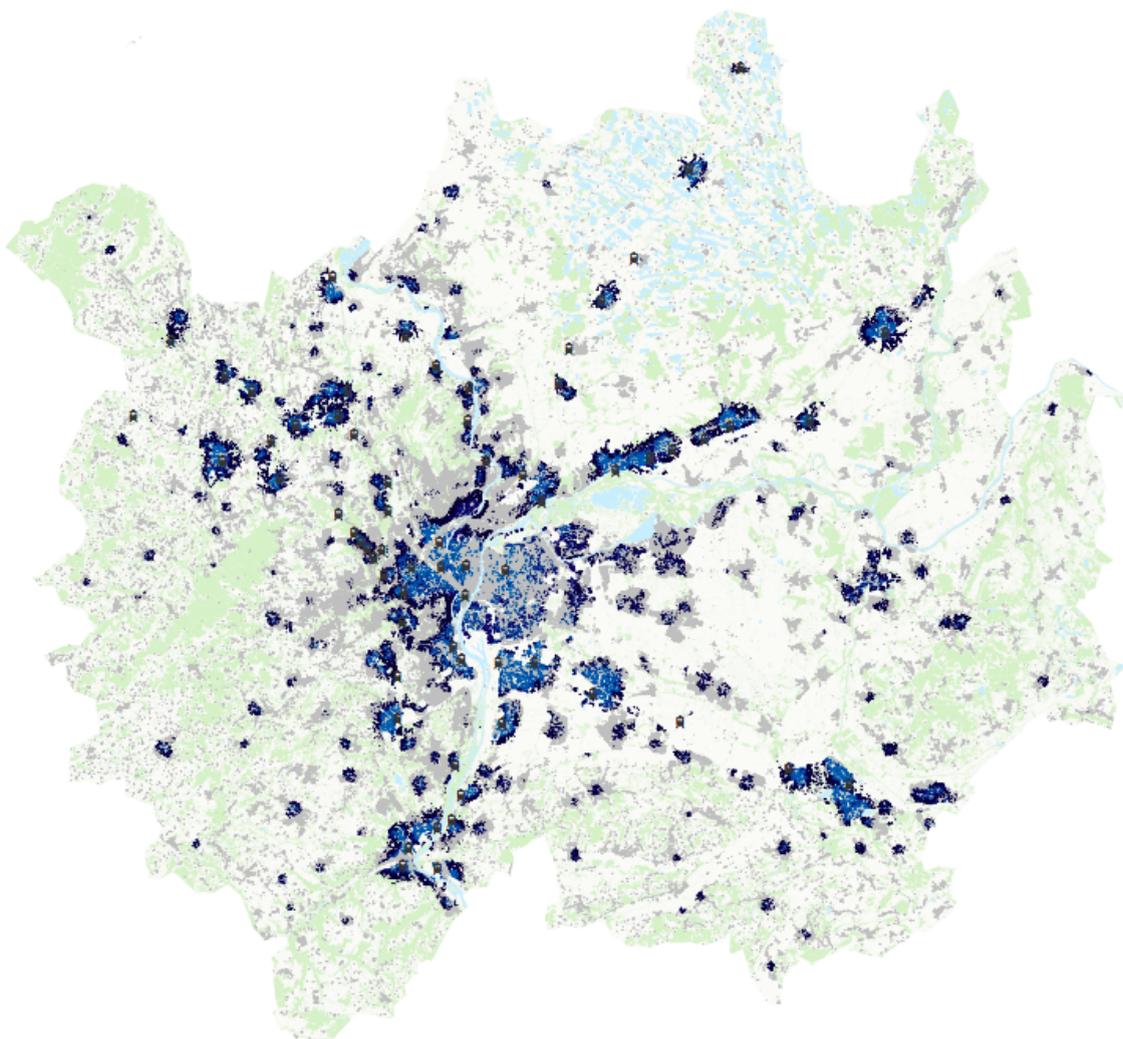


Figure 2.3

– Localisation spatiale simulée pour le scénario Laisser Faire (LF) à Lyon (le dégradé de couleurs indique la progression de l'urbanisation dans le temps).

2.2.1.1. MobiSim© à Besançon

MobiSim©⁵ (simulation des mobilités) est un modèle LUTI développé au laboratoire ThéMA (Dir. J.P. Antoni). Ce programme a d'abord été mis au point à partir des théories de la dynamique des systèmes (MobiSim III, développé par la société ATN⁶). Mais rapidement, les limites à la spatialisation des phénomènes modélisés (intrinsèques à la dynamique des systèmes) ainsi que la nécessité d'endogénéiser une partie des évolutions structurelles de la population, ont amené à reconstruire la plateforme de simulation sur

5. Les développements successifs de MobiSim© et les projets actuels font l'objet de subventions de la part de la Direction de la Recherche et de l'Innovation (DRI) du Ministère de l'Ecologie, du Développement et de l'Aménagement Durables, et de l'Agence pour le Développement et la Maîtrise de l'Energie (Ademe), notamment dans le cadre du Programme de recherche et d'innovation dans les transports terrestres (PRE-DIT).

6. La société ATN (Application des Techniques Nouvelles) a été dirigée par Philippe Casanova jusqu'en 2007.

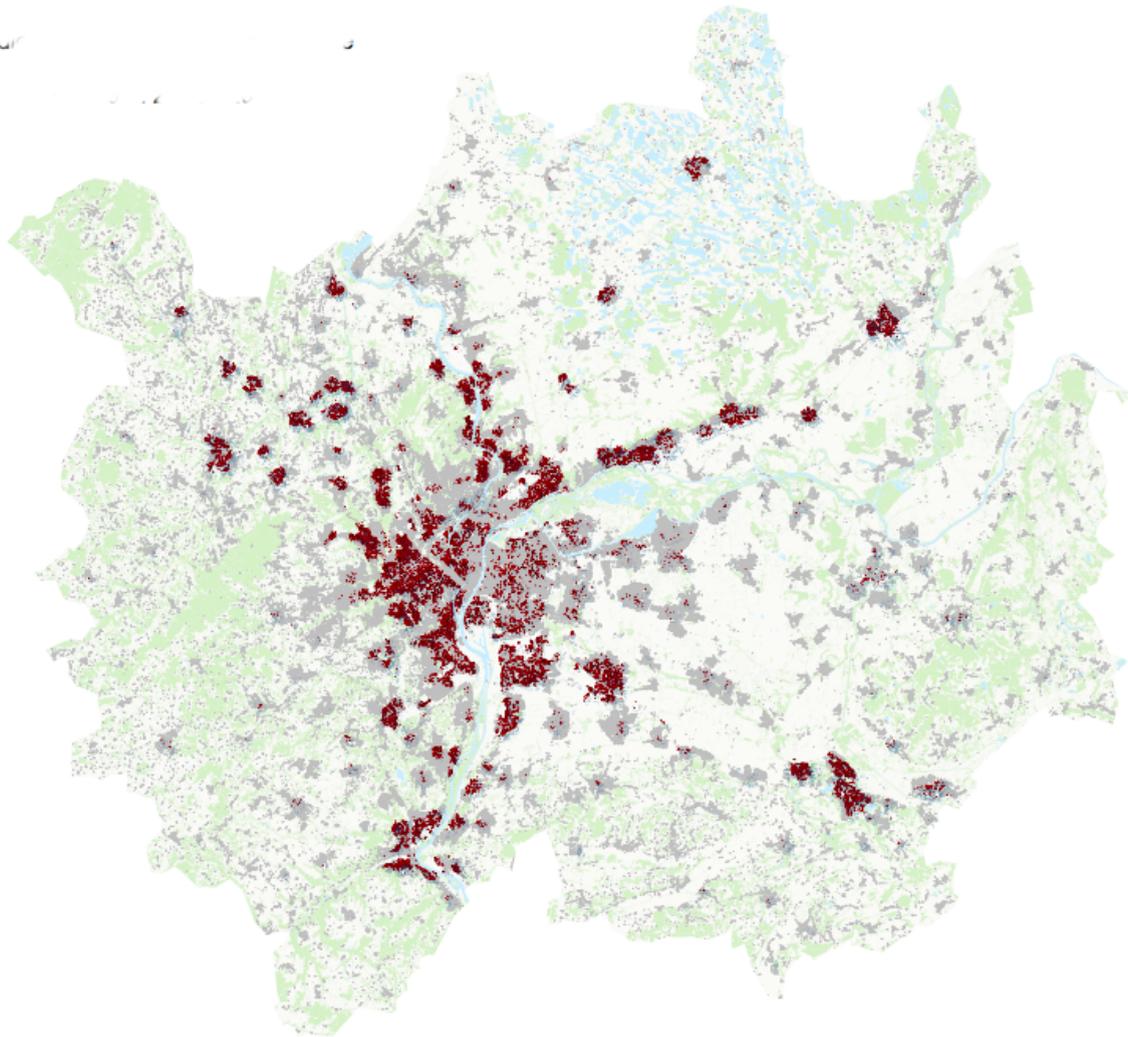


Figure 2.4 – Localisation spatiale simulée pour le scénario Renouvellement urbain compact (RUC) à Lyon.

la base de modèles multi-agents ; MobiSim© III devient MobiSim© SMA. Ce modèle a été utilisé pour étudier l'évolution de la mobilité pour plusieurs agglomérations françaises. Il est aujourd'hui développé au sein de l'équipe 'Mobilité, ville, transport' du Laboratoire ThéMA sous le nom Mobisim-ThéMA.

Dans la continuité de cet historique, le projet MobiSim© consiste aujourd'hui à développer et exploiter une plateforme de simulation pour l'étude prospective des mobilités quotidiennes et résidentielles dans les agglomérations françaises et européennes à l'horizon prospectif d'une vingtaine ou d'une trentaine d'années, et leur lien avec le développement, l'étalement et l'aménagement urbains. Développé en java et appuyé sur la puissance de calcul du mésocentre de l'Université de Franche-Comté (meso.univ-fcomte.fr), le programme MobiSim© se compose aujourd'hui de trois modules qui fonctionnent en interaction :

1. **Génération d'une population synthétique d'agents virtuels**
représentant les habitants de l'agglomération étudiée avec leurs caractéristiques (âge,

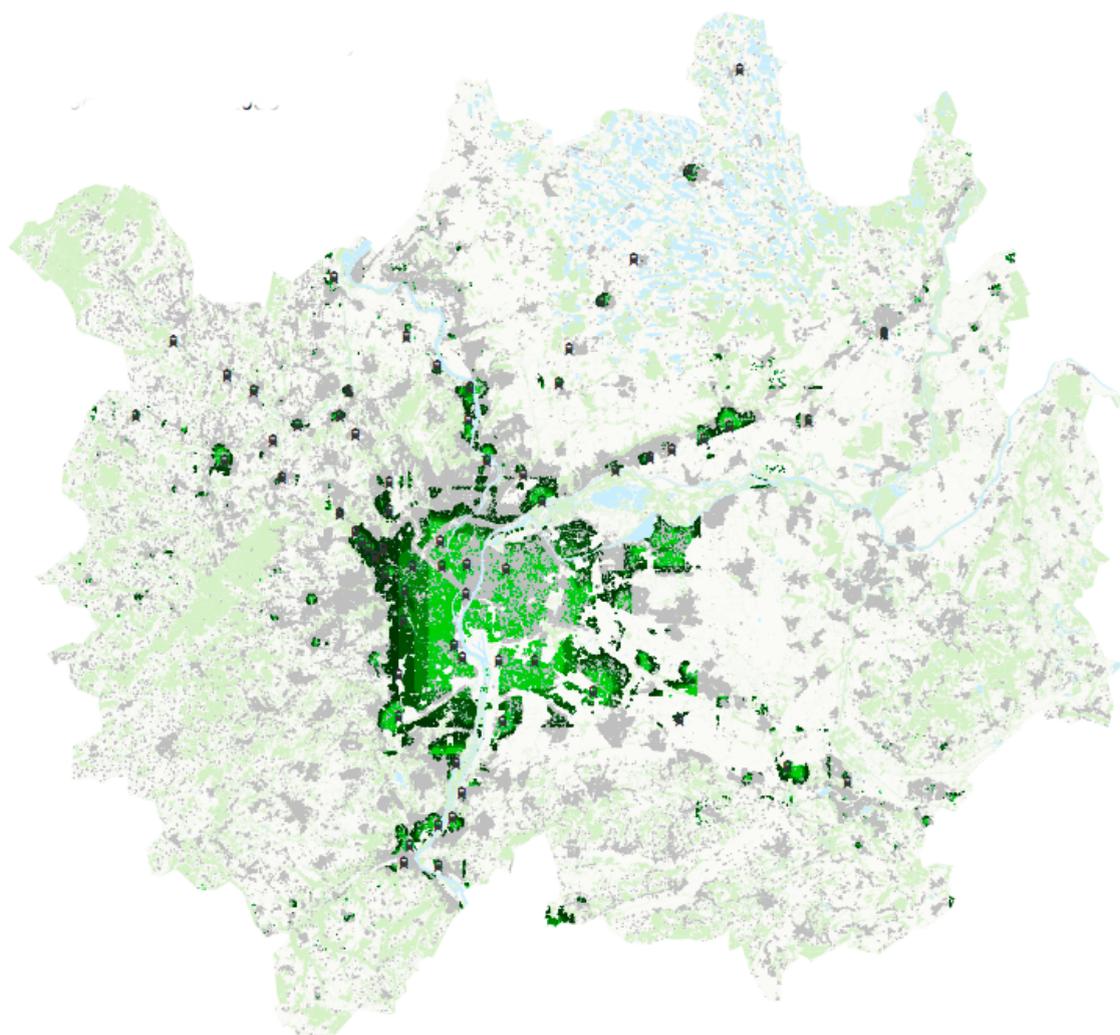


Figure 2.5 – Localisation spatiale simulée pour le scénario *Fractal oriented development* (FOD) à Lyon (le dégradé de couleurs indique la progression de l'urbanisation dans le temps).

sexe, revenus, etc.), leur composition familiale et leur localisation (type de logement et bâtiment) ;

2. Simulation de la mobilité quotidienne

de ces agents pour différents motifs (travail, achats, loisirs, accompagnement des enfants, etc.) et par différents modes de transport (automobile, transports en commun, marche, etc.) ;

3. Simulation de la mobilité résidentielle

des agents qui déménagent pour satisfaire leurs préférences (cadre de vie, logement, localisation, etc.) suite à une modification de leur statut familial ou professionnel ou pour optimiser leur mobilité quotidienne.

Les différents champs d'application aujourd'hui identifiés pour MobiSim© concernent les problématiques de la gestion du trafic et des déplacements, des nuisances et des pollutions engendrées, de la consommation énergétique urbaine, des stratégies des acteurs et des choix modaux de déplacements, des formes urbaines produites par les préférences et les

politiques de développement résidentiel, etc.

• Evolution de MobiSim© dans le cadre de VILMODEs

Afin de s'adapter aux objectifs du projet VILMODEs, deux modifications majeures ont été apportées au logiciel MobiSim©. D'une part, sur le plan des transports, la bicyclette a été introduite comme un mode de déplacement à part entière ; d'autre part, sur le plan de l'occupation du sol, une méthodologie a été mise en place pour aider à la création et à la localisation de commerces et de services accompagnant l'urbanisation des zones construites dans le cadre des scénarios.

1. Introduction de la bicyclette

Le module mobilité quotidienne a été modifié en vue de pouvoir prendre en compte ce mode de déplacement dans les simulations. Dans le cadre de VILMODEs, la possibilité d'effectuer des déplacements combinant le vélo et le train nous paraissait effectivement intéressante pour la simulation du scénario FOD car tous les modes de déplacements actifs (marche et vélo) sont préconisés pour le développement durable. Le mode vélo est utilisable seul ou est interconnectable avec le train pour simuler une éventuelle intermodalité vélo-train. Dans ce cas, une pénalité de 1 minute au départ du déplacement et à l'arrivée à la gare est affectée au temps de déplacement de l'agent, pour tenir compte du temps de prise et de stationnement du vélo. L'intermodalité vélo-train n'est pas prise en compte automatiquement mais doit être activée en tant que paramètre de simulation

2. Calcul des aires de chalandises

Le calcul des aires de chalandises théorique des commerces et services de fréquentation quotidienne⁷, est un pré-requis pour la création (manuelle) de nouveaux établissements à implémenter dans les scénarios. L'une des limites de MobiSim© est en effet l'absence de développement de l'offre en commerces et services pour répondre aux besoins de la croissance démographique. Pour pallier cette lacune, une méthode semi-manuelle de création de commerces et services de fréquentation quotidienne a été développée et appliquée à l'un des scénarios pour lequel il paraissait particulièrement intéressant d'introduire une nouvelle offre de proximité, le scénario FOD. Cette méthode a été mise au point à partir de l'analyse empirique des aires de chalandise de la CAGB et n'est actuellement valide que pour ce terrain d'application.

La description technique de ces modifications étant d'une part relativement longue et complexe, et n'entrant d'autre part pas directement dans la cadre thématique du projet VILMODEs, elle fera l'objet de publications ultérieures.

2.2.1.2. Simbad© à Lyon

La plateforme Simbad© (SIMuler les MoBilités pour une Agglomération Durable) a pour objectif de fournir un outil capable de simuler différentes politiques de transport et d'urbanisme, afin d'anticiper leurs conséquences environnementales, économiques et sociales,

7. Pour rappel, les commerces et services de fréquentation quotidienne pris en compte dans MobiSim© (module mobilité quotidienne et module mobilité résidentielle) et dans Mupcity sont au nombre de 6 boulangeries, tabac-presses, commerces d'alimentation générale et supérettes, boucheries, supermarché et hypermarché ; ils sont identifiés à partir du fichier Sirene 2012 géoréférencé.

de mieux prendre en compte les liens qui existent entre ces trois dimensions, et d'offrir *in fine* un éclairage pertinent sur les impacts de ces politiques, au niveau d'une aire urbaine et à un horizon de 25 ans. Son développement a bénéficié de financements du MEDDE et de l'EADÉME dans le cadre des PREDIT 3 et 4 (Nicolas *et al.*, 2009 ; Bonnel *et al.*, 2013). Il a également été soutenu par la Région Rhône Alpes et l'Agence d'Urbanisme de Lyon à travers des financements de thèses (Homocianu, 2010 ; Cabrera, 2013). L'approche de modélisation est de type stratégique, permettant de rendre compte des impacts de politiques contrastées à l'échelle de l'agglomération plus que de projets particuliers à une échelle fine. Le terrain d'application correspond à l'aire urbaine de Lyon 1999. L'année de référence de modélisation est 2000, avec une prospective à 2025 prolongée à 2030 dans le cadre du projet VILMODEs. D'un point de vue méthodologique, plusieurs choix ont été faits au niveau des outils utilisés pour réaliser cette modélisation. Tout d'abord, la plateforme UrbanSim©⁸ a été retenue pour la modélisation des localisations des ménages et des activités, avec une approche désagrégée et stochastique reposant sur la théorie des choix discrets. Par ailleurs, une structure traditionnelle à 4 étapes a été retenue pour simuler les mobilités individuelles, tandis que le modèle Freturb© est utilisé pour générer les flux de marchandises en ville (Routhier et Toilier, 2010). L'affectation des trafics ainsi estimés est ensuite réalisée à l'aide du logiciel Visum©⁹, tant pour les trafics routiers que pour les déplacements sur le réseau de transports collectifs.

Ainsi, Simbad© enchaîne plusieurs grandes étapes, conçues chacune comme un module particulier : « localisation des ménages et des établissements » → « mobilités » → « affectation du trafic » qui se bouclent sur 25 pas de un an :

1. A la période initiale, les localisations des activités et des ménages sont données.
2. Le croisement entre la localisation des activités et les caractéristiques des ménages résidant dans chaque zone permet de déduire les besoins de déplacements entre chaque zone :
 - une suite de modules prend en compte la mobilité des personnes en suivant une logique traditionnelle, avec la génération des déplacements, leur distribution entre les zones du territoire considéré, leurs répartitions modale puis horaire.
 - un travail spécifique est réalisé pour les transports de marchandises en ville.
 - l'introduction des flux d'échanges et de transit, calculés sur la base simplifiée de l'évolution économique générale, permet de compléter le tableau des trafics réalisés sur l'aire d'étude.
3. Les matrices origines-destinations établies par ces différents modules sont ensuite rassemblées par type de réseau et période horaire pour lancer les calculs de l'affectation. Ceux-ci permettent de déterminer les temps généralisés entre toutes les zones de l'aire urbaine de Lyon.

8. Développé par l'*Urban Planning Department* et le *Computer Science Department* de l'université de Washington pour l'aire métropolitaine de Eugene-Springfield sous la direction de P. Waddell, UrbanSim© a pour vocation de lier la planification urbaine aux transports et à l'environnement, ainsi que de limiter les effets de l'étalement urbain (Deymier et Nicolas, 2005). UrbanSim est un modèle connecté devant être lié à un modèle de transport. Mais il reprend toutes les fonctionnalités d'un modèle de prévision de l'occupation du sol. Il s'appuie sur les théories des choix discrets et de la maximisation de l'utilité aléatoire. Sa structure est très désagrégée et se base sur l'estimation de changements sur de courtes périodes de temps. Il recourt à la microsimulation pour simuler les choix des agents sans rechercher d'équilibre économique particulier (Waddell *et al.*, 2001 ; Hély, 2012).

9. La société allemande PTV développe des logiciels en matière de trafic, logistique, transport et géomarketing. Parmi ceux-ci, le modèle intégré Visum© permet de reproduire tous les types de transports, tant individuels que collectifs.

4. Enfin, ces temps généralisés permettent d'établir des indicateurs d'accessibilité qui sont utilisés dans les modules de localisation des ménages et des activités.

Les objectifs du projet VILMODEs ont par ailleurs été l'occasion d'enrichir Simbad©, notamment en opérant un choix modal sur la base d'un coût généralisé (et non plus d'un temps généralisé), en développant et en intégrant le module Simétab pour représenter les localisations des activités économiques et en actualisant les bases de données INSEE liées à la population et aux entreprises à l'année 2010 qui sert de date de référence au projet.

2.2.1.3. Convergences et divergences entre Simbad© et MobiSim©

Simbad© et Mobisim© sont deux modèles d'interaction transport-urbanisme différents, calibrés chacun sur un terrain particulier. Après les avoir décrits séparément dans les deux pages précédentes, il est important de faire ressortir les principaux points communs comme les grandes options méthodologiques qui les séparent. Cela permettra, pour la suite, d'avoir une meilleure idée de ce qui est comparé lorsque les résultats des simulations seront présentés dans la dernière partie du rapport.

Tout d'abord, si l'on reprend les grandes classifications proposées dans la littérature (par exemple Simmonds *et al.*, 1999 ; Waddell *et al.*, 2001), trois grands points de convergence peuvent être soulignés dans la philosophie générale des deux modèles : ils sont tous deux dynamiques, avec une approche désagrégée reposant sur de la micro-simulation et une décomposition modulaire des chaînes de relation cause-effet prises en compte.

1. Ce sont des modèles dynamiques, qui reposent sur un processus de calcul itératif, où les changements à la marge sont établis par pas de un an. Ils se différencient sur ce point à toute une branche des modèles LUTI qui s'appuient sur les principes économiques de la théorie de la rente urbaine et recherchent plus particulièrement un équilibre général des marchés impliqués dans la modélisation.
2. Les deux modèles privilégient une approche désagrégée. D'une part, les choix des agents pris en compte (ménages, entreprises), sont représentés à travers des exercices de micro-simulation. D'autre part, l'échelle spatiale retenue est très fine, allant de l'IRIS pour Simbad© au bâtiment pour Mobisim©.
3. L'approche désagrégée favorise également une démarche modulaire. Chaque élément du processus modélisé est repris dans un module spécifique, tant au niveau des choix de localisation que des choix de mobilité et des itinéraires sur les réseaux. La décomposition par modules n'est pas forcément identique entre les deux modèles, de même que les éléments explicatifs des choix et leur représentation à l'intérieur des modules. Par contre, la logique de séparer les liens de cause à effet dans des modules différents est bien la même des deux côtés.

Ces points communs ne doivent cependant pas masquer les différences entre les deux modèles. Notamment, la désagrégation évoquée précédemment n'est pas opérée de la même manière :

1. D'un côté, Mobisim© est un modèle multiagents alors que Simbad© ne dispose pas de module démographique faisant évoluer ses ménages au fil d'une simulation. Pour ce dernier, l'agent de base est bien le ménage (ou l'établissement), mais il cherche d'abord à respecter une structure globale des populations d'agents (âge pour les

ménages / taille et secteur pour les établissements) en fonction de contraintes fixées à partir d'hypothèses externes. Chaque année, des agents nouveaux sont créés et d'autres sont détruits pour respecter ces contraintes.

2. Au niveau des échelles spatiales, Mobisim© travaille au niveau fin des bâtiments, alors que Simbad© s'arrête à l'IRIS. Cette différence joue surtout sur la finesse des représentations cartographiques qui peuvent être proposées, même si des deux côtés les analyses méritent d'être menées à un niveau plus agrégé pour pouvoir reposer sur des résultats stabilisés et fiables.
3. Les familles d'agents pris en compte dans Simbad© concernent autant les entreprises que les ménages, tant au niveau des localisations que des flux générés, alors que Mobisim© reste plus focalisé sur les ménages.

La démarche modulaire utilisée de part et d'autre ne renvoie pas aux mêmes logiques de modélisation à l'intérieur des modules. La modélisation multiagents de Mobisim© conduit à fixer des règles de choix pour chaque agent en fonction de ses caractéristiques. La logique de Simbad© reste plus globale. Elle repose sur des modèles de choix discrets en ce qui concerne les choix de localisation et reste désagrégée pour la phase de génération des déplacements. Par contre, la suite de la chaîne transport est plus agrégée, dans la logique de la modélisation classique à 4 étapes, même si 3 types de ménages restent distingués en fonction de leur revenu, bas, médian ou haut.

Enfin, des différences sont également induites par les terrains sur lesquels les modèles ont été implémentés.

1. La taille de la ville et des réseaux impliqués nécessite une exigence plus forte et un travail de calage plus poussé pour la modélisation de la chaîne de transport dans Simbad© que dans Mobisim©. L'offre de transport de l'aire urbaine de Lyon implique en effet plus de situations de concurrence en termes de choix modal que sur le Grand Besançon. De même, il y a une plus grande complexité dans les possibilités d'itinéraires, tant au niveau des transports collectifs que sur le réseau routier et sa congestion en heure de pointe.
2. Par ailleurs, les dynamiques urbaines ne sont pas les mêmes. Par exemple, les prévisions Omphale de l'INSEE retenues pour établir les scénarios prospectifs envisagent une croissance de 23% en scénario médian sur l'aire urbaine de Lyon ; elles sont beaucoup plus mesurées sur l'agglomération de Besançon. De telles différences ne peuvent évidemment pas être ignorées dans les scénarios à 20 ans. Mais elles ont également entraîné un travail important dans le développement de Simbad© pour s'assurer de la cohérence des résultats sur le long terme.

L'utilisation de tels outils différents ne permet pas de présupposer une comparabilité directe des résultats. Cependant, dans le cadre de VILMODEs, l'hypothèse est faite que les calibrages et les calages des modèles ont été faits correctement sur leur terrain respectif. Dès lors, les dynamiques observées dans les simulations peuvent être comparées, sous condition d'utiliser des règles identiques pour construire les scénarios prospectifs que l'on veut tester.

C'est ici que des outils complémentaires entrent en jeu, pour construire cette convergence des scénarios pour tout ce qui concerne les évolutions de l'usage des sols ainsi que des activités économiques et des flux qu'elles génèrent.

2.2.2 Les modèles complémentaires

Si les modèles LUTI MobiSim© et Simbad© constituent le cœur des simulations effectuées dans le cadre de VILMODEs, ils n'apparaissent pas suffisants pour implanter les trois scénarios envisagés dans le cadre du projet. Des modèles plus spécifiques sont également mobilisés dans deux domaines différents : l'évolution de l'occupation du sol (logiciels MorphoLim©, MUP-City© et Fractalopolis© développés par ThéMA) et l'évolution du fret et des activités économiques (logiciels Freturb© et Simetab© développés par le LET). Les résultats de ces modèles complémentaires produisent des *inputs* construits de manière homogène sur les terrains lyonnais et bisontins et alimentent ainsi les simulations LUTI. Cette partie est consacrée à leur présentation. Comme précédemment, nous n'entrons pas dans les détails techniques et renvoyons le lecteur aux publications associées à ces modèles.

2.2.2.1. Occupation du sol : MUP-City© © et MorphoLim©

1. **MUP-City©** est une application mise au point au laboratoire ThéMA afin d'identifier des zones de développement résidentiel potentiel à l'échelle d'une agglomération urbaine, compte-tenu d'un ensemble de règles d'aménagement (Tannier *et al.*, 2012). La première règle d'aménagement est morphologique ; elle prescrit que la forme du développement résidentiel est fractale et se conforme ainsi aux nombreuses publications ayant montré que la croissance urbaine génère des formes fractales (Benguigui *et al.*, 2000 ; Shen, 2002 ; Feng and Chen 2010 ; Thomas *et al.*, 2012). Les autres règles d'aménagement introduisent des contraintes additionnelles au développement résidentiel. Elles prennent en compte la proximité aux routes, l'accessibilité aux commerces et services, l'accessibilité aux stations de transports publics, la proximité aux espaces ouverts et la présence de zones non constructibles.

MUP-City© permet de simuler différentes formes de développement résidentiel en faisant varier la dimension fractale du développement résidentiel et l'importance respective de chaque règle d'aménagement. L'identification de cellules intéressantes à urbaniser d'après MUP-City© se présente sous la forme d'une carte raster des cellules potentiellement urbanisables, caractérisées chacune par leur intérêt à être urbanisées. L'intérêt d'une cellule à être urbanisée varie entre 0 et 1. La taille des cellules est de l'ordre de 400 m² (soit 20 mètres de côté).

• Evolution de MUP-City© dans le cadre de VILMODEs

La version initiale 0.8 de MUP-City© permettait d'identifier les développements résidentiels potentiels dans les espaces périurbains des villes françaises de 100 000 à 1 000 000 d'habitants environ, partant d'un tissu urbain existant. Les règles additionnelles d'accessibilité étaient au nombre de quatre : (i) préservation du contact entre bâti et non bâti tout en minimisant la fragmentation des espaces non bâtis ; (ii) bonne accessibilité aux commerces et services de fréquentation quotidienne ; (iii) bonne accessibilité aux commerces et services de fréquentation hebdomadaire ; (iv) proximité au réseau routier existant. Dans le cadre du projet VILMODEs, nous avons fait évoluer MUP-City© afin de pouvoir l'utiliser non seulement pour les espaces périurbains, mais aussi pour les espaces urbains centraux des agglomérations. Pour ce faire, nous avons ajouté deux nouvelles règles d'accessibilité : (v) bonne accessibilité aux commerces et services de fréquentation mensuelle ou plus rare ; (vi) bonne accessibilité au réseau de transport collectif.

2. **MorphoLim**¹⁰ est un modèle d'identification des limites morphologiques d'une agglomération urbaine. Basée sur l'analyse des formes spatiales bâties, cette délimitation s'appuie habituellement sur la définition d'un seuil maximal de distance entre les bâtiments, en-deçà ou au-delà duquel un élément fait partie ou non de l'agglomération morphologique. Pour la définition des unités urbaines de l'INSEE, ce seuil est égal à 200 m. Dans le cas de zones densément bâties, les distances qui séparent les bâtiments voisins varient relativement peu et la détermination d'un tel seuil de distance est assez aisée à réaliser. En revanche, dans les franges urbaines, les formes d'urbanisation diffuses (mitage, maisons anciennes isolées) côtoient des formes nettement plus compactes (lotissements de maisons mitoyennes). En conséquence, les distances qui séparent des bâtiments voisins sont extrêmement variables (Chaudhry and Mackaness, 2008).

Pour dépasser cette difficulté, MorphoLim implémente une approche multi-échelle fondée sur les concepts de la géométrie fractale, qui permet de mettre en relation les formes locales du bâti (à l'échelle de l'îlot ou du pâté de maisons) et la forme globale d'une agglomération (Batty and Longley, 1994 ; Frankhauser, 1994). Le seuil maximal de distance définissant une agglomération morphologique émerge alors de l'analyse du bâti. Il signe une discontinuité spatiale fondamentale entre l'agglomération morphologique et les espaces bâtis qui l'environnent. Le seuil de distance ainsi déterminé est propre à chaque agglomération.

Pour identifier la limite morphologique d'un ensemble bâti, MorphoLim© procède en deux étapes (Tannier *et al.*, 2011). La première consiste en une dilatation pas à pas du tissu bâti considéré : le principe de la dilatation consiste à entourer chaque élément bâti de l'image d'une bande noire dont l'épaisseur augmente de manière itérative (Minkowski, 1903). Au fur et à mesure des dilatations, des éléments bâtis initialement séparés fusionnent et forment des agrégats ; ces agrégats grossissent d'étape en étape et leur nombre diminue. Le nombre d'agrégats bâtis à chaque étape de dilatation est compté et les résultats sont représentés sous la forme d'une courbe. Le deuxième volet de la procédure a pour but l'identification d'un seuil de distance dans la courbe obtenue, qui correspond à un changement majeur dans l'organisation spatiale du bâti¹¹.

2.2.2.2. Développement FOD : Fractopolis©

En s'appuyant sur les réflexions conceptuelles qui ont permis de développer l'outil de simulation MUP-City© (Frankhauser *et al.* 2011 ; Frankhauser, 2013), a été conçue une approche élargie basée sur une approche multifractale, particulièrement adaptée à l'élaboration de scénarios à l'échelle des zones métropolitaines (Frankhauser, 2012). Contrairement à MUP-City©, cette approche distingue des zones à urbaniser et des zones « rurales

10. Le logiciel est téléchargeable gratuitement sur la plateforme Internet [spatial-modelling.info](http://spatial-modelling.info/MorphoLim-Identifying-city) (<http://spatial-modelling.info/MorphoLim-Identifying-city>).

11. Pour ce faire, on ajuste d'abord la courbe issue des dilatations à une courbe estimée. Le choix de la « meilleure » courbe estimée est basé sur le *Bayesian Information Criterion* (BIC) (Schwartz, 1978). On calcule ensuite la courbure en tous points de la courbe estimée (Lowe, 1989). Ceci nous permet d'identifier le point où la courbe estimée s'éloigne le plus d'une droite. Il s'agit du point de courbure principale. Cette courbure principale dans la courbe des dilatations marque la limite entre deux ensembles morphologiques bien différents : l'agglomération morphologique d'une part, où les bâtiments sont disposés selon une logique fractale ; l'extérieur de l'agglomération morphologique d'autre part, où les bâtiments suivent une autre logique d'organisation spatiale.

» pour lesquelles aucun ou uniquement un faible développement est admis. Cette approche s’inspire de la théorie des lieux centraux (Christaller, 1933), mais concentre les zones à urbaniser proche d’un système de transport en commun emboîté. Les nœuds de ce réseau se situent au cœur des zones à urbaniser. Cette logique est donc en cohérence avec le concept du *Transit oriented development* (FOD) (cf. § ??). Entre les zones prévues pour l’urbanisation s’intercale un système connexe des zones « rurales ». Cette connectivité assure la présence de zones récréatives à une proximité des zones urbanisées ainsi qu’une bonne ventilation et évite un morcellement des espaces verts en favorisant ainsi la biodiversité. Le système de transport en commun constitue ainsi l’ossature du système spatial. Dans le modèle théorique ce système est structuré selon une logique radioconcentrique emboîtée (Figure 2.6). Les axes principaux reliant le centre le plus important aux centres secondaires correspondent à des voies ferrées, tandis que les centres secondaires sont reliés aux centres de niveaux inférieurs qui les entourent par des trains légers ou des Bus à Haut Niveau de Service (BHNS). A une échelle locale, on imagine un système de bus ou un transport à la demande. Ce système de rabattement favorise la concentration des flux vers les axes principaux. En même temps le système des lieux centraux assure une certaine autonomie des sous-centres visant la réduction des flux quotidiens vers les centres principaux. En outre les centres de même niveau hiérarchique ne sont pas connectés dans le but de réduire une concurrence directe entre centres proposant le même type d’offre.

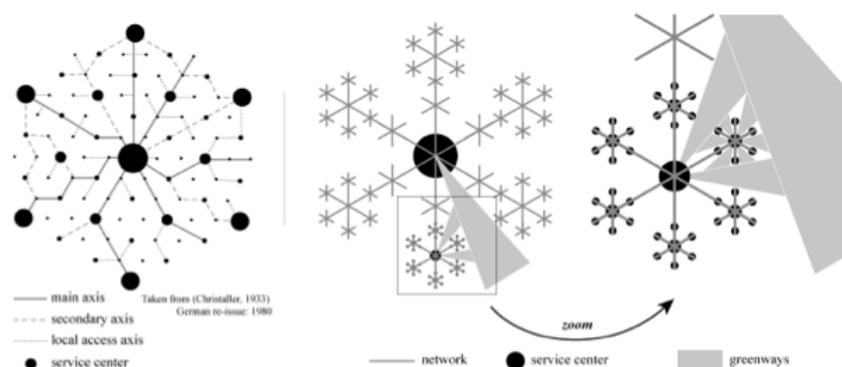


Figure 2.6 – Le réseau des lieux centraux de Christaller (1933) et les axes de transport associés, à gauche, et le système modifié dans lequel un réseau connecté de trames vertes pénètre le système des zones urbaines.

Pour une application concrète de ce concept, Fractalopolis a été développé dans le cadre du projet VILMODEs. Cet outil est conçu selon la logique d’un Système d’Information Géographique (SIG). On définit au départ à partir d’une représentation cartographique une zone d’étude carrée. Ensuite on centre sur la ville principale qui se trouve au cœur de la zone d’étude, un carré qui couvre cette ville et dont on choisit la taille. Ensuite on positionne un nombre N de carrés dont la taille est plus petite, tels qu’ils couvrent les centres secondaires à développer dans l’arrière-pays du centre principal. Le carré central et les N carrés de même taille forment ensemble un générateur multifractal qui est ensuite appliqué à chacun de ces $N + 1$ carrés. Ainsi, dans la prochaine étape, on place à l’intérieur de chacun des $N + 1$ carré précédemment défini, un carré que l’on positionne sur le centre urbain principal et on l’entoure de N centres tertiaires. Le rapport de la longueur de base du grand carré et des petits carrés est identique à celui de la première étape (Figure 2.7). On respecte donc le principe d’homothétie interne propre à la géométrie fractale. En revanche,

la position des éléments carrés est libre, toutefois leur intersection n'est pas admise. Cette procédure est réitérée en général deux fois. Par l'itération on découpe progressivement des zones non-urbanisables qui forment le système connexe de zones rurales.

Le principe d'emboîtement d'échelle permet d'introduire une hiérarchie urbaine distinguant différents niveaux de services et commerces. Dans cette optique un système spécifique de codage a été introduit. Ainsi on suppose que le centre principal qui correspond au plus grand carré propose la gamme entière des services et commerces incluant les services rares et les magasins spécialisés. L'offre des centres secondaires correspond aux services et commerces pour lesquels on suppose une fréquentation mensuelle, hebdomadaire et journalière, les centres tertiaires correspondent à une fréquentation hebdomadaire et journalière et le dernier niveau propose uniquement les services banals¹².

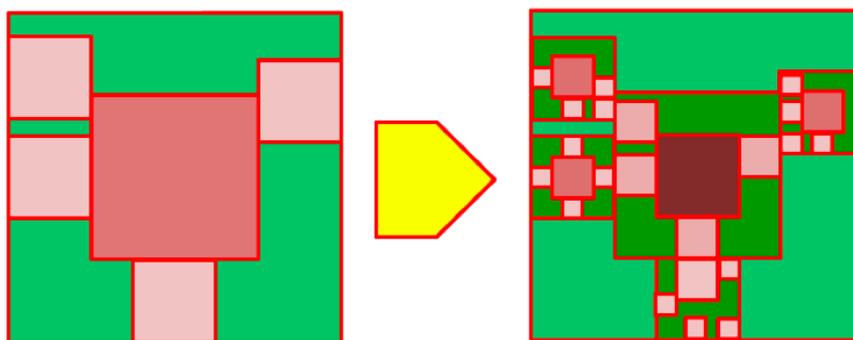


Figure 2.7 – Un générateur multifractal pour le système de lieux centraux. Le carré central définit la zone de développement du centre principal qui est entouré de quatre zones qui correspondent aux centres secondaires. A droite la prochaine étape d'itération qui génère les centres de troisième ordre et qui concentre la population dans les centres.

• Evolution de Fractalopolis© dans le cadre de VILMODes

Dans le cadre du projet VILMODes ce modèle d'occupation du sol a été complété par un modèle de répartition de population, ou, respectivement, de logement. En introduisant des facteurs de pondération définis selon une logique multi-échelle on affecte à chaque carré une population cible. Toutefois les facteurs peuvent être ajustés en passant d'une étape d'itération à la suivante. En outre, il est possible de prévoir une urbanisation faible dans les zones rurales. Le potentiel de développement dans ces zones peut varier en fonction de la distance au centre principal. Ce modèle est détaillé dans Frankhauser (2012).

Cet outil a servi à concevoir un scénario spatial pour le Grand Besançon et l'Aire urbaine de Lyon. Comme l'indique l'exemple présenté dans la Figure 2.8, les codes à trois chiffres correspondent aux zones à urbaniser, les autres codes aux zones « rurales ». Les codes urbains indiquent les niveaux hiérarchiques. Les zones dont le code commence par 1 donc $1xx$ sont affectées au centre principal (code 111), ceux qui commencent par 0 aux centres

12. Notons que, contrairement à la théorie des lieux centraux énoncée par W. Christaller (1933), le système spatial introduit dans Fractalopolis© tient compte du fait que la taille d'une ville d'un niveau donné dépend de sa distance au centre principal. Ainsi un centre tertiaire adossé au centre principal occupe une plus grande surface qu'un centre du même niveau qui se trouve loin du centre principal.

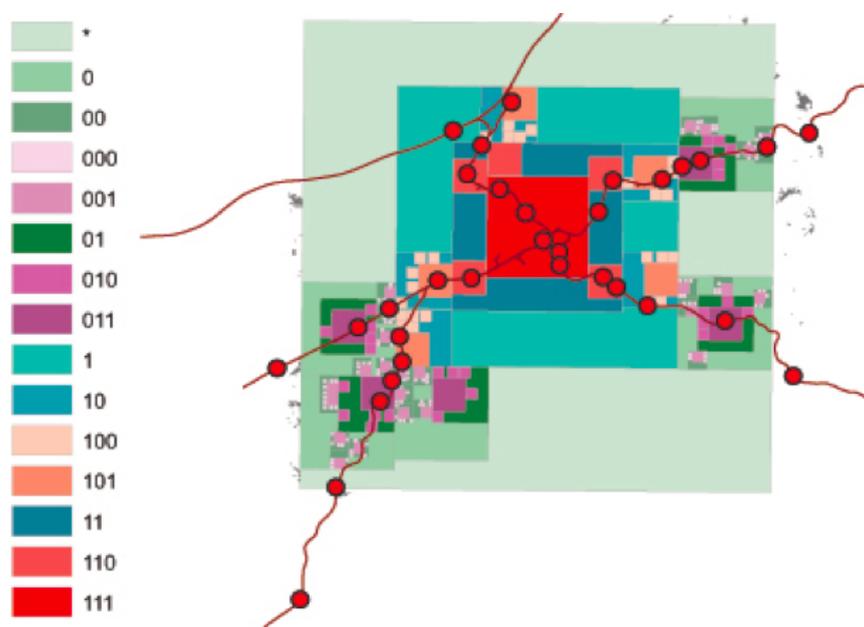


Figure 2.8 – Le zonage

choisi pour l'agglomération bisontine. Les codes à trois chiffres représentent la position dans la hiérarchie des lieux centraux, les autres codes correspondent à des zones "rurales" pour lesquelles une très faible évolution a été admise.

secondaires (code 011). Les deuxième et troisième chiffres précisent la position hiérarchique au sein de la zone définie par le premier chiffre. Ainsi les zones 001 sont les centres tertiaires affectés aux centres secondaires 011, tout comme les zones 101 sont les centres tertiaires affectés au centre principal 111¹³.

2.2.2.3. Fret et activités économiques : Freturb© et Simetab©

1. **Freturb©** est un outil logiciel conçu et développé par le Laboratoire d'Economie des Transports, dont l'objectif est de rendre compte des interactions entre les différents agents du système urbain qui sont impliqués dans la formation des flux de transport urbain de marchandises (Gerardin *et al.*, 2000 ; Routhier et Toilier, 2010). Comme on ne peut pas mesurer de manière équivalente la marchandise et le véhicule qui la transporte dans le cadre spécifique du transport urbain de marchandises, l'unité d'observation choisie pour Freturb© n'est ni la marchandise, ni le véhicule, mais l'événement que représente l'opération de livraison ou d'expédition de la marchandise par un même véhicule dans un établissement. Cette unité permet de mettre en relation deux domaines complémentaires :

- (a) La sphère économique, par la connaissance du lieu de livraison qu'est l'établis-

13. Un exemple d'application est l'étude du Grand Vienne (Autriche) qui a été réalisée dans le cadre d'une thèse par Claudia Czerkauer (Czerkauer-Yamu *et al.*, 2013 ; Czerkauer-Yamu et Frankhauser, 2013). Pour cet outil de simulation des règles d'accessibilité ont été définies qui suivent la même logique que celles introduites pour MUP-City (Tannier *et al.*, 2012). Cependant l'évaluation des accessibilités aux zones de loisirs a été complétée et les distances acceptées ont été adaptées au contexte d'étude. Dans ce contexte le système d'emboîtement d'échelle a été utilisé jusqu'à l'échelle intra-urbaine des quartiers. Toutefois aucune évaluation *a posteriori* de l'impact sur la mobilité en utilisant un modèle LUTI n'a été réalisée dans ce contexte.

sement. Elle permet de renseigner son activité économique, sa localisation, son environnement (type de voirie, densité urbaine) et les conditions dans lesquelles se réalise le chargement ou le déchargement de la marchandise,

- (b) La sphère logistique, par la connaissance du parcours dans lequel s'insère l'opération de livraison ou d'enlèvement de marchandise, permet de renseigner le type de véhicule utilisé, le type d'opérateur impliqué (transporteur professionnel, établissement lui-même, établissement client ou fournisseur) et le type de parcours (tournée plus ou moins longue ou simple aller-retour).

L'opérationnalité de ce modèle a été rendue possible par la réalisation d'enquêtes lourdes construites sur le même principe : sur un échantillon d'établissements représentatifs des activités de chaque ville enquêtée, les opérations de livraisons et enlèvements ont été décrites sur une semaine complète. Une enquête auprès des chauffeurs qui ont visité les établissements permet de décrire l'organisation logistique des opérateurs qui répondent à la demande de transport des établissements enquêtés.

C'est avec cette grille que le modèle a été construit, à partir de résultats obtenus grâce à une série d'enquêtes nationales conçues sur le même modèle et menées à Bordeaux, Dijon et Marseille dans la deuxième moitié des années 1990¹⁴. Elles ont montré que les comportements observés étaient très stables d'une ville à l'autre (ratios constants, tendances fortes identiques, liens fonctionnels similaires) et que ce qui expliquait les écarts entre les villes était les différences de leurs structures d'activités, leurs tailles et leurs configurations, et dans une moindre mesure les spécificités de leurs politiques locales. Dans la mesure où l'essentiel de ces différences pouvaient être prises en compte à travers la fourniture d'un fichier d'établissements exhaustif (en l'occurrence, le fichier SIRENE de l'INSEE) et d'un fichier de caractéristiques démographiques et géographiques, le modèle Freturb© a pu être développé. C'est un modèle statistique de type *bottom-up* en ce sens qu'il résulte d'un calcul des corrélations entre les caractéristiques des générateurs de flux que sont les établissements enquêtés.

Sur la base d'une typologie d'activités très fine construite à partir de la Nomenclature d'Activités Françaises en 700 positions (NAF700), de la taille de l'établissement, de son statut et de la nature du local, Freturb© est à même de simuler les livraisons et enlèvements générés par chacun des établissements économiques et de les caractériser (expéditions, réceptions, véhicules employés, mode de gestion (fonction de l'opérateur) et mode d'organisation (type de véhicule et type de parcours). Il permet de simuler les heures stationnées par les véhicules lorsqu'ils déposent ou chargent de la marchandise, et ce pour 4 catégories de stationnement (privé, autorisé, interdit, double-file) de même que les kilomètres circulés dans l'agglomération du fait de ces opérations. Enfin, à partir des distances ainsi calculées, le module de distribution des flux de Freturb© propose trois matrices de flux (VUL, camions porteurs, véhicules articulés) pour chacun des couples de zones qui constituent le territoire d'étude et selon différentes périodes de la journée (pointe du matin, pointe du soir, heure creuse). Ces matrices sont converties en équivalent VP (EVP) selon la clé suivante : 1 VUL = 1.5 VP, 1 camion porteur = 2 VP, 1 véhicule articulé = 2.5 VP, ce qui permet de comparer l'occupation de la voirie par les flux de marchandises avec celle du trafic automobile.

14. Une actualisation est en cours aujourd'hui à partir d'une nouvelle vague d'enquêtes entamée en 2010 en Ile de France, puis à Bordeaux en 2012.

Freturb est sensible aux modifications intervenant dans :

- le jeu des localisations des établissements,
- leur type d’activité
- ainsi que le nombre d’emplois de ces établissements.

• Evolution de Freturb© dans le cadre de VILMODEs

Cette évolution a eu pour objet d’utiliser Freturb© dans Simbad© et dans MobiSim©. Dans le cadre de MobiSim©, Freturb© a été utilisé pour estimer les flux à la date d’origine de la simulation et a donc pu fonctionner à partir d’un fichier SIRENE c’est-à-dire sur la base de l’activité décrite en 700 positions. Dans la mesure où MobiSim© utilise des données très désagrégées, les matrices origine/destination issues de Freturb© ont été décomposées non pas en 3 tranches horaires mais à la demi-heure sur la base des horaires de livraisons par type d’activité observés dans les enquêtes marchandises en ville.

En ce qui concerne Simbad©, la typologie d’activités utilisée est plus agrégée que celle de Freturb© puisqu’elle est construite sur la Nomenclature Economique de Synthèse en 36 positions (NES36). Il a donc été nécessaire de construire une table de correspondances afin de permettre aux deux modèles de dialoguer. Par ailleurs, s’agissant de charger le réseau afin de calculer des accessibilités, seul le module de distribution des flux de Freturb© a été utilisé et les véhicules n’ont été distingués que selon deux catégories (VUL et porteurs d’une part, articulés d’autre part) puis convertis en EVP.

2. **Simetab©** est un modèle mis au point par le LET pour répondre aux besoins identifiés dans le projet VILMODEs (Gardrat *et al.*, 2014). Il a pour objectif de reproduire la structure économique d’un territoire à partir de données démographiques et géographiques basiques (population, surface, distance au entre, etc.) pour fournir ensuite des résultats nécessaires à la génération des trafics de marchandises en ville, mais également à l’estimation des déplacements domicile-travail et achats des modèles de transport. Il fournit ainsi une brique de modélisation de génération et de localisation des établissements qui s’intègre dans les plateformes Mobisim© et Simbad© du projet VILMODEs. Simetab© repose sur une caractérisation de différents territoires urbains, établie en croisant la théorie de la base économique et la théorie des biens centraux :

- (a) La première distingue deux types de comportement spatiaux pour les activités avec d’une part les activités de soutien destinées à desservir la population locale et d’autre part les activités de base, dont la portée dépasse l’échelle locale en raison de leur caractère spécifique et qui donnent lieu à des exportations bien au-delà de l’agglomération d’implantation
- (b) La seconde permet de hiérarchiser les activités de soutien à la population, en distinguant les activités les plus banales dont l’aire d’influence est réduite et que l’on retrouve sur tout le territoire, et les activités ou services les plus rares qui ne se rencontrent que dans les plus grosses agglomérations.

Cette structure en trois grands types d’activités (de base, de soutien ‘banal’ à la population, de service central) a été utilisée pour établir une typologie des territoires urbains ainsi que les fonctions de générations des établissements par type d’activité à l’échelle de l’agglomération. Ces éléments ont été calibrés à partir notamment du

fichier national des établissements économiques produit en 2010 par l'INSEE, qui recense pour chaque commune française, le nombre d'établissements par activité et par taille. Il a été complété d'éléments sur les caractéristiques physiques des communes fournies par l'IGN et Corine Land Cover ainsi que par la hiérarchie urbaine (fonctions administratives, statut au sein de l'unité urbaine) établie à partir du descriptif des unités urbaines 2010 de l'INSEE.

Le rôle de Simetab© dans VILMODes est la répartition spatiale des activités en fonction des divers scénarios de répartition de la population proposés dans le projet. Pour les besoins de ce projet, la génération des établissements n'est donc pas librement gérée par Simetab© mais se fait sous la contrainte du nombre d'emplois et du nombre d'établissements par type d'activité fixés par la tendance générale retenue à horizon 2030 pour l'aire urbaine de Lyon d'une part et pour l'agglomération bison-tine d'autre part. Une fois générés, ces établissements sont localisés dans le périmètre d'étude en fonction de l'appartenance des territoires urbains à la typologie établie ainsi que des données d'entrée fournies par les scénarios prospectifs retenus pour les simulations. En sortie de Simetab©, nous obtenons donc un fichier d'établissements caractérisés par leur activité, leur taille et leur localisation à l'IRIS et à la commune.

2.2.3 Principes et techniques d'intégration

Si l'ensemble des modèles présentés dans le point précédent apparaissent complémentaires d'un point de vue théorique, il n'ont pas été développés pour fonctionner ensemble *a priori*. L'un des enjeux du projet VILMODes a donc été de les contraindre et de les modifier de manière à ce que les *outputs* des uns puissent servir d'*inputs* aux autres. Cette intégration technique, relativement complexe et chronophage dans le cadre du projet, est aujourd'hui résumée par la Figure 2.9 qui montre comment les résultats des modèles dits complémentaires viennent appuyer les simulation réalisées à l'aide de MobiSim© à Besançon et de Simbad© à Lyon. Nous présentons ici brièvement les principes de cette intégration technique, avant de montrer de quelle manière les résultats produits peuvent être interrogés pour fournir des indicateurs relativement synthétiques.

2.2.3.1. Intégration des modèles

L'intégration des modèles entre-eux relève en réalité de deux opérations distinctes. Dans un premier temps, il s'est agi de « faire communiquer » les modèles dits complémentaires avec les modèles LUTI. Dans un deuxième temps, il s'est avéré nécessaire de veiller à la cohérence des résultats produits par les modèles complémentaires en eux-même, en particulier lors du couplage de MUP-City© et de Morpholim©.

1. Modèles LUTI \Leftrightarrow modèles complémentaires

Le développement résidentiel est simulé au sein de la plateforme MobiSim© dans un module particulier qui permet d'intégrer les "PLU" simulés par ailleurs avec les modèles Fractalopolis©, MUP-City© et MorphoLim©. La procédure de simulation suit une logique multi-échelle qui concrètement, se déroule comme suit :

- Le nombre de logements construits annuellement, la proportion de logement individuel et collectif, de même que la taille des logements sont définis en tant que

paramètres globaux pour l'ensemble de la zone d'étude. Pour l'ensemble des scénarios simulés ici, le nombre de logements construits annuellement est fixe tandis que la part des logements individuels et collectifs sera variable.

- A l'échelle de la région urbaine (échelle macro), une couche vectorielle de polygones délimitant les zones constructibles est mise au point à l'aide de Fractalopolis© (scénario FOD), de MorphoLim© (scénario RUC) ou d'un découpage *ad hoc* (découpage communal pour le scénario LF), puis la part de logements individuels et collectifs doit être définie pour chacune des zones constructibles (chaque carré Fractalopolis© par exemple). La couche vectorielle ainsi créée sert de donnée d'entrée pour le module "développement résidentiel" de MobSim©.
- A l'échelle locale, le logiciel MUP-City© est utilisé pour définir les cellules potentiellement constructibles au sein des secteurs urbanisables et les hiérarchiser en fonction des règles d'aménagement. La forme du tissu générée est définie par le choix d'une dimension fractale et par la pondération de l'importance respective des règles d'aménagement qui varient selon le scénario retenu. Une couche SIG-raster ainsi produite représente une seconde donnée d'entrée pour le module "développement résidentiel" de MobiSim©.

Une fois les données spatiales intégrées dans MobiSim©, la simulation du développement résidentiel est effectuée chaque année au sein des périmètres définis à l'échelle macro. A chaque itération, les nouveaux bâtiments résidentiels sont construits dans les cellules les mieux évaluées par MUP-City© et peuvent être alors soit, une maison, soit un immeuble collectif. Le nombre de logements par cellules sera alors variable.

2. MUP-City© \Leftrightarrow MorphoLim©

Afin de définir à l'intérieur de chaque zone les endroits préconisés pour une future urbanisation à l'échelle intra-urbaine, une version automatisée de MUP-City© a été utilisée. MUP-City© évalue alors chaque élément de la grille selon les règles d'accessibilité tout en respectant les limites données par une dimension fractale prédéfinie ainsi que les règles morphologiques interdisant la coupure de trames vertes. La version automatisée procède alors à un classement ordinal des endroits, donc les éléments de la grille en fonction de leur évaluation. Les éléments les mieux évalués sont ainsi occupés en premier etc. Cette version automatisée s'approche donc, par sa logique, d'un automate cellulaire multi-échelle¹⁵.

Le développement résidentiel est effectuée chaque année au sein des périmètres définis à l'échelle macro. A chaque itération, les nouveaux bâtiments résidentiels sont construits dans les cellules les mieux évaluées par MUP-City© et peuvent être alors soit, une maison, soit un immeuble collectif. Le nombre de logements par cellules sera alors variable.

3. Simbad© \Leftrightarrow Freturb© et Simetab©

En ce qui concerne Simbad©, chacune des simulations nécessite une trentaine d'heures

15. Notons que le choix de la dimension fractale à l'intérieur des zones Fractalopolis© doit être en cohérence avec le nombre de logements à créer. En effet si la dimension est trop faible le logiciel positionnerait des logements hors zones Fractalopolis© à partir d'une simple évaluation d'accessibilité pour pouvoir positionner le nombre requis de logements.

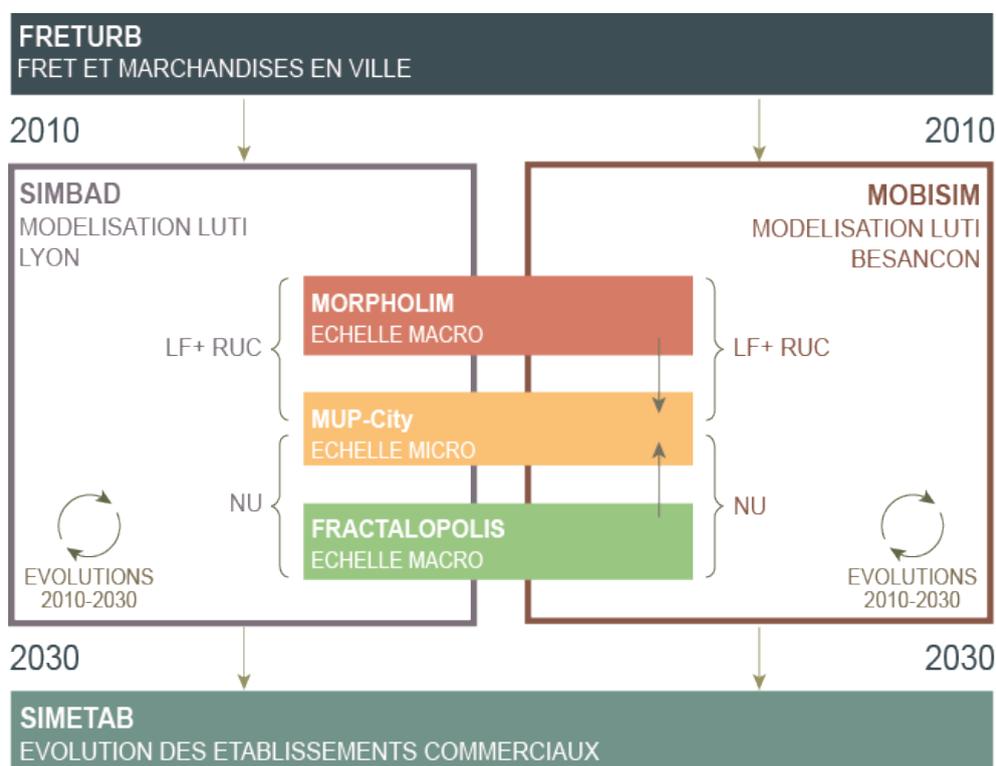


Figure 2.9 – Couplage des modèles pour les simulations 2010-2030

de calculs. Cette durée est difficilement compressible du fait de la conception même de la plateforme, qui utilise successivement des logiciels différents : UrbanSim, Simétab© (15 minutes de traitement chaque année de la simulation), Freturb© (25 minutes toutes les 5 années), Visum (20 minutes pour chaque année et 20 minutes supplémentaires tous les 5 ans). Ainsi, tant qu'UrbanSim et Simétab© n'ont pas généré et localisé les établissements économiques, Freturb© ne peut pas être appelé ; de même Visum ne peut être lancé qu'une fois les matrices voyageurs et marchandises établies. Une parallélisation des traitements voyageurs d'une part et marchandises d'autre part pourrait néanmoins être envisagée de même qu'une parallélisation des affectations de trafic en heure de pointe et en heure creuse avec le logiciel Visum.

2.2.3.2. Simulations et requêtes

1. Parallélisation

Une simulation sur Besançon et sur 20 ans met environ 80 heures sur un ordinateur avec un seul processeur. Depuis plusieurs années, pour réduire le temps d'exécution, MobiSim© a été parallélisé : l'ensemble des calculs à effectuer sont répartis sur plusieurs processeurs d'un même ordinateur permettant de réduire le temps d'exécution proportionnellement au nombre de processeurs de la machine. Avec un ordinateur contenant 16 coeurs (un coeur est l'équivalent d'un processeur), le temps d'exécution d'une simulation passe de 80 heures à 5 heures et 30 minutes. La parallélisation actuelle de MobiSim© est contrainte par le nombre de coeurs disponibles dans un ordinateur. Pour aller au delà, il faudra passer à une parallélisation à mémoire distribuée (MPI) qui permet de répartir l'exécution d'une simulation sur plusieurs

ordinateurs et de passer la barre des 100 coeurs.

2. Centre de calcul

Pour exécuter les simulations, nous avons utilisé les ressources de calcul fournies par le Mésocentre de calcul de l'Université de Franche-Comté. Outre l'intérêt d'avoir accès à des machines de calcul performantes, le système de gestion du cluster de calcul nous permet de lancer plusieurs simulations en même temps sur plusieurs ordinateurs. Concrètement, nous pouvons exécuter 10 simulations complètes en 7h, ce qui mettrait environ 800 heures (environ 1 mois) sur un simple ordinateur.

2.2.3.3. Analyse des résultats

Pour analyser les résultats, deux approches sont possibles dans MobiSim© : (i) déterminer en amont les indicateurs voulus en sortie et (ii) être dans une démarche exploratoire sans à priori sur les résultats attendus. La première a l'avantage d'être économe en volume de données, au risque de rater des résultats intéressants non prévus. La seconde est plus ouverte mais plus délicate à mettre en œuvre car le volume de données peut vite exploser.

1. Sorties agrégées : démarche *a priori*

Dans le fichier de paramétrage d'une simulation, on peut définir un ensemble d'indicateurs à différents niveaux d'agrégation, ce qui diminuera fortement le volume de données en sorties.

```

<!-- Revenu médian par CSP -->
<DistribOp>
  <name>revenu_median_csp</name>
  <table>agent</table>
  <field>Revenu</field>
  <ops enum-type="Op">MED</ops>
  <groupFields>
    <string>Activite</string>
  </groupFields>
</DistribOp>

<!-- Flux migratoire par zone -->
<FlowOp>
  <table>evt_reloc</table>
  <from>point_from</from>
  <to>point_to</to>
  <zones><file>zones_resultats.shp</file></zones>
  <idZone>Zone</idZone>
</FlowOp>

```

Si l'on souhaite, après coup, obtenir un autre indicateur, il faudra relancer la simulation, ce qui n'est pas le cas avec les sorties détaillées.

2. Sorties détaillées : démarche exploratoire

Pour Besançon une simulation peut émettre plusieurs dizaines de gigaoctets en sortie détaillée. Ce volume de données devient vite très difficile à analyser sans utiliser des outils adéquats. Pour cela, nous avons mis en place un export direct des données détaillées vers un serveur de base de données PostgreSQL/PostGIS. Ces données vont pouvoir être analysées par l'intermédiaire de différents outils comme R ou QGIS. Pour ce projet, les indicateurs ont été réalisés avec R à partir des données stockées sous PostgreSQL.

La difficulté de cette solution réside dans l'apprentissage par l'utilisateur du langage SQL, spécifique aux bases de données, qui peut limiter l'utilisateur dans ses analyses. Pour faciliter l'analyse exploratoire des données de simulation, nous développons un logiciel (Geographer©) qui permet de s'affranchir du langage SQL pour explorer les données. L'utilisateur manipule graphiquement les données, le logiciel traduit en SQL, envoie au serveur de base de données et affiche le résultat à l'utilisateur.

L'outil SimGraph, développé pour les besoins de Simbad©, permet de sélectionner parmi les quelques 60 Gigaoctets de données produites au cours d'une simulation, celles qui donneront lieu à la production de cartes et de tables synthétiques. Une liste d'indicateurs jugés pertinents pour rendre compte des effets d'un scénario a donc été établie *a priori* et est systématiquement calculée. Dans le cadre du projet VILMODEs, la liste de résultats habituellement produits par Simbad© a été enrichie de manière à permettre des comparaisons entre les résultats des deux agglomérations et des deux modèles qui sous-tendent ce projet. Tout comme pour MobiSim©, il est également possible de sortir de cette liste d'indicateurs pré-établie pour aller fouiller directement les données afin d'enrichir les analyses et la compréhension de la manière dont les résultats sont obtenus. Il s'ensuit un mouvement de va-et-vient entre la définition d'indicateurs *a priori* et les questions soulevées par l'analyse des résultats qui conduisent à des traitements spécifiques sur les données, traitements susceptibles de conduire à enrichir la liste d'indicateurs à produire de manière automatisée.

2.3 Mise en œuvre des scénarios à Lyon et Besançon

Pour construire les scénarios, nous sommes tenus à cette étape du travail de prendre en compte les possibilités et limites des modèles utilisés. Le cœur des simulations a été effectué par un modèle LUTI : MobiSim© dans le cas de Besançon et Simbad© dans le cas de Lyon. Après avoir exposé comment la tendance générale, commune aux trois scénarios, était construite, nous décrivons dans cette section la façon dont nous spécifions nos trois familles de scénarios et les transformons en fichiers d'entrée pour les modèles, tout en présentant les spécificités propres à chaque terrain qui ont été prises en compte.

2.3.1 Cadre général des scénarios

Tout d'abord, en amont de l'appel à Mobisim© et Simbad© pour réaliser les simulations, la composante "développement résidentiel" des scénarios a été construite exactement avec les mêmes outils et les mêmes règles de part et d'autre. La procédure commune mise en place suit une logique multi-échelle qui, concrètement, se déroule selon les étapes suivantes :

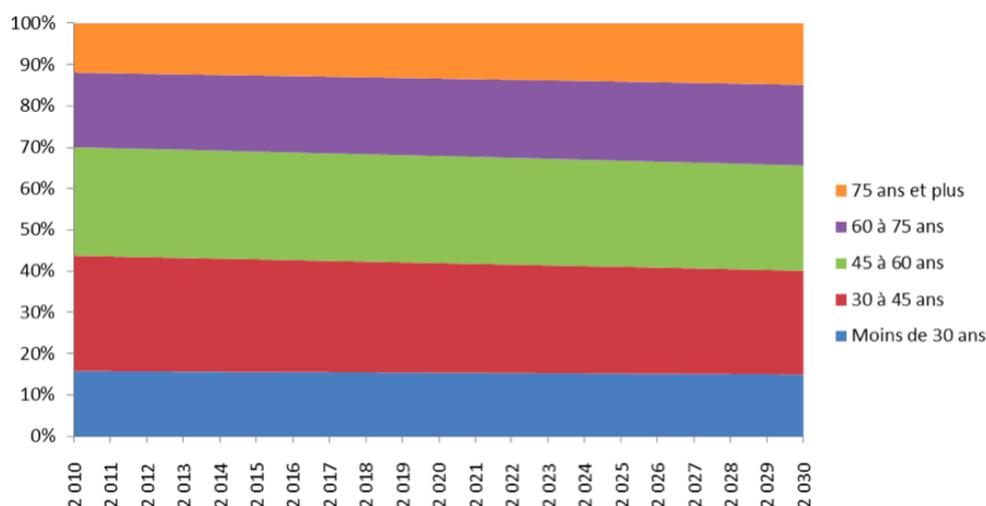


Figure 2.10 – Structure de la population selon l'âge du chef de ménage
Tendance 2010-2030 sur l'Aire urbaine de Lyon

2.3.1.1. Evolution démographique à horizon 2030

Le nombre de logements construits annuellement, la proportion de logements individuels et collectifs, de même que la taille des logements sont définis en tant que paramètres globaux pour l'ensemble de la zone d'étude. En effet, les logements construits sont liés à l'évolution de la population (tant en nombre d'habitants qu'en structure) qui est fournie sur Lyon comme sur Besançon par les prévisions du scénario médian de Omphale (INSEE). Ces évolutions de la population sont les mêmes d'un scénario à l'autre, aussi, pour l'ensemble des scénarios simulés, le nombre de logements construits annuellement est-il fixe. En revanche, dans MobiSim©, la part des logements individuels et collectifs peut varier d'un scénario à l'autre.

Sur le périmètre du Grand Besançon, cette hypothèse conduit à retenir une croissance de 850 logements par an. Dans l'aire urbaine Lyonnaise, la croissance prévue est plus soutenue et conduit à ajouter 6500 nouveaux logements par an pour un gain de 120 000 habitants sur la période 2010 – 2030. Compte tenu du vieillissement de la population, ces prévisions conduisent à faire progresser de 4 points à horizon 2030 la part des ménages dont le chef est âgé de plus de 60 ans, cette croissance se faisant principalement au détriment des ménages dont le chef a de 30 à 45 ans (- 3%), les catégories « Moins de 30 ans » et « 45 à 60 ans » ne diminuant marginalement (Figure 2.10).

Si l'on prolonge les tendances observées entre les recensements 1999 et 2010 sur l'évolution de la taille des ménages (Figure 2.11), il en résulte que d'ici 2030 le vieillissement de la population d'une part, et la part significative de ménages dont le chef a moins de 30 ans d'autre part conduisent à une croissance des ménages composés d'une ou deux personnes (+7 points) tandis que les ménages de 3 personnes ou plus voient leur importance décroître sur le périmètre de l'aire urbaine lyonnaise portant ainsi la taille moyenne des ménages à 2,11 personnes¹⁶.

16. Pour mémoire, les prévisions de l'INSEE sur la France métropolitaine sont comprises entre 2,04 et 2,08. Source : Jacquot A., 2006, Des ménages toujours plus petits - Projection de ménages pour la France métropolitaine à l'horizon 2030, *Insee Première*, 1106, Octobre 2006.

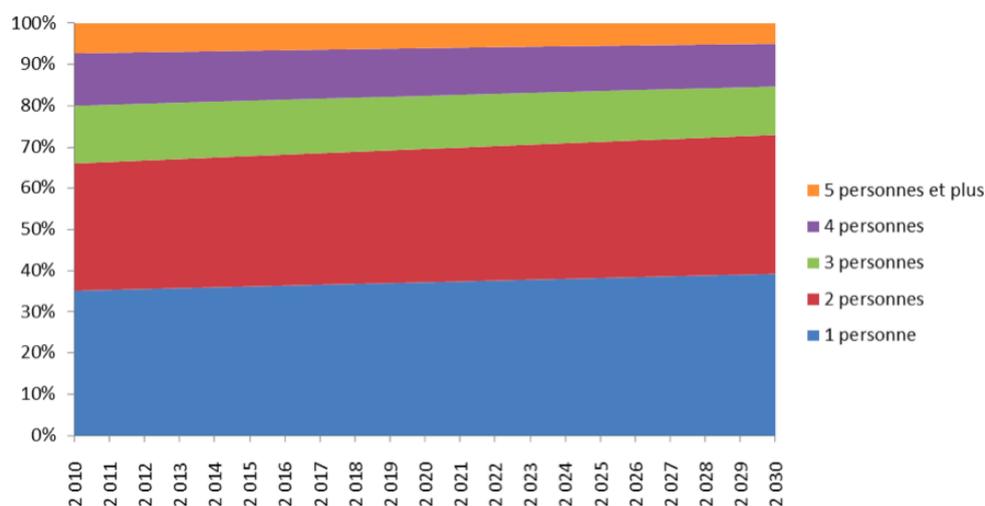


Figure 2.11 – Structure de la population selon la taille du ménage
Tendance 2010-2030 sur l’Aire urbaine de Lyon

2.3.1.2. Identification des zones constructibles

A l’échelle de la région urbaine (échelle macro), une couche vectorielle de polygones délimitant les zones constructibles est mise au point à l’aide de Fractalopolis© (scénario FOD) ou de MorphoLim© (scénarios LF et RUC), puis la part de logements individuels et collectifs est définie pour chacune des zones constructibles (chaque carré Fractalopolis© par exemple). Une première couche vectorielle est ainsi créée.

2.3.1.3. Choix de localisation

A l’échelle locale, le logiciel MUP-City© est utilisé pour définir les cellules potentiellement constructibles au sein des secteurs urbanisables et les hiérarchiser en fonction des règles d’aménagement. La forme du tissu généré est définie par le choix d’une dimension fractale et par la pondération de l’importance respective des règles d’aménagement qui varient selon le scénario retenu. Cette procédure locale permet de produire une couche SIG-Raster.

Chacune des couches créées aux niveaux macro et micro alimente ensuite MUP-City©. A chaque itération (année), les nouveaux bâtiments résidentiels sont construits dans les cellules les mieux évaluées par Mup-City©. Dans MobiSim©, on indique également s’il s’agit de maisons ou d’immeubles collectifs. Le nombre de logements par cellules est alors variable. Ils sont directement utilisés à cette échelle fine dans le cadre de MobiSim© et sont agrégés à l’IRIS avant d’être intégrés aux simulations de Simbad©.

2.3.2 L’implémentation *Laisser faire* (LF)

Le scénario Laisser faire (LF) constitue le scénario de base auquel les autres scénarios seront comparés. Ces principes fondamentaux ont déjà été décrits dans le § 2.1.2, mais il convient de revenir ici rapidement sur les hypothèses et les paramètres qui permettent de l’implémenter de manière à peu près identique à Lyon et à Besançon, deux terrains d’étude aux caractéristiques très différentes, mais dont les spécificités ne constituent pas un enjeu

ou une contrainte fondamentale pour simuler une situation de laisser-faire. La répartition de ces logements sur les deux périmètres se fait à deux échelles :

1. A l'échelle macroscopique du Grand Besançon, 59% de ces nouveaux logements sont construits dans la commune de Besançon (14% de maisons individuelles et 86% de logements collectifs constitués d'appartements) et les autres 41% sont répartis dans les autres communes de manière proportionnelle à leur population (la répartition individuel/collectif suit alors la règle suivante : très petites communes : 100% individuel ; petites communes : 90% individuel ; communes moyennes : 86% individuel). Dans le cas lyonnais, 30% des nouveaux logements sont construits sur Lyon et Villeurbanne, 42% dans le reste du Grand Lyon et les 28% restants sont en périphérie. La répartition individuel/collectif n'est par contre pas prise en compte dans Simbad© ; en revanche chaque IRIS est affecté d'une proportion de logements sociaux, stable dans le temps.
2. A l'échelle microscopique, MUP-City© permet de définir les parcelles de 400 m² à préconiser pour l'urbanisation à venir selon plusieurs règles : le scénario fractal d'urbanisation est calibré avec une dimension fractale de 1,77 (forte densité bâtie locale) en respectant l'accessibilité aux commerces et aux services de fréquentation quotidienne et hebdomadaire, la contiguïté des espaces bâtis et des espaces non bâtis, et la proximité au réseau routier (sur lequel circulent également les transports en commun). L'importance des règles est la même pour chacune d'elles et elles sont synthétisées par une moyenne arithmétique¹⁷.

2.3.3 Implémentation *Renouvellement urbain compact* (RUC)

Pour le scénario RUC, le développement résidentiel envisagé doit définir une « enceinte » urbaine en dehors de laquelle il est interdit de construire, et à l'intérieur de laquelle il est préconisé de densifier les activités et l'habitat résidentiel, essentiellement sous la forme d'immeubles. La délimitation de cette « enceinte », même si elle se fonde sur une base commune à partir du principe théorique de la ville compact défini au § 2.1.2, doit être adaptée aux spécificités locales de Besançon et de Lyon, selon différents critères.

2.3.2.1. A Besançon

Au sein de la Communauté d'Agglomération du Grand Besançon, l'« enceinte » prévue par le scénario RUC est intégralement incluse dans la limite morphologique de la tache urbaine, calculée à l'aide du modèle Morpholim© : elle s'inscrit pleinement dans la principale zone d'urbanisation (cf. carte 2.2, page 32) et se concentre sur la commune centrale de Besançon. Pour accentuer la densification dans ces espaces centraux et tenir compte des impératifs d'accessibilité nécessaires à la mise en place d'une ville compacte, le développement est contraint dans deux zones plus réduites et emboîtées l'une dans l'autre (Carte 2.12) :

1. Une zone de **bonne accessibilité pédestre** au réseau de transport en commun. Selon les préconisations du CERTU, cette accessibilité est définie par une distance à vol d'oiseau de 300 mètres autour des arrêts de bus (en vert sur la Carte 2.12)

17. Dans la cas de Besançon, le réseau TER est intégré au système de transport en commun à partir de 2015, puisque c'est à cette date que le tramway entre en service.

et de 500 mètres autour des arrêts de tramway (en bleu sur la même carte), et calculée de manière exogène par une requête SIG très simple (*buffer*). Pour tenir compte de la compacité attendue dans la zone ainsi définie, les espaces d'accessibilité non contigus ont ensuite été éliminés manuellement. A l'intérieur de cette première zone, le scénario RUC prévoit un développement résidentiel composé essentiellement d'immeubles collectifs (85 % environ), mais également de maisons individuelles (à hauteur des 15 % restant), ce qui correspond quasiment à un rapport inversé par rapport aux simulations réalisées pour le scénario LF.

2. Une zone de **haute fréquence TC**, relayant à la notion de Bus à haut niveau de service (même si ces derniers ne sont pas identifiés en tant que BHNS dans l'agglomération bisontine). Cette zone a été délimitée après consultation des fiches horaires du réseau de transport en commun, en ne retenant que les stations pour lesquelles les intervalles de passage des bus et des tramways sont inférieures ou égales à 5 minutes durant les heures de pointe¹⁸. Ces zones sont figurées en grisé sur la Carte 2.12. Le scénario RUC y prévoit la construction d'immeubles collectifs uniquement (100 %), dont la hauteur peut être jusqu'à deux fois plus élevée que celle des bâtiments constituant l'actuel centre-ville.

A l'intérieur de ces deux taches, les zones les plus favorables à l'urbanisation sont évaluées à l'aide du modèle MUP-City©, selon des critères d'occupation du sol et d'accessibilité identiques à ceux du LF (cf. p. 53), la taille de base des parcelles constructibles étant fixée à 400 m² (20mx20m). Les résultats obtenus servent alors d'*inputs* à MobiSim© pour la simulation des mobilités quotidiennes et résidentielles.

Focus sur le quartier des casernes

Pour l'implémentation du scénario RUC, des définitions différentes ont été retenues pour Besançon et Lyon : elles tiennent compte du fait que la commune-centre joue un rôle important dans l'agglomération de Besançon et plus faible dans le cas de l'agglomération lyonnaise. Si les deux scénarios ont en commun de concentrer les nouvelles urbanisations principalement dans une zone centrale, la définition de ce qui constitue la zone centrale est différente : les constructions de logements nouveaux attendus dans la ville-centre de Lyon sont bien plus faibles 13% qu'à Besançon (59%) car la zone centrale de l'agglomération s'étend sur les communes alentours, qui au total capturent 69% des nouveaux logements. Une telle implémentation est appropriée dans le cas d'une métropole de taille importante (l'Aire Urbaine de Lyon est environ 9 fois plus peuplée que celle de Besançon) et dynamique.

À Besançon les contours de la zone d'urbanisation préférentielle correspondent de façon beaucoup plus étroite au cœur de l'agglomération, choix qui est en adéquation avec une aire urbaine de taille modeste en faible croissance démographique. C'est pourquoi l'implémentation du scénario compact se fait principalement sur des zones internes à la commune de Besançon mais externes à la boucle historique du Doubs.

18. Rappelons que, dans le cas bisontin, le tramway, officiellement mis en service durant l'été 2014, est pris en compte à partir de 2015 dans les simulations. Les nouveaux horaires et la modification des lignes de transport en commun qui accompagnent sa mise en place sont également pris en compte à partir de cette date, selon les informations obtenues auprès de l'opérateur de transport local (Ginko).

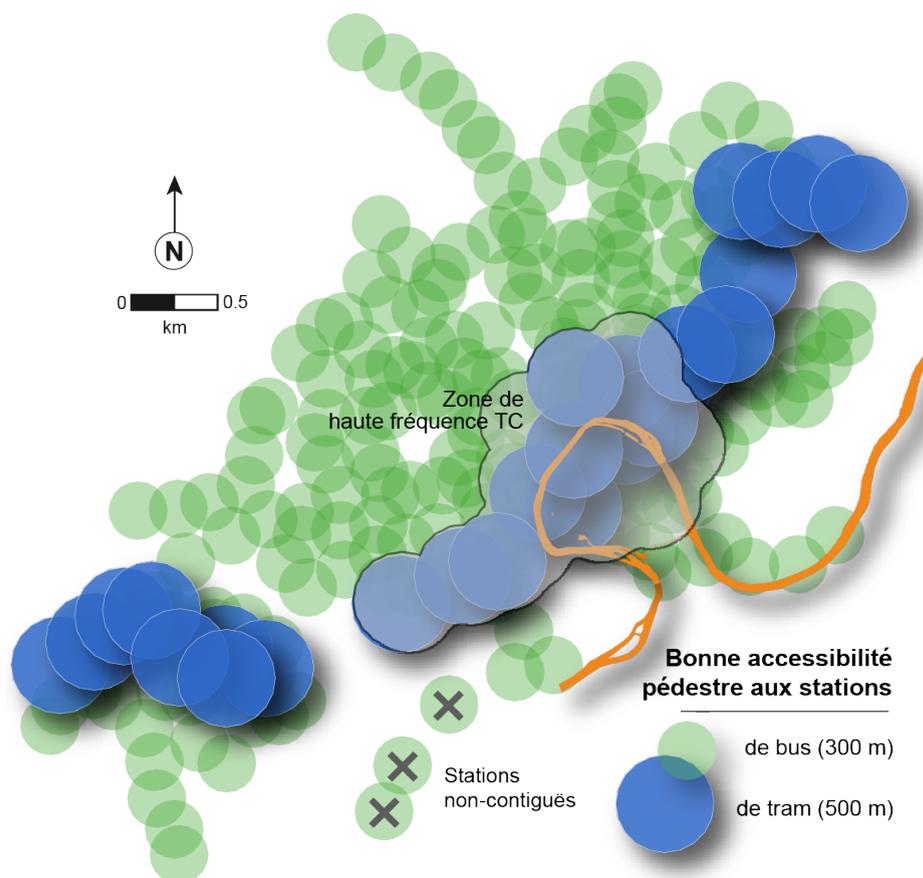


Figure 2.12 – Zones de développement résidentiel pour le scénario RUC (bonne accessibilité pédestre aux stations TC et haute fréquence de passage)

Un point particulier doit être noté dans le cas de Besançon par rapport au cas de Lyon : du fait que le modèle MobiSim© est un modèle désagrégé, nous avons pu implémenter dans le détail des zones ouvertes à l'urbanisation (à l'intérieur des zones administratives les plus fines), ce qui permet de tester des opérations de renouvellement urbain sur des territoires spécifiques. Dans le cadre du programme de recherche VILMODES, nous avons proposé dans le scénario RUC d'ouvrir à l'urbanisation des zones centrales qui ont été ou sont encore des terrains militaires peu ou non utilisés. Il s'agit d'exemples de terrains qu'on appelle *brownfields* dans la littérature anglo-saxonne, et qui constituent un vivier important de développement urbain (comme les emprises ferroviaires, les industries désaffectées et les échangeurs routiers).

La zone du quartier de casernes des Chaprais (Brun, Joffre et Lyautey) est située dans la commune de Besançon, à l'Ouest de la boucle du Doubs. Il s'agit d'une zone de près de 3 km² dont un tiers environ est occupé par une caserne (base de défense du 19^e RG), et la moitié environ est bien desservie (i.e. à moins de 500 m) par le tramway. La zone possède une densité de population intermédiaire (environ 3000 habitants par km²) et une population amenée à croître fortement dans le cas du scénario RUC (taux de croissance annuel moyen de 2,6% entre 2010 et 2030 contre 0,2% dans le scénario laissez-faire) (Figure 2.13).

Les modes d'habiter sont très contrastés entre les deux scénarios, avec pour le logement 56% d'immeubles pour les nouvelles constructions dans le scénario BAU et 98% d'immeubles pour les nouvelles constructions dans le scénario RUC, et du point de vue spatial avec une forte croissance des logements attendus sur zone dans le scénario RUC (environ 5 fois plus de nouvelles constructions), répartis davantage dans les zones de caserne nouvellement ouvertes à l'urbanisation, et moins dans les zones facilement accessible en tramway (Figure 2.14).

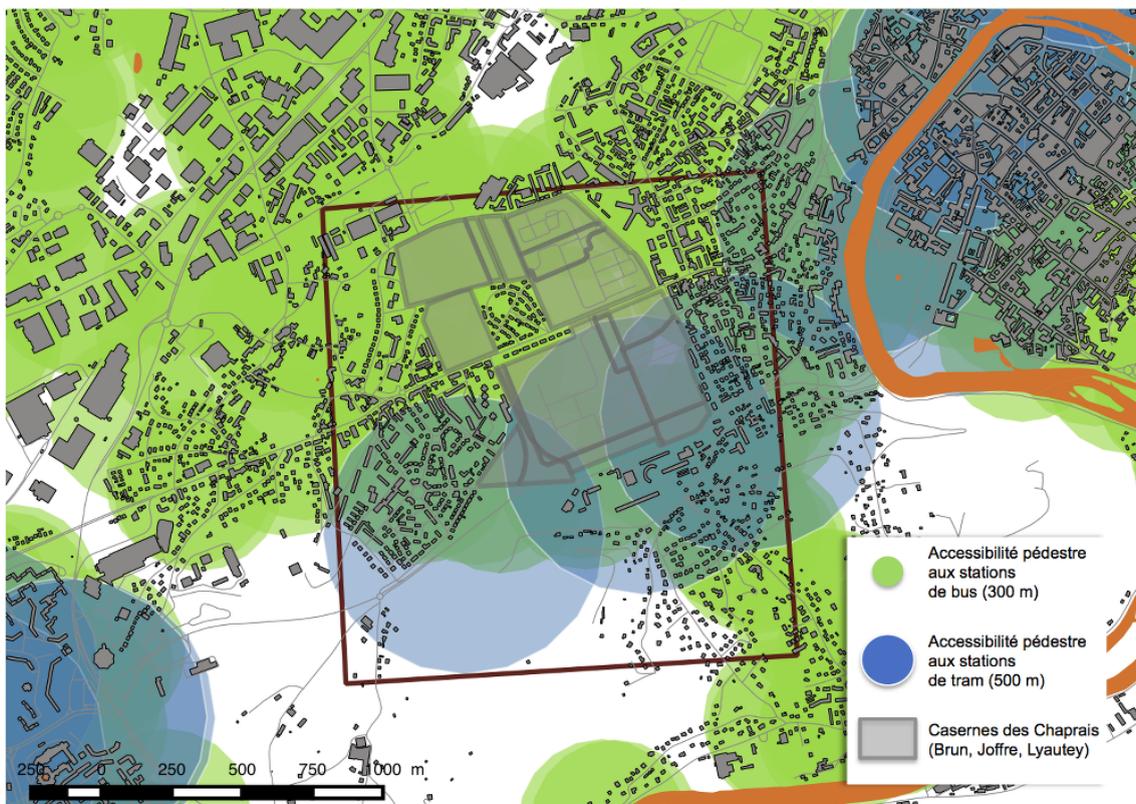


Figure 2.13 – Zoom sur la zone de casernes des Chaprais.

2.3.2.2. A Lyon

Dans le cas lyonnais, sur les 6500 nouveaux logements créés en moyenne chaque année, 13% d'entre eux sont construits sur Lyon et Villeurbanne, 56% dans le reste du Grand Lyon et les 31% restants sont en périphérie.

2.3.4 Implémentation *Fractal oriented development* (FOD)

Le scénario *Fractal oriented development* (FOD) est le plus complexe à mettre en œuvre par son originalité conceptuelle. Fractalopolis© été utilisé pour développer des scénarios

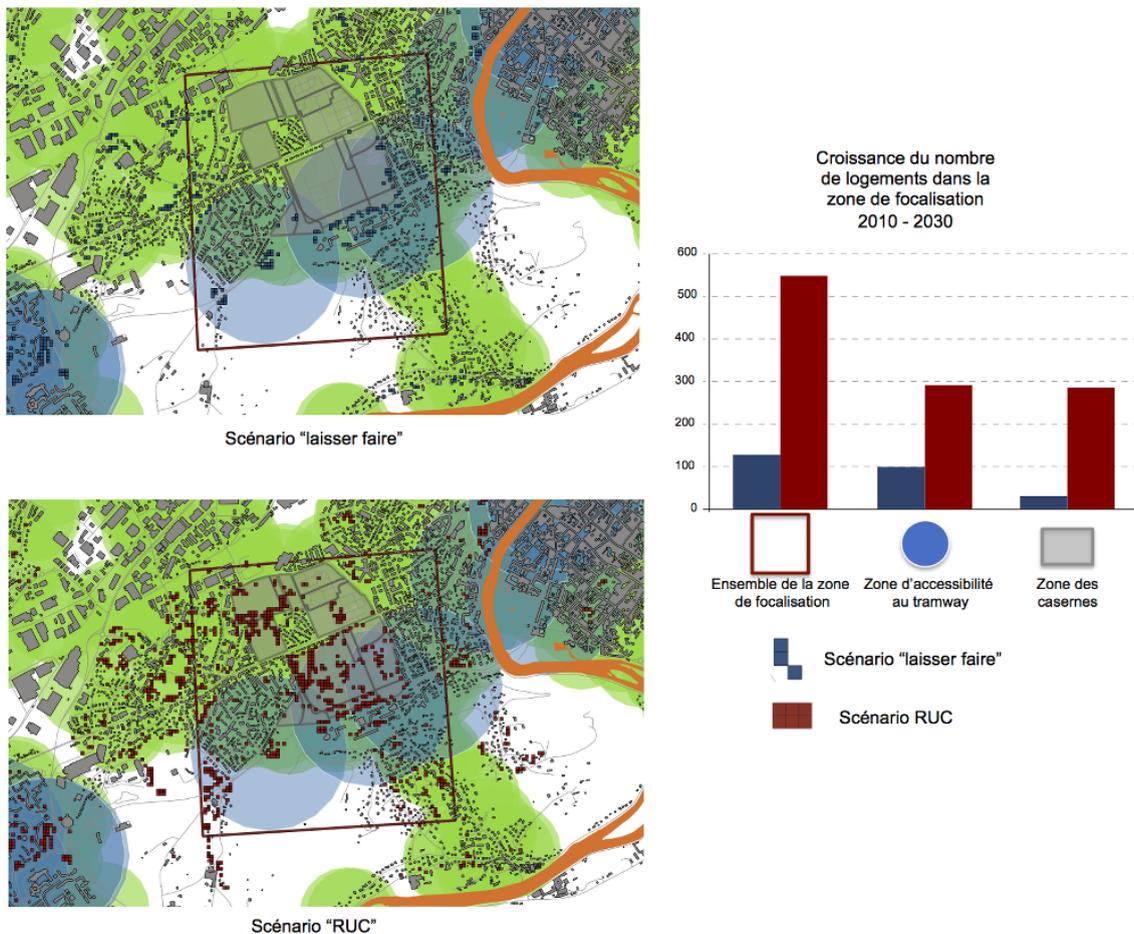


Figure 2.14 – Croissance résidentielle à Besançon de 2010 à 2030 : une comparaison des scénarios LF et RUC.

d'aménagement du type FOD. Ainsi les zones carrées d'urbanisation futures ont été définies en choisissant leur position manuellement. Cette étape a suffi pour définir les zones urbanisables pour le scénario FOD du Grand Lyon car l'évaluation des impacts sur la mobilité quotidienne a été réalisée en utilisant le simulateur Simbad© (cf. encart au § 2.3.4.2). En revanche pour Besançon, le recours à MobiSim© a nécessité une désagrégation plus importante. Comme contrainte, le nombre de logements à construire est connu : il correspond aux prévisions de l'INSEE, comme c'est également le cas pour les autres types de scénarios. Le logiciel dispose, pour chaque zone de Fractalopolis©, du nombre de logements existants. Connaissant le volume total de logements à construire selon les prévisions de l'INSEE, le modèle affecte à chaque zone à développer un nombre de logements à construire. Pour chacune de ces zones, le nombre de logements existant est identifié à l'aide d'un SIG. Respectant les facteurs de distribution de Fractalopolis©, on détermine alors le nombre de logements manquants ou en sur-nombre pour chaque zone. Dans le contexte donné, nous avons choisi de respecter le nombre de logements existants même s'il excède les préconisations du modèle. Ainsi, le nombre de logements à construire dans les zones à développer a été réajusté en tenant compte de cet existant.

2.3.4.1. A Besançon

La mise en œuvre du concept d'aménagement FOD pour la Communauté d'Agglomération du Grand Besançon repose sur l'introduction (i) d'un nouveau PLU-fractal, (ii) la mise en service d'un tram-train et (iii) la création de commerces et services de fréquence de recours quotidienne à proximité des haltes ferroviaires, qui permet de faire évoluer partiellement l'offre commerciale en zone périurbaine. Dans le cas bisontin, une intermodalité vélo-train a également été activée et testée pour cette simulation avec MobiSim©, alors qu'elle ne l'est pas pour les deux autres scénarios (LF et RUC).

1. Construction du PLU-fractal

Comme pour les autres scénarios, le nombre de logements construits annuellement est de 850 sur le Grand Besançon. Dans le cas de Mobisim à Besançon, la proportion de logements individuels et collectifs est la même que pour le scénario LF, soit respectivement de 0,35 et 0,65. La taille des logements créés dans le cadre du scénario FOD est également identique à celle du LF (cf. p. 54).

A l'échelle de la région urbaine, un modèle multifractal développé à partir du modèle Fractalopolis© a été appliqué; il permet de définir les zones urbanisables et l'intensité du développement résidentiel au sein de chaque zone. Le générateur choisi est composé d'un carré principal, centré sur l'agglomération morphologique, et de 5 carrés de plus petite taille, positionnés lors de l'étape 1 sur les axes ferroviaires desservant chaque agglomération. Le modèle de population est appliqué à l'étape d'itération 3 et la confrontation avec les effectifs de population actuels au sein de chaque carré constructible permet d'identifier les zones pour lesquelles le modèle théorique préconise une dédensification ou au contraire une densification (cf. p. 41 et suivantes). Le bilan des logements dans les centres et les sous-centres est illustré par la Figures ?? pour Besançon. Outre la dimension démographique, le modèle permet d'assurer à la fois une proportion d'espaces non constructibles à toutes les échelles et le respect de trames vertes et bleues existantes.

A l'échelle locale, la forme du tissu générée à partir de MUP-City© est définie par le choix d'une dimension fractale de 1,77, qui correspond à une densité bâtie locale relativement élevée mais cependant cohérente avec le concept d'aménagement TOD proposé par P. Calthorpe (1992). Contrairement au scénario LF (dans lequel toutes les règles ont la même importance), l'importance respective des règles d'aménagement est ici différenciée (cf. Tableau 2.2) : une importance maximale est attribuée à l'accessibilité au réseau de transport collectif tandis que la proximité aux commerces et services de fréquentation quotidienne est un peu moins importante. La proximité au réseau routier, aux espaces ouverts et aux commerces et services de fréquentation hebdomadaire est moindre. La moyenne arithmétique sur les règles est l'opérateur d'agrégation ensuite appliqué.

2. Création d'un réseau de tram-trains

Pour l'agglomération de Besançon, le réseau tram-train a été créé sur la base du réseau TER existant et introduit dans la simulation en 2015. Une nouvelle simulation MUP-City© est alors réalisée et les résultats qui en sont issus sont introduits pour

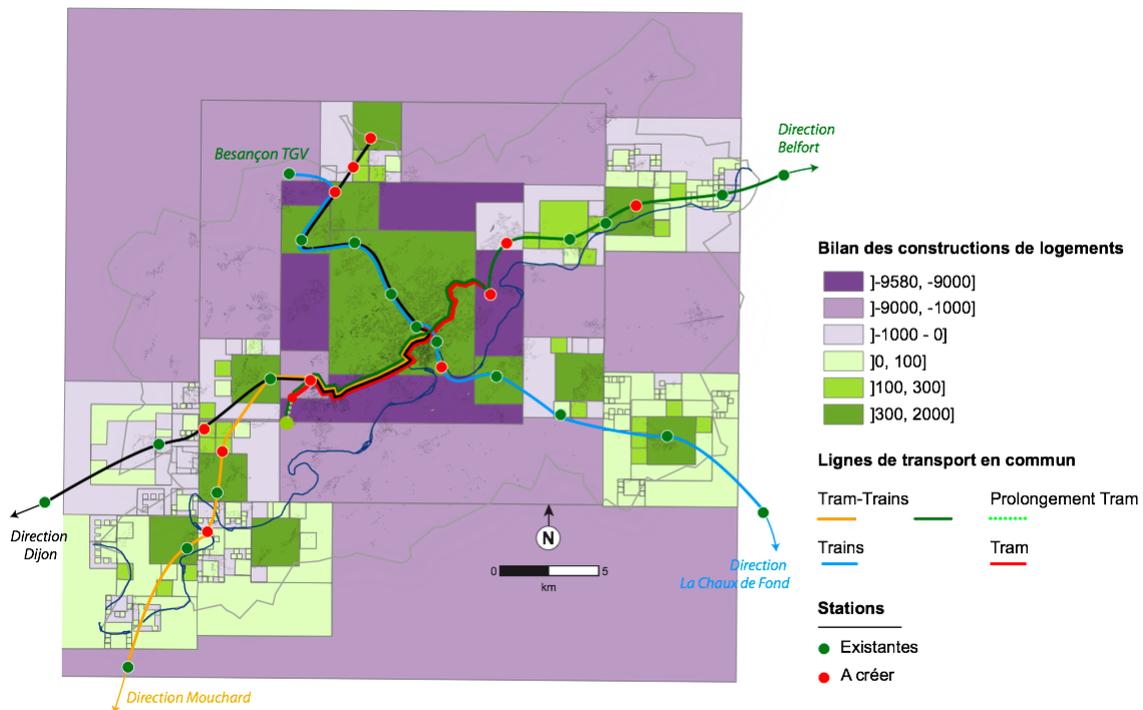


Figure 2.15 – Scénario FOD à Besançon : extension du réseau de transports et localisation des logements à construire

la même année dans MobiSim©. Douze nouvelles haltes ferroviaires sont ajoutées au réseau, et la fréquence de passage des tram-trains est augmentée de manière à améliorer la desserte ferroviaire de la zone d'étude. Le cadencement est de deux trains par heure (un toutes les demi-heures) pendant les périodes d'affluence. L'offre est ainsi considérée comme suffisante puisqu'elle permet aux agents simulés dans MobiSim© d'adapter certaines activités de leur planning, comme en témoignent les résultats des simulations. Les périodes d'affluence sont celles où se concentrent les déplacements (départs et retours aux heures de pointe) pour les motifs suivants : emplois, études, fréquentation des commerces et des services (EMD, 2005). Ces motifs de déplacement sont retenus car ils constituent la majeure partie des déplacements, et se regroupent sur des plages horaires similaires. Plus précisément, les plages horaires d'affluence sont définies entre 6h00 et 10h00 (avec une intensité maximale vers 8h00)

	Intitulé de la règle	Importance
1	Préservation du contact entre bâti et non bâti tout en minimisant la fragmentation des espaces non bâtis	0.411
2	Bonne accessibilité aux commerces et services de fréquentation quotidienne	1.053
3	Bonne accessibilité aux commerces et services de fréquentation quotidienne	0.460
4	Proximité au réseau routier existant	0.201
5	Bonne accessibilité au réseau de transport collectif	2.876

Table 2.2

– Valeur d'importance des règles d'aménagement *Fractal oriented development*

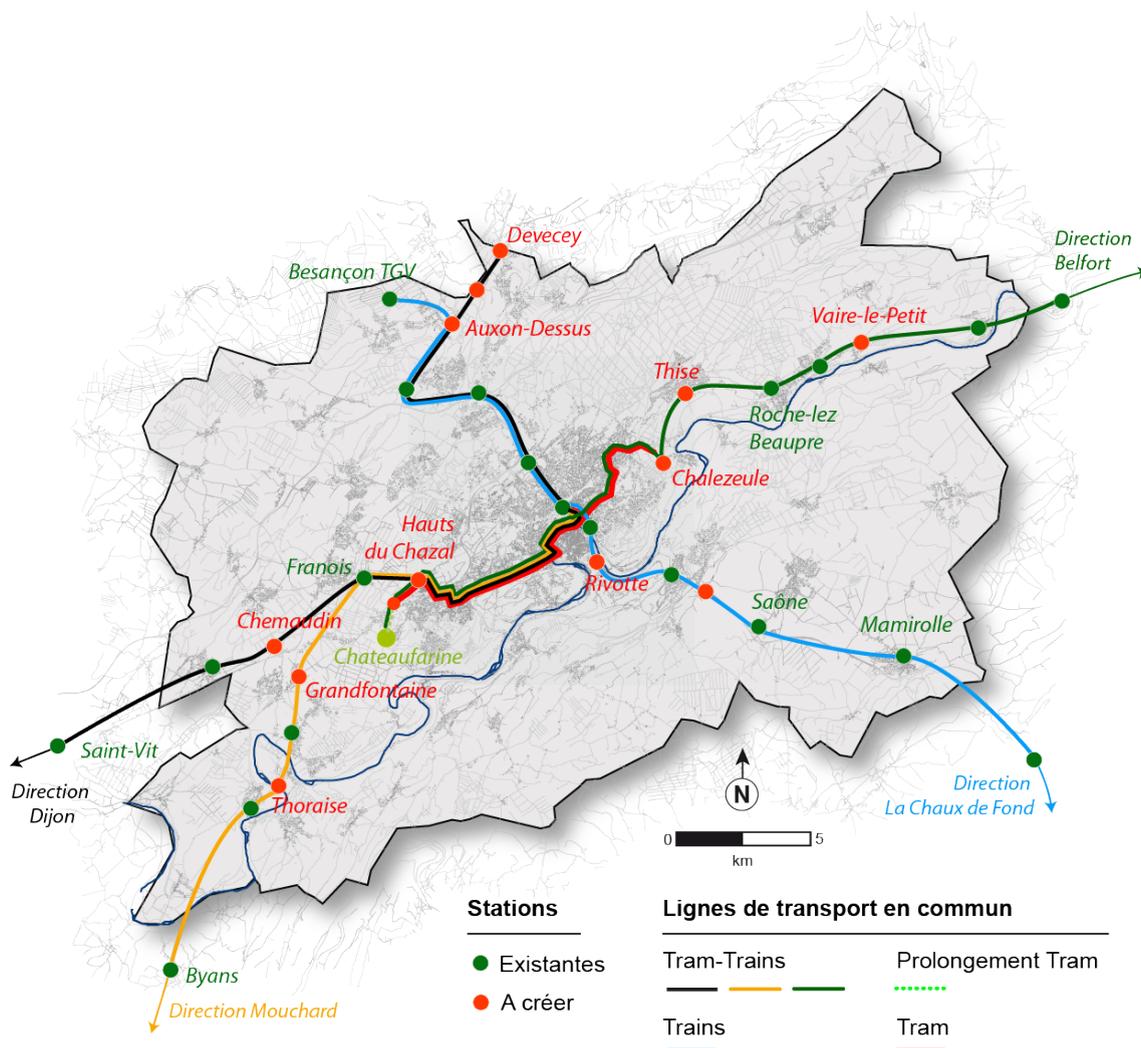


Figure 2.16 – Evolution du réseau de transport bisontin dans le cadre du *Fractal oriented development*

pour les trajets périphérie → centre et entre 16h30 et 20h00 pour les trajets centre → périphérie.

Sur le plan du réseau de lignes ferroviaires, l'ensemble des TER en provenance de Dijon, Lons-le-Saunier, et Belfort empruntent la ligne de tram plutôt que la voie ferrée. Les lignes Devecey-gare Viotte et La-Chaux-de-Fonds-gare Viotte conservent leur itinéraire ferroviaire et ont donc la gare Viotte (gare principale) comme terminus. Enfin, la ligne de Tram est prolongée jusqu'à la zone commerciale Chateaufarine, important générateur de déplacement situé à l'entrée Ouest de l'agglomération et non loin de l'actuel terminus de la ligne de tram.

3. Création de commerces et services de fréquentation quotidienne

La création de nouveaux commerces et services de fréquentation quotidienne est basée sur la méthode de calcul des aires de chalandises potentielles. Hors ville-centre, le nombre moyen d'agents par logement est de 2,37 en 2030 (valeur très proche du nombre d'individus par logement issu du recensement INSEE de 2010, calculé sur

ces mêmes communes). Sur cette base, le nombre de clients potentiels de chaque cellule Fractalopolis© a pu être calculé, en multipliant ce nombre moyen d'agents par logement par le nombre total de logements (individuels et collectifs) à construire d'ici 2030 dans chaque cellule. En superposant les couches des commerces et services de fréquentation quotidienne existants et la couche Fractalopolis© dotée d'un nouveau champ « clients potentiels », il est ensuite possible de choisir l'emplacement des nouveaux commerces en tenant compte à la fois de l'offre existante et du besoin théorique de création de nouveaux commerces dans les sous-centres de niveau 011 et 101 (cf. p. 41 et suivantes). Dans la mesure du possible, les nouveaux commerces sont créés à proximité des haltes ferroviaires pour favoriser l'optimisation des chaînes de déplacement des habitants et offrir des équipements de proximité à ceux qui s'implanteront dans les logements nouvellement construits. Au final, quinze nouveaux commerces ont été créés dont 8 boulangeries, 4 supérettes et 3 tabac-presses. Pour des raisons techniques, la structure commerciale ainsi modifiée est prise en compte dès le début de la simulation, et non à partir de 2015 comme c'est le cas pour le réseau tram-train.

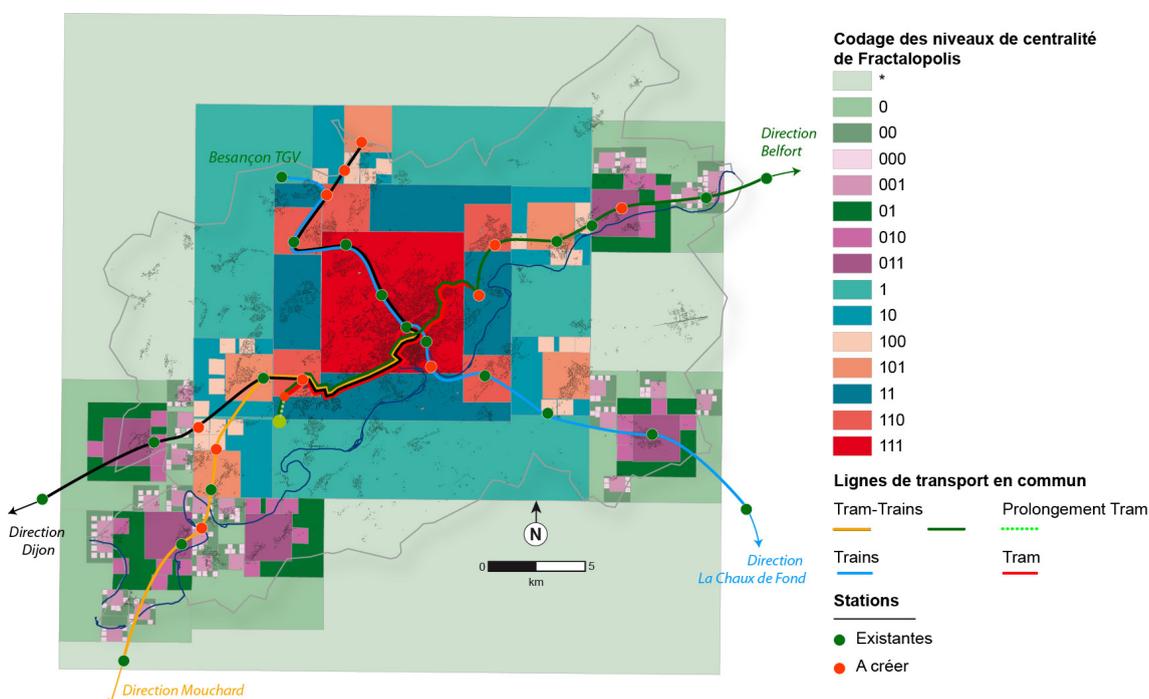


Figure 2.17 – Zone de focus pour le scénario FOD sur l'agglomération de Besançon

Focus sur Grandfontaine et Montferrand-le-Chateau

Un focus sur l'un des centres tertiaire (code 101) du carré principal Fractalopolis© (Figure 2.17) permet d'illustrer l'implémentation du scénario FOD sur le territoire de la CAGB. Ce sous-centre est positionné sur les villages de Grandfontaine et Montferrand-le-Château tous deux dotés d'une halte ferroviaire. Il compte aujourd'hui 393 logements et le modèle Fractalopolis© préconise la construction de 498 nouveaux logements à

horizon 2030, dont 15% de maisons individuelles et 85% de logements collectifs. En conséquence, le nombre de nouvelles parcelles à construire est de 74 pour les maisons individuelles et 45 pour les immeubles collectifs. Cette croissance résidentielle sera telle qu'un potentiel suffisant de nouveaux clients devrait conduire à la création d'un nouveau commerce à proximité de la halte de Grandfontaine.

Jusqu'en 2010, le développement résidentiel s'est effectué de façon très excentrée par rapport aux haltes ferroviaires (Figure 2.18, à gauche). La simulation MUP-City© montre qu'un potentiel de développement résidentiel existe pourtant à proximité de ces haltes. La prise en compte des zones inconstructibles lors de la simulation permet de tenir compte du fait qu'aucune croissance urbaine ne pourra cependant se faire à l'ouest de la halte de Montferrand-le-Château.

Les simulations Fractopolis© et Mupcity© constituent deux *inputs* de MobiSim© qui va transcrire ces résultats sous la forme de construction de nouvelles cellules/parcelles à chaque année de simulation. La Figure 2.18 (à droite) illustre la manière dont s'effectue la construction des 119 nouvelles cellules/parcelles à créer : les cellules les mieux évaluées par MUP-City© sont urbanisées pendant les premières années dans la proximité immédiate des haltes ferroviaires et, sur la fin de la période de simulation, le développement résidentiel se fait essentiellement dans la périphérie des quartiers de la gare.

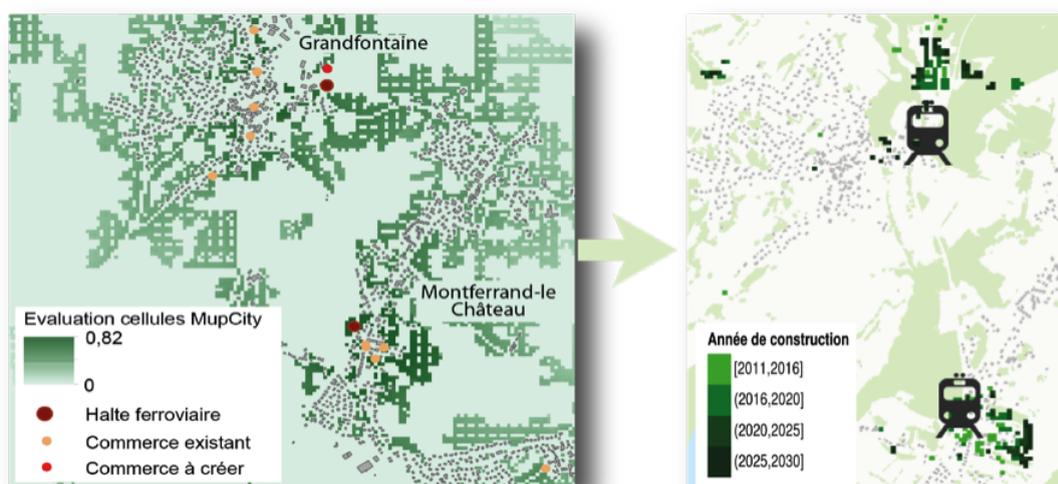


Figure 2.18

– Lien entre simulation MUP-City© et simulation du développement résidentiel MobiSim© : à gauche, la simulation MUP-City© qui sert d'*input* à MobiSim© ; à droite, le développement résidentiel 2011-2030 (simulation MobiSim).

2.3.4.2. A Lyon

Tout comme à Besançon, la mise en œuvre du scénario *Fractal oriented development* sur Lyon repose sur la mise en œuvre d'un nouveau PLU fractal avec une urbanisation à proximité des gares existantes ou créées dans le cadre de ce scénario. L'offre ferroviaire existante

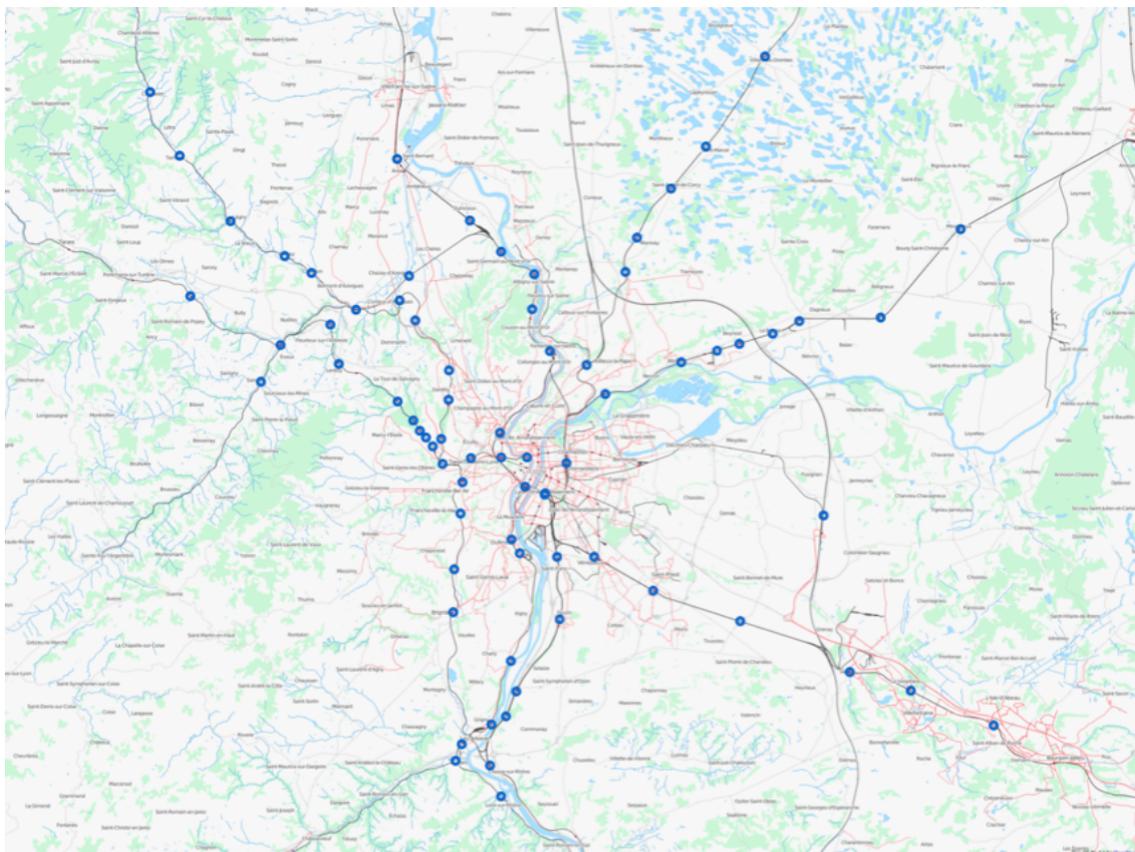


Figure 2.19 – Evolution du réseau de transport ferroviaire lyonnais dans le cadre du scénario *Fractal oriented development*

est par ailleurs enrichie par le remplacement des TER par des tram-trains circulant de 5 heures à minuit 30 avec une fréquence de deux tram-trains par heure en période creuse et quatre tram-trains en heure de pointe (Figure 2.19). Sur les 6500 nouveaux logements créés chaque année, ce scénario conduit à en localiser 8% sur Lyon et Villeurbanne, 72% dans le reste du Grand Lyon et les 19% restants en périphérie.

Focus sur Lyon dans la plaine de l'Ain

La résolution spatiale des scénarios est plus agrégée sur l'aire urbaine de Lyon que sur l'agglomération de Besançon car l'unité géographique de base avec laquelle travaille SIMBAD correspond à l'IRIS (Îlots Regroupés pour l'Information Statistique). Or, compte tenu de la définition retenue par l'INSEE, liée notamment à un nombre minimal de population résidente¹⁹, la taille de ces zones est très variable allant de quelques dizaines d'hectares dans le centre-ville dense jusqu'à 4 000 hectares pour la commune de Saint Martin en Haut dans les Monts du Lyonnais (Figure 2.20).

Cette différence de représentation et d'échelle entre SIMBAD et MOBISIM n'a cependant pas posé de problème opérationnel pour les simulations et le dialogue entre les modèles. En effet, les données de la BD Carto (IGN) de l'aire urbaine de Lyon ont été utilisées en entrée des outils Fractalopolis et MUP City, permettant de tra-

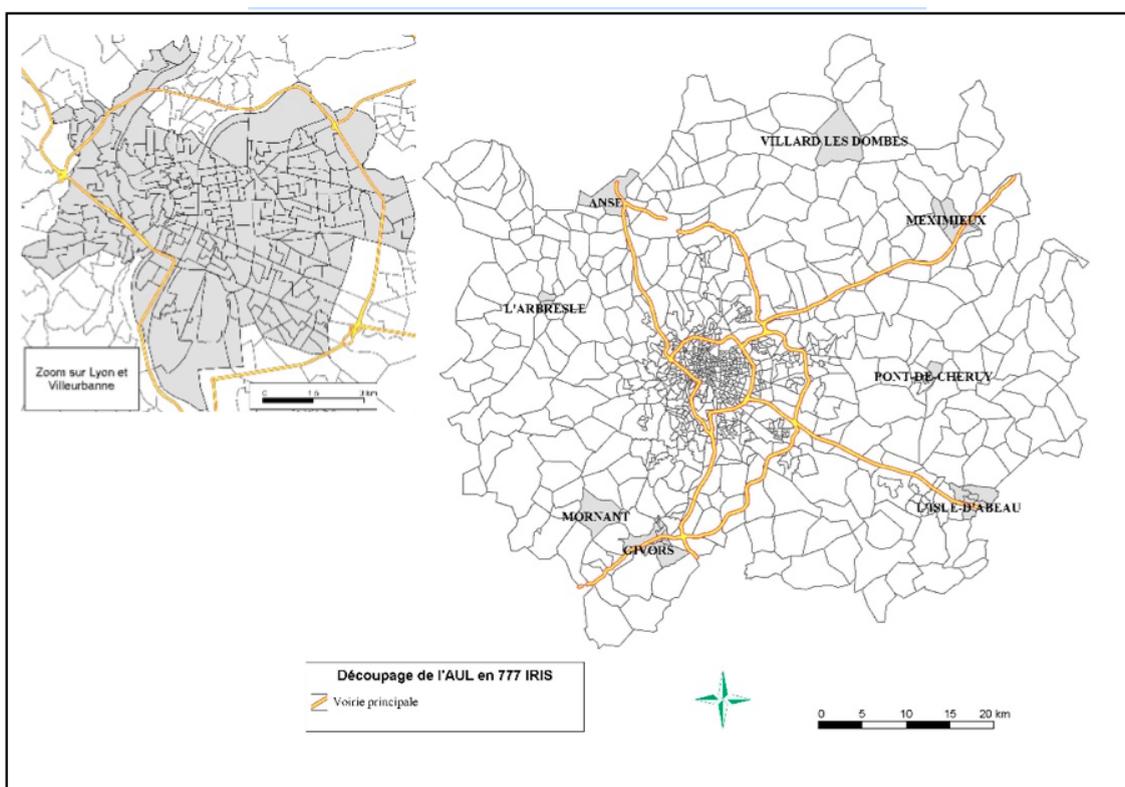


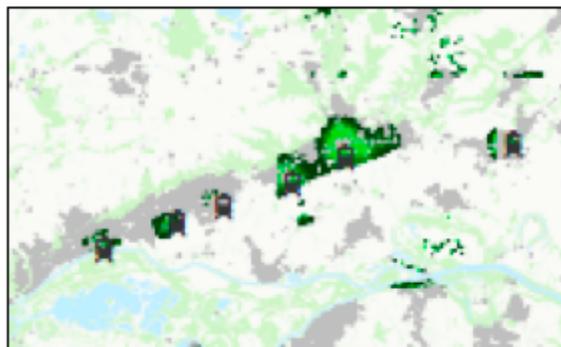
Figure 2.20 – Les 777 IRIS de l'aire urbaine de Lyon en 1999

vailler au niveau de finesse qui leur était nécessaire pour réaliser les trois scénarios de développement urbain, Laisser-Faire, RUC et FOD.

Les résultats obtenus ont ensuite été agrégés pour fournir des nombres de logements par IRIS et par an qui ont été injectés en entrée de SIMBAD. Ils ont pu être utilisés pour l'estimation de la localisation des différents types de ménages (en fonction de l'âge de la personne de référence, de la taille du ménage, du nombre d'actifs, de son revenu, etc.), servant de base, ensuite, à la génération des mobilités et des trafics, puis des accessibilités.

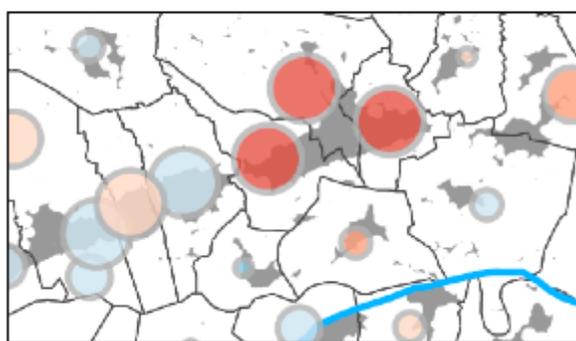
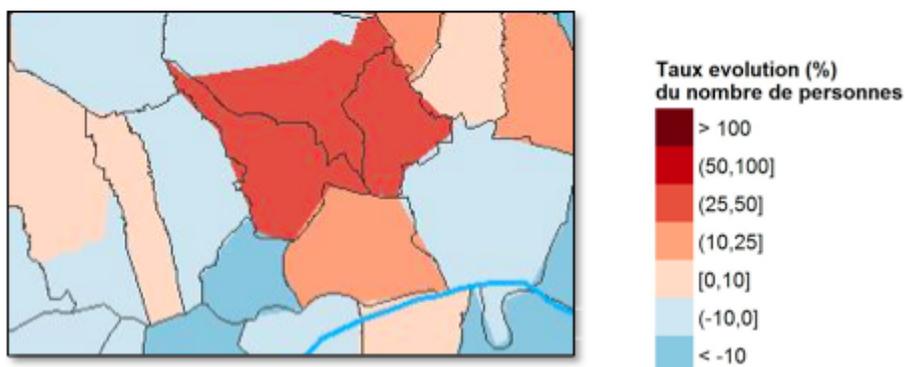
Dans le travail sur l'aire urbaine de Lyon, l'espace apparaît ainsi homogénéisé à l'intérieur de chaque IRIS. Notons cependant que les centroïdes des IRIS, qui servent de points de référence pour calculer les distances parcourues et les accessibilités, ont été déterminés en fonction de la tache urbaine. Ceci permet de mieux prendre en compte les polarisations démographiques du territoire notamment dans l'espace périurbain, comme le montrent les Figures 2.20 et 2.21, illustrant le cas du scénario Fractal Oriented Development appliqué à la plaine de l'Ain au Nord-Est de Lyon.

Développement urbain défini au niveau du bâtiment par MUP City



Le dégradé de vert indique le développement urbain à différentes périodes de la simulation

Croissance de la population au sein des IRIS de la Plaine de l'Ain, entre 2010 et 2030, Scénario FOD



Rq : dans cette seconde représentation, les cercles sont centrés sur les centroïdes des IRIS et leur taille est proportionnelle à la population de 2010

Figure 2.21 –

Développement urbain et croissance résidentielle dans la plaine de l'Ain à Lyon

Conclusion

Dans l'objectif de contribuer à la définition de la durabilité urbaine, et à partir de principes d'urbanisme relativement simples *a priori* (étalement urbain, ville compacte, *Fractal oriented development*), le projet VILMODEs tente d'évaluer des scénarios possibles pour l'urbanisation de deux agglomérations (Besançon et Lyon) ; cette évaluation se fonde sur un certain nombre d'outils communs, qui viennent alimenter deux modèles LUTI spécifiques (MobiSim© et Simbad©). Comme le lecteur l'aura compris, cet exercice n'est pas simple car il nécessite l'appropriation de l'ensemble des concepts mobilisés, tant du point

de vue des scénarios et de leurs conséquences thématiques que de celui de leur déclinaison dans des modèles définis par un code informatique. Le périmètre de cette déclinaison n'est donc pas laissé uniquement au libre choix du modélisateur : il doit s'adapter aux dispositifs techniques liés au fonctionnement des modèles, afin de produire les simulations prospectives escomptées d'un point de vue pratique.

De surcroît, cette déclinaison des scénarios dans les modèles demande de dépasser la simple formulation conceptuelle des principe d'aménagement du territoire envisagés, et requiert leur définition concrète dans l'ensemble des champs et des implications, souvent interconnectés, qu'ils mettent en œuvre. Cette « mise en concret » se heurte à une double difficulté :

1. un « cahier des charges » très précis quant à leur déploiement dans l'espace et le temps réels : la définition des zones de développement résidentiel, comme celui de nouvelles lignes de transport en commun est requise à l'échelle métrique ; elle s'accompagne d'une modification des horaires, qui influence elle-même le planning d'activité des habitants, etc.
2. une adaptation nécessaire aux terrains étudiés, dont l'histoire, la géographie, la taille et le contexte politique n'autorise pas toujours de traduire de la même manière des principes généraux pourtant identiques au départ : la forme urbaine et le système de transport de Lyon n'étant pas celui de Besançon, les notions de compacité et de développement fractal s'adaptent différemment.

Cette « mise en concret » n'est pas le fruit de l'imagination des chercheurs qui construisent les scénarios : elle se fonde sur une connaissance fine du terrain, elle-même appuyée sur les enquêtes, les études et les rapports produits par les collectivités territoriales ou les services de l'Etat en charge de ces domaines et de ces territoires. Leur exploitation détaillée permet en quelque sorte de « faire rentrer les scénarios dans les cases » que constituent les paramètres des modèles, même si cet exercice nécessite des prises de positions très précises qui s'avèrent toujours délicates dans le cadre d'une anticipation prospective. Ainsi, si l'adéquation scénario/modèle n'est pas immédiate, il convient de s'adapter à ce dernier pour que les principes des scénarios y soient correctement implémentés.

Il en découle une description parfois difficile des paramètres et des processus intégrés dans les simulations : les auteurs de ce rapport sont tout à fait conscients que ce chapitre reste imparfait d'un point de vue descriptif. Leur choix a été de ne pas rentrer plus avant dans les détails afin de ne pas trop l'allonger, et ils restent à la disposition du lecteur pour toute question complémentaire concernant la déclinaison concrète des scénarios ou le fonctionnement des modèles utilisés²⁰. Ce chapitre aura ainsi montré que l'exercice de scénarisation préalable à la simulation informatique n'est pas une mince affaire et que les modèles informatiques ne peuvent se réduire à une boîte à outils « clique boutons » : leur utilisation relève d'une approche descriptive et d'une prise de position qualitative qui complète les aspects quantitatifs induits par la modélisation en elle-même. Dans ce contexte, les modèles permettent de faire face à la complexité des processus qu'ils prennent en compte et de les poursuivre sur le temps long, jusqu'à produire des résultats à moyen terme. C'est à la pertinence de ces résultats qu'est consacré le chapitre suivant.

20. Sur ce dernier point, nous rappelons que la majorité des références sont données dans la bibliographie, dont il est indispensable de s'approprier la méthodologie pour interpréter correctement les processus mis en œuvre dans chacun des modèles retenus.

Chapitre 3

Evaluation et résultats

LES enjeux de la ville durable ont été évoqués dans le Chapitre 1 : étalement urbain, ségrégation, consommation énergétique et émissions de gaz à effet de serre, cadre de vie, etc., en sont les éléments les plus visibles. Dans le cadre du projet VILMODes, les indicateurs permettant de quantifier ces enjeux sont partie liés aux problématiques du transport et de la mobilité (coûts et nuisances, pollution, congestion, etc.). C'est dans le cadre de cette interaction ville-mobilité que nous détaillons dans ce chapitre les indicateurs du projet, afin d'éclairer les principaux enjeux qu'ils soulèvent. Pour ce faire, il est nécessaire de se doter d'indicateurs qui fournissent à la fois un cadre cohérent et explicité pour analyser les résultats obtenus et qui soient également calculables par la chaîne de modèles utilisée. De manière toute aussi importante, il est nécessaire que les indicateurs révèlent des évolutions ou des comportements simulés, et ne soient pas surdéterminés par le paramétrage. Une simulation qui diminuerait l'usage de la voiture en modifiant les préférences des agents, par exemple, serait nécessairement bien évaluée du point de vue des consommations de pétrole, mais cette modification des préférences des agents empêcherait toute comparaison à d'autres scénarios.

Rappelons que nous avons mis au point et simulé deux familles de scénarios mettant en œuvre des politiques d'urbanisme très contrastées : d'une part, le retour à la ville compacte dense, prôné par les politiques, mais sujet de controverse quant à ses effets négatifs, et d'autre part l'approche du « nouvel urbanisme » (*New Urbanism*) développée par P. Calthorpe (1992), qui combine polycentrisme et occupation du sol fractale (donc coexistence de différents niveaux de densité et accès à la nature) pour former une ville ouverte autour d'une armature de transports en commun. De même, même si l'objet privilégié d'observation dans le cadre du projet VILMODes présente en lui-même d'importants enjeux de développement durable, sa mise en scène dans un système d'indicateurs ne peut se faire sans précaution. Idéalement, ce dernier devrait fournir des éléments de contexte restituant le système de déplacements observé par rapport aux autres activités humaines, et ce dans les trois dimensions économique, environnementale et sociale. A défaut, les conclusions tirées des résultats obtenus devront rester dans le cadre de représentation que nous nous sommes donné.

3.1 Critères de choix des indicateurs

3.1.1 Exploiter les simulations

L'objectif du projet VILMODes n'est naturellement pas d'attribuer des notes à ces scénarios, et encore moins de les classer. Il s'agit plutôt d'évaluer, avec le plus grand niveau de détail possible, si :

- les territoires répondent bien aux politiques simulées. Comme nous l'avons souligné, les scénarios VILMODes ne se définissent pas par des modifications du paramétrage des simulations (comportement des agents, etc.), mais par l'utilisation des outils classiques de politique urbaine : plan local d'urbanisme, projet de transport. Par exemple, il ne suffit pas de définir un PLU visant le polycentrisme pour rééquilibrer une agglomération, il faut encore que les promoteurs construisent là où on le souhaite, et qu'ensuite des ménages s'y installent ;
- les politiques simulées sont valides dans la durée ; par exemple, une politique de densification du centre peut se heurter à un niveau maximal de population, pour lequel les réseaux de transport arrivent à saturation ;
- les politiques parviennent à mettre l'agglomération sur la trajectoire du facteur quatre, en contenant, voire diminuant, la consommation globale d'énergie fossile et les émissions de gaz à effet de serre ;
- les attentes des habitants sont correctement satisfaites.

Cet ensemble de questions nous pousse à décomposer notre approche de l'évaluation en quatre grandes familles de questions, pour lesquelles nous avons mis au point un nombre limité d'indicateurs, de façon à limiter les difficultés à caractériser un scénario. Les questions retenues sont :

1. l'évolution de l'occupation du sol ; où et comment la ville continue-t-elle de croître, par étalement et consommation de terres agricoles, par densification en remplissant les espaces vides, ou encore par modification du tissu urbain existant ;
2. la localisation de la population, à la fois par rapport aux nouveaux logements construits, mais également dans sa composition en termes de densité ;
3. le fonctionnement de l'agglomération, à travers l'observation des mobilités en termes de parts modales, de distances parcourues, de temps de parcours, etc. ;
4. et enfin l'analyse de l'impact social du développement urbain simulé, notamment en matière d'inégalités socio-spatiales, ou de coût pour les ménages.

Nous résumons ces quatre questions en trois familles de critères. La première s'intéresse à la question des localisations, tant des logements que des ménages et des emplois, la deuxième s'intéresse aux mobilités comme révélateurs du fonctionnement urbain, et la troisième aux pratiques et relations sociales, abordée sous l'angle des inégalités et des coûts pour les ménages.

3.1.2 Une vision couplée des interactions ville-mobilités

Résultant d'un besoin de vie sociale et des avantages économiques de la proximité, la ville est le fruit d'un processus d'agglomération qui a été et qui est toujours largement étudié

en économie régionale et urbaine. Il n'est pas dans notre objectif ici de faire un détour par cette littérature (cf. par exemple Huriot et Bourdeau-Lepage, 2009), mais plutôt de fournir un cadre de représentation sur la manière dont cette tendance à l'agglomération (et les compétitions spatiales qu'elle produit) se structure sur un territoire, en lien avec les flux et les trafics que tout à la fois elle génère, évite et perturbe. Ici, nous essayons de construire progressivement cette vision, en nous positionnant par rapport à l'intuition économique qui explique la ville comme la conséquence de **l'arbitrage des ménages entre leurs coûts de localisation et leurs coûts de mobilité quotidienne**, dont une première formulation des liens entre urbanisme et transports peut être empruntée à la Nouvelle Economie Urbaine (Alonso, 1964 ; Muth, 1969 ; Mills, 1972), elle-même inspirée par les travaux de Von Thünen au 19^e siècle sur la localisation des activités agricoles autour d'un centre urbain¹.

Bien que les principes de raisonnement élaborés dans le cadre du projet VILMODes fassent appel à des éléments clé explicatifs de la dynamique urbaine (cf. par exemple Pouyanne, 2004 ou Baum-Snow, 2007), on sait par ailleurs que les modèles de la Nouvelle Economie Urbaine peine à reproduire la forme des villes européennes, avec un centre-ville riche et des pauvres relégués en banlieue et au-delà, même si le recours à des aménités permet d'améliorer les résultats de cette famille de modèles (Brueckner *et al.*, 1999). Des études empiriques montrent que, contrairement aux hypothèses de ces modèles, les ménages prennent peu en compte la localisation de leur propre emploi dans leurs stratégies de localisation (Frankhauser et Ansel, 2012). Notons d'ailleurs que les modèles LUTI utilisés dans VILMODes intègrent une diversité importante de facteurs dans les choix de localisation des ménages, et s'écartent ainsi du strict modèle monocentrique. Il apparaît donc pertinent d'introduire un cadre de réflexion plus vaste qui rende mieux compte de la complexité du jeu d'acteurs au sein du territoire. Ainsi, nous proposons d'envisager la ville à travers l'approche proposée par Bonnafous et Puel (1983) de trois sous-systèmes en interaction :

1. **le sous-système des localisations** renvoie aux différents usages du sol et à la localisation des entreprises et des ménages dans l'espace urbain ;
2. **le sous-système des déplacements** est constitué d'une part des flux de personnes et de marchandises et d'autre part des réseaux de transport qui permettent physiquement l'expression de cette mobilité ;
3. **le sous-système des pratiques et relations sociales**, dans lequel s'inscrivent les activités de la vie quotidienne, est lié au mode de fonctionnement de la société.

Ces trois sous-systèmes peuvent être distingués car ils recouvrent des objets de nature et aux logiques différentes, et ne renvoient pas à des représentations homogènes de la ville. Par exemple, les visions et les objectifs peuvent être très différents entre un urbaniste, un gestionnaire d'offre de transport et un responsable de chambre de commerce. Par contre, ils n'ont de sens que les uns par rapport aux autres, ce sont leurs interactions qui font la ville.

1. Le modèle de Von Thünen original considère un centre polarisant les emplois et les activités, fixés de manière exogène, et il permet de s'interroger sur la manière dont des ménages identiques et disposant d'un même système de préférences se répartissent dans l'espace urbain sous double contrainte, d'un côté, des coûts du logement qui sont très forts à proximité du centre du fait de la compétition pour y accéder et être proche des emplois, puis qui diminuent progressivement et, de l'autre, des coûts de transport qui, au contraire, augmentent avec l'éloignement. On obtient alors un équilibre de répartition de la population, avec une densité décroissant avec la distance au centre selon un gradient qui dépendra des pentes relatives des coûts du logement et de transport.

Le sous-système des localisations est sans doute le plus visible, puisqu'il est associé à une infrastructure (le bâti), et mesuré par le recensement (les populations). Cependant, ces localisations ne sont pas indépendantes du fonctionnement de l'agglomération : elles sont conditionnées par les **performances des réseaux de transport** et l'utilité relative de chaque activité pour les ménages et les établissements. Comme le souligne M. Wiel (1999), **l'accessibilité d'un lieu**, définie comme le potentiel d'accès aux différentes opportunités du territoire urbain à partir de ce lieu (intégrant donc les sous-systèmes de localisation et des déplacements), devient une variable déterminante dans ce schéma. Chaque acteur essaye de se localiser en un lieu dont l'accessibilité lui convient, en considérant les différentes fonctions urbaines qui l'intéressent (il s'agit bien d'une accessibilité à quelque chose, propre aux préférences de chacun et prenant donc en compte le dernier sous-système, des « pratiques et relations sociales ») et de ses contraintes financières croisées au coût de l'immobilier dans la zone.

L'ajustement des choix individuels (des différents types de ménages et des différents types d'entreprises) va se traduire sur le sous-système des localisations, mais également jouer en retour sur le sous-système des déplacements en provoquant éventuellement des points de congestion et des investissements publics pour les prévenir ou les réduire. Enfin, en modifiant les proximités entre les différents acteurs, ce mouvement joue également en retour sur le sous-système des pratiques et relations sociales.

Nous pouvons donc proposer un schéma général de la ville comme processus résultant d'une recherche d'optimisation des opportunités d'interactions sous contraintes spatiales et temporelles des différents acteurs en présence. En l'absence de politique d'urbanisme forte, on observe les mécanismes à l'œuvre dans notre scénario de laisser-faire (LF) de référence. Ce scénario, qui se déploie spontanément depuis l'émergence de l'automobile dans les années 1950, a été bien décrit par M. Wiel (1999, 2010) par exemple. La **facilitation de la mobilité** induite par la voiture a modifié l'équilibre entre coût de la mobilité et coût du logement. Les ménages qui cherchaient plus d'espace ou simplement de l'espace moins cher ont pu aller plus loin en périphérie, soulageant d'autant, par ailleurs, la pression immobilière dans les espaces centraux. Ce mouvement contient cependant d'autres mécanismes dont les avantages sont moins évidents :

- D'une part, il conduit à une **ségrégation plus forte et plus visible**. Par la préférence pour l'entre soi, les ménages les plus aisés peuvent investir certaines zones au sein desquelles les prix immobiliers vont fortement augmenter, excluant automatiquement les autres populations : on retrouve ici les mécanismes décrits par la Nouvelle Economie Urbaine lorsqu'elle considère des niveaux de revenus différenciés dans son modèle. A côté du choix privilégié des plus aisés, les ménages ayant un revenu moyen cherchant à accéder à la propriété peuvent trouver de quoi satisfaire leur désir en allant s'installer en périphérie, tandis que les plus modestes restent relégués dans des quartiers que les autres fuient (Bouzouina, 2008). D'autres mécanismes renforcent ce processus de « ville à trois vitesses » (Donzelot, 2004) qui tend à séparer les ménages aisés, modestes et les autres. Notamment, les communes de première couronne ont mis en place des PLU qui limitent fortement leur développement immobilier pour satisfaire leurs ménages électeurs, déjà installés et cherchant tout à la fois à préserver leur environnement et à valoriser leur patrimoine (Charmes, 2007).
- D'autre part, les activités économiques se redéployent sur ce « grand terrain de Monopoly » (Mangin, 2004) dont les contraintes se relâchent, chacune en fonction de ses spécificités. L'industrie, la logistique peuvent profiter de l'accès facilité à des espaces peu

chers et s'installer en périphérie, de préférence à proximité des grands axes de transport. Les services aux particuliers suivent l'étalement résidentiel. Les commerces, qui tenaient auparavant à rester également au plus près des ménages, peuvent par contre se concentrer en pôles, notamment en première couronne, profitant ainsi d'une convergence de facteurs favorables tels que des coûts réduits du foncier, des économies d'échelles et un élargissement de la gamme de produits offerts, tout en disposant de **zones de chalandises élargies** du fait de l'augmentation des vitesses de déplacement (Polèse, 1994 ; Merenne-Schoumacker, 1998).

3.1.3 Vers un système d'indicateurs

Toute cette réflexion sur le système d'indicateurs à utiliser repose ainsi sur quelques grandes idées qui peuvent être développées en déclinant l'objectif premier qui structure nos travaux, à savoir replacer l'évaluation des politiques publiques dans le cadre du développement durable pour rendre compte des enjeux liés aux mobilités urbaines, même si, les contours d'un tel exercice méritent d'être clairement tracés. En terme d'éclairage sur les politiques publiques, l'utilisation de modèles LUTI dans VILMODes permet d'apporter des éléments de réponse sur :

- la question de l'influence du transport dans les politiques urbaines (le projet de transport, rocade ou transports de communs, reste un outil d'aménagement urbain très usité) ;
- les effets de la coordination entre politique de transport et politique d'usage du sol ;
- la possibilité et la durabilité de la mise en œuvre des politiques d'usage du sol très restrictives, comme l'interdiction totale ou quasi totale de construire en dehors des périmètres des agglomérations denses ;
- la possibilité d'utiliser des systèmes de contraintes et d'incitations, avec pour nos scénarios des contraintes sur l'usage du sol et des incitations avec l'offre de transport.

Si l'on prend l'ensemble des éléments qui viennent d'être évoqués, les grands principes qui cadrent nos travaux fournissent une première image, forcément ouverte, des indicateurs que nous proposons pour le projet VILMODes. Tout d'abord, les indicateurs doivent, dans leur ensemble, apporter un éclairage sur les trois dimensions (économique, sociale et environnementale) du développement durable pour l'agglomération et sa périphérie (le périmètre des aires urbaines semble le plus approprié dans ce débat). Situés dans le cadre de l'évaluation des politiques publiques, ils fournissent un bilan des avantages et des inconvénients des différents scénarios testés. Le sous-système des déplacements est privilégié dans le choix des indicateurs liés à ce modèle, puisque ce sont ses impacts qui sont évalués. Cependant, ce sous-système ne peut être saisi dans sa dynamique et ses évolutions à long terme qu'à travers ses interactions avec les deux autres sous-systèmes (Wegener and Fürst, 1999). Pour compléter la notion de déplacement, qui correspond à une mobilité réalisée, on introduit classiquement l'accessibilité, qui correspond à la facilité d'effectuer des déplacements. L'accessibilité caractérise le service rendu par un système de déplacements dans une configuration spatiale et sociale donnée (voir par exemple, Masson, 2000, ou Geurs and Van Eck, 2001). Abordée d'une manière ou d'une autre, l'amélioration de l'accessibilité constitue un des objectifs prioritaires de la plupart des politiques de transport mais elle reste complexe à caractériser puisqu'elle mêle des aspects liés à l'espace, au temps, à la localisation des activités, aux systèmes de transport et aux pratiques sociales. Les indicateurs retenus peuvent être déclinés suivant les différentes dimensions du développement

durable :

- **l’accessibilité économique** peut se traduire par l’efficacité d’ensemble du système des déplacements sur l’aire urbaine. Nous proposons de mesurer cette accessibilité par la durée moyenne nécessaire pour réaliser différents déplacements au sein de l’aire d’étude : durée d’un déplacement domicile-travail (accessibilité à l’emploi), durée d’un déplacement d’achat ou de loisirs (accessibilité aux activités quotidiennes), durée moyenne d’un déplacement de transports de marchandises (accessibilité pour les activités économiques). L’accessibilité prend donc en compte la diversité des aménités auxquelles il est possible d’accéder, ainsi que la performance du réseau de transport, en termes de vitesse notamment :
- **la dimension sociale** de l’accessibilité peut se mesurer selon le même principe, mais en observant les différences entre sous-groupes de population, distingués en fonction de leur localisation dans l’agglomération (centre, couronnes, espace périurbain) ou de leur revenu.
- **les impacts environnementaux** peuvent être tout d’abord scindés entre enjeux globaux et locaux, avec une extrême diversité à l’intérieur de ces derniers. Les pollutions atmosphériques locales, les nuisances sonores, les pollutions du sol et des eaux, les effets de coupure et l’occupation de l’espace, pour ne citer que quelques exemples, demandent chacun des réflexions spécifiques si l’on veut les représenter. Dans le cadre du projet, nous avons retenus comme indicateurs les niveaux d’émissions de CO₂ ainsi que les consommations de carburant.
- **la question de l’équité** peut se traduire ici par une différenciation des ménages et de leur pratique de mobilité, et nous avons principalement cherché à établir quels sont les individus les plus contraints d’une part et quels sont les plus fragilisés économiquement. Cela nous a conduit à proposer de mesurer les budgets temps et le nombre de déplacements par personne et par jour en fonction du revenu et de la localisation de leur ménage d’appartenance.

A côté de ces indicateurs mettant en balance services rendus et coûts induits du système de déplacements, toute la partie précédente souligne combien il est important de restituer les résultats obtenus par rapport au contexte global. Ainsi, en amont de ces indicateurs directement liés au système de déplacement, quelques indicateurs synthétiques doivent permettre de caractériser le contexte général dans lequel ils ont été calculés. Ceci concerne d’une part les hypothèses générales d’évolution de la société (évolutions démographique et économique notamment) et d’autre part les grandes résultantes du modèle concernant l’interface entre transports et urbanisme (localisation des activités et de la population, indicateurs globaux de mobilité), rien n’empêchant, à terme, de développer cette famille d’indicateurs pour bien insister sur les interactions entre le développement urbain, les localisations des acteurs et le système de déplacements, telles qu’elles ont été exprimées dans la partie précédente.

3.2 Les indicateurs retenus

Le projet VILMODes est empreint d’une intention d’accompagner la réflexion des politiques publiques et d’aider à la décision dans ce domaine. Ainsi, les indicateurs produits et testés dans le cadre du projet ambitionnent de contribuer aux débats en matière de po-

litiques de transports et/ou d'urbanisme à mettre en œuvre. Ce cadre d'évaluation donne une première direction au système d'indicateurs qui, même si c'est de manière simple, devra chercher à fournir un bilan des avantages et inconvénients du système de déplacements et des processus d'urbanisation observés. Compte tenu de la puissance et de la précision des modèles utilisés, notamment quand ils fonctionnent à une échelle complètement désagrégée, cette intention générale atteint toutefois rapidement la limite de la représentation des indicateurs souhaités : la combinatoire étant forte, tout ne peut pas être représenté pour chaque date de simulation et à chaque échelle pour toutes les catégories d'individus.

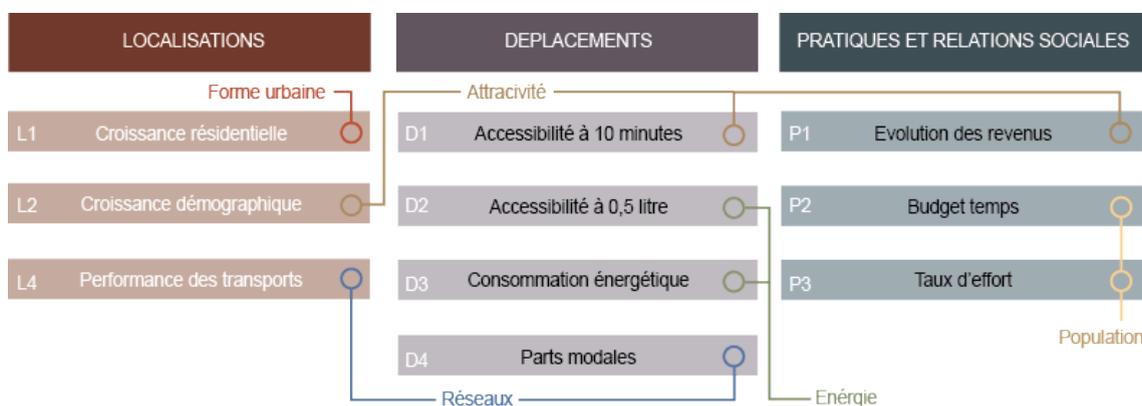


Figure 3.1 – Les 10 indicateurs retenus dans VILMODes

En résulte un certain nombre de choix liminaires qui visent concrètement à limiter la force d'*inertie* propre aux espaces étudiés, à sélectionner une *échelle* cohérente pour la cartographie et l'interprétation des résultats à Lyon et à Besançon, et à choisir un mode de *représentation* suffisamment complet pour informer concrètement sur les avantages et les inconvénients de chaque scénarios, mais suffisamment réduit pour ne pas multiplier les cartes et les graphiques et les rendre illisibles :

- **Inertie et échelle.** Pour gommer l'inertie liée à des simulations prospectives sur une période de 20 ans (2010-2030) pour des villes (Lyon et Besançon) dont l'âge dépasse 2000 ans, les indicateurs ne peuvent pas se contenter de moyennes globales au niveau des deux agglomérations étudiées. Ils sont donc présentés selon deux modalités :
 - un premier calcul est établi à un niveau spatial fin, qui permet de visualiser les zones où les estimations des modèles ont été sensibles aux hypothèses des scénarios. De manière à rendre comparable les résultats produits à Lyon et à Besançon, ils sont systématiquement présentés à l'échelle de l'IRIS. Cette échelle constitue la base des sorties de Simbad©, mais nécessite une réaggrégation des résultats individuels produits par MobiSim©. Afin de tenir compte de la densité bâtie de chaque IRIS, ces données ne sont toutefois pas représentées directement dans les IRIS, mais dans la forme urbaine correspondant à l'espace bâti à l'intérieur des IRIS. A Besançon comme à Lyon cette forme urbaine est produite par une opération de dilation (*buffer*) de 130 mètres autour des bâtiments, comme l'illustre la Carte 3.3.
 - un tableau agrégé en quelques grandes zones permet de rendre compte de la manière dont les variations microlocales se traduisent à un niveau plus macro de l'agglomération (inertie plus forte).
- **Représentation.** Pour saisir correctement l'impact de chacun des scénarios testés sans

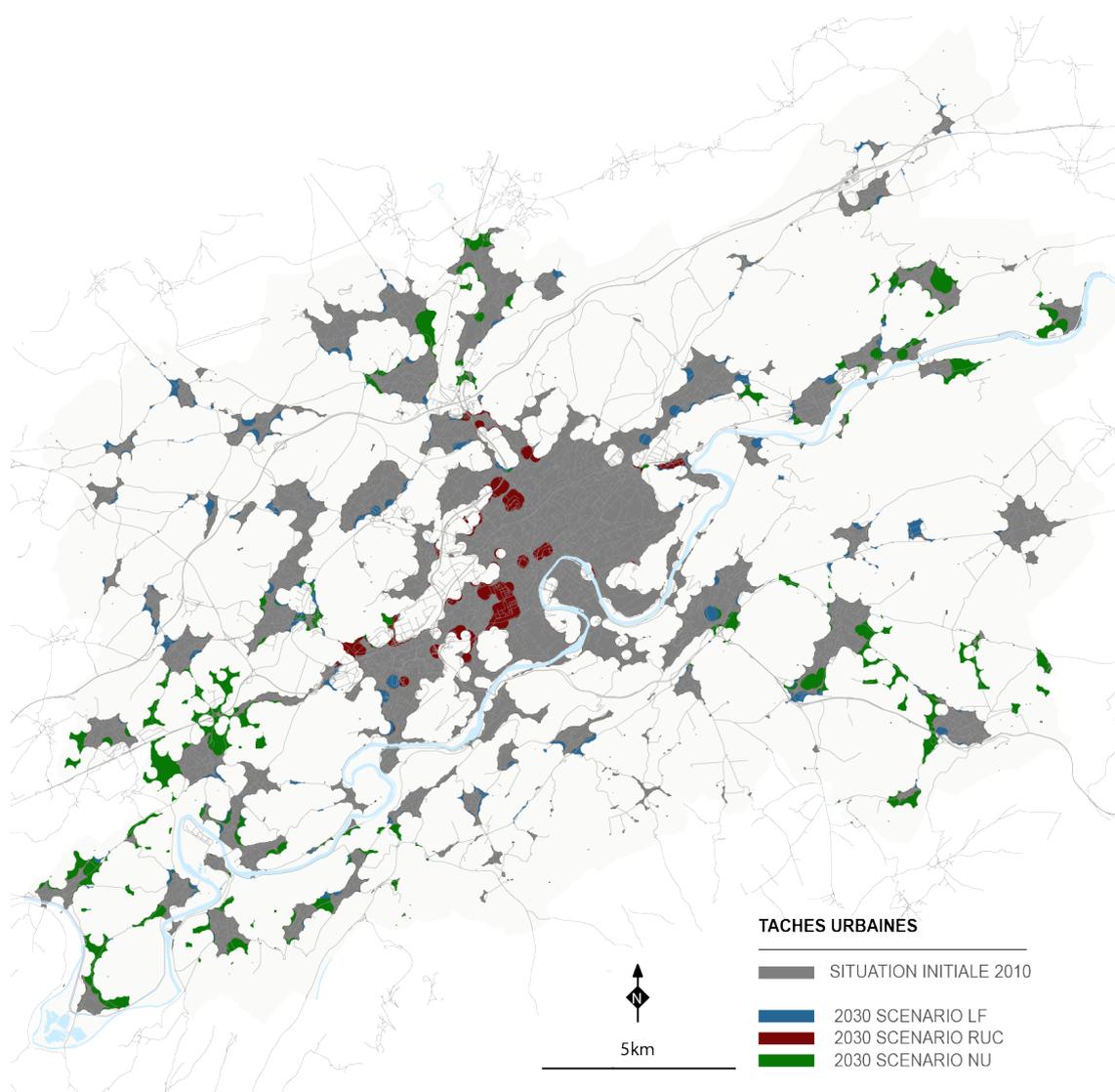


Figure 3.2 – Taches urbaines pour la représentation des indicateurs à Besançon

multiplier inutilement le nombre de cartes, de graphiques et de tableaux produits, les résultats sont présentés sous la forme suivante :

1. Pour le scénario LF, qui constitue le scénario de référence :
 - Situation en 2010 (carte IRIS et résumé agrégé en grandes zones)
 - Situation en 2030 (carte IRIS et résumé agrégé en grandes zones)
 - Différence 2010-2030 (carte IRIS et résumé agrégé en grandes zones (différence en %))
 - Evolution 2010-2030 (graphique à partir des évolutions grandes zones)
2. Pour le FOD et le RUC, qui constituent les scénarios dont l'impact est à évaluer par rapport à la référence :
 - Différence avec LF (carte IRIS et tableau Grandes zones)
 - Evolution par rapport au LF (graphique à partir des évolutions grandes zones)

Cette forme de présentation permet de limiter les résultats fournis en valeur absolue et de centrer l'interprétation sur les valeurs relatives qui distinguent le LF du FOD et du

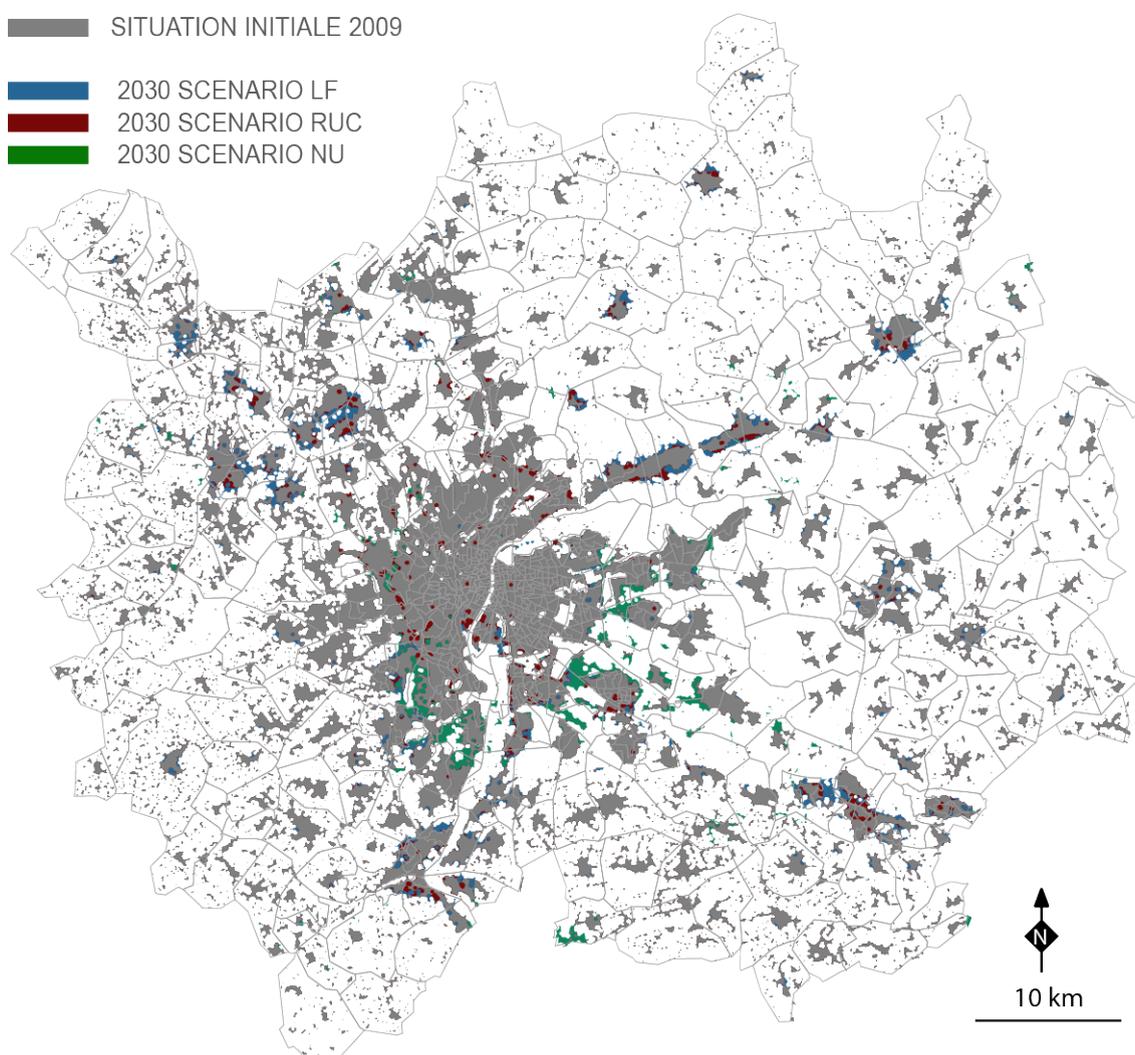
TACHES URBAINES

Figure 3.3 – Taches urbaines pour la représentation des indicateurs à Lyon

RUC, dans l'objectif de proposer des comparaisons différentielles qui minimisent les erreurs inhérentes à la structure et au calibrage des modèles utilisés. Cette manière de présenter les résultats est reproduite pour chacun des sous-systèmes des localisations, des déplacements et des pratiques et relations sociales.

3.2.1 Sous-système « Localisations »

Le sous-système des localisations est évalué par l'intermédiaire de trois indicateurs complémentaires relativement simple : la croissance résidentielle indiquant l'évolution de la tache urbaine, la croissance démographique qui montre comment les densités s'y répartissent et la performance des réseaux qui montre dans quelles conditions les espaces les plus centraux sont correctement reliés avec les espaces les plus périphériques.

3.2.1.1. Croissance résidentielle

L'indicateur de croissance résidentielle se présente sous la forme d'une carte de l'occupation du sol telle qu'elle est prévue par chacun des scénarios simulés. Elle indique en particulier la tâche urbaine résultante, en différenciant les bâtiments existant avant la simulation, puis les bâtiments construits lors de la simulation (ces bâtiments apparaissent dans des couleurs différentes pour chaque période de 5 ans). Comme le montre la Figure 3.4, cette carte intègre une représentation des trames vertes (forêt) et bleues (cours d'eau) présentes sur le terrain d'étude. Elle s'accompagne d'un tableau de chiffres indiquant le nombre d'hectares et de logements construits.

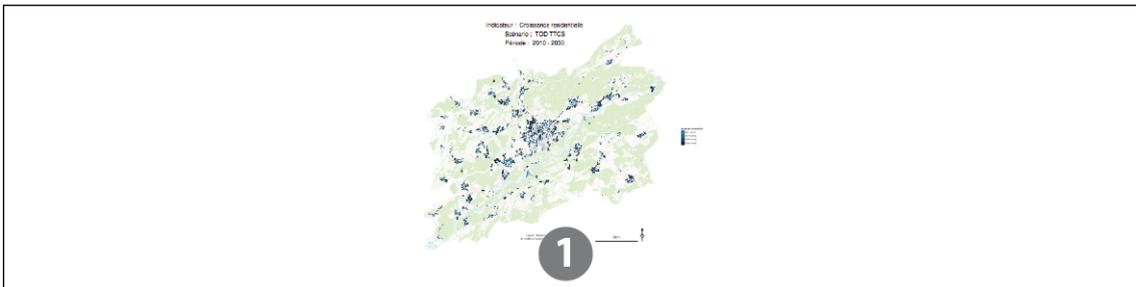


Figure 3.4 – Indicateur : Croissance résidentielle

3.2.1.2. Croissance démographique

Cet indicateur présente la croissance démographique de chaque IRIS telle qu'elle est prévue dans chaque scénario. Le nombre d'habitants est ici représenté par un cercle de taille proportionnelle par IRIS. Comme l'indique la Figure 3.5, quatre documents permettent d'appréhender la croissance démographique dans sa totalité : une carte de la population en 2010 (cas 1), une carte de la population en 2030 (cas 2), un graphique montrant l'évolution démographique entre 2010 et 2030 (cas 3), et une carte présentant l'évolution sous la forme d'un différentiel entre les deux dates, exprimée sous la forme d'un taux discrétisé dans des catégories d'intervalles égaux (cas 4).

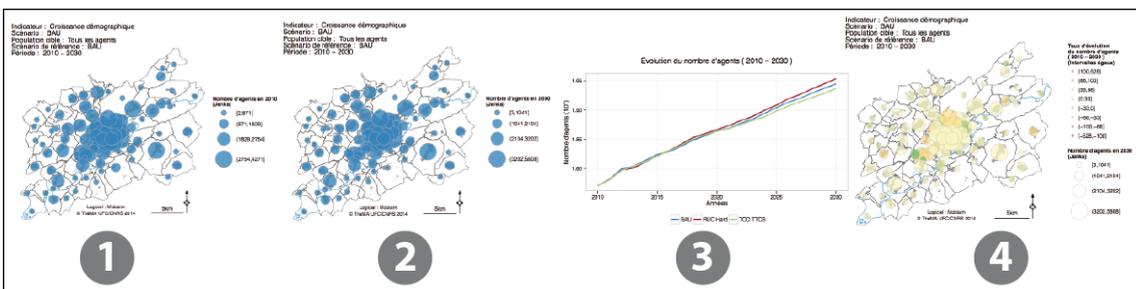


Figure 3.5 – Indicateur : Croissance démographique

3.2.1.3. Performance des réseaux

Cette indicateur fait la différence entre l'automobile individuelle et les autres modes de transport (hors bicyclette) quant à leur performance en termes de temps de transport pour rejoindre un point central de l'agglomération (en l'occurrence la gare de la Viotte à Besançon et la gare de la Part-Dieu à Lyon). Ces temps de transport sont calculées à partir des modèles de trafic intégrés dans les modèles LUTI ou à partir des tables horaires du transport en commun ; ils sont ensuite pondérés par la densité de population de chaque IRIS. L'heure de départ le matin est fixé à 8h00, ce qui permet de simuler la situation d'un habitant qui partirait travailler en début de journée. Ce faisant, l'indicateur mesure indirectement l'effet de la congestion sur les temps de transport.

Concrètement, cet indicateur se compose de trois cartes (Figure 3.6) : la différence entre le temps de l'automobile et des autres modes (sous le forme de temps gagné en minutes, représenté sous la forme de classes d'aga intervalle) en 2010 (cas 1) et en 2030 (cas 2), et une carte comparative de ces deux situations, exprimée en taux d'évolution discrétisés de la même manière (cas 3).

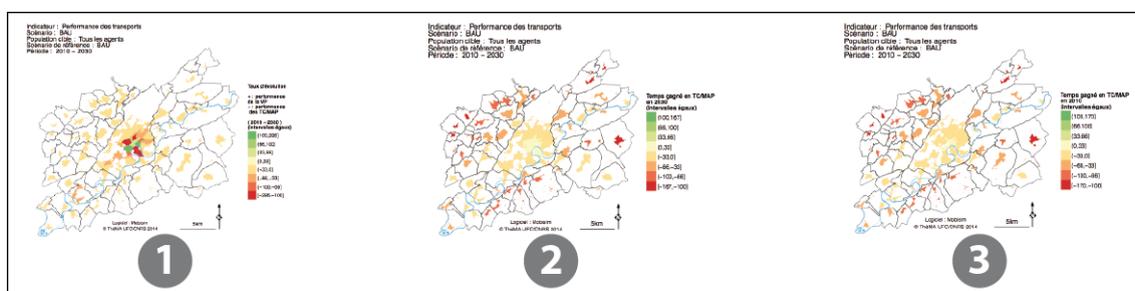


Figure 3.6 – Indicateur : Performance des réseaux

3.2.2 Sous-système « Déplacements »

Le sous-système « Déplacements » est évalué par quatre indicateurs complémentaires. Les deux premiers témoignent de l'accessibilité permise par les réseaux de transport dans chacun des trois scénarios. Le troisième, plus environnemental, tente d'évaluer les consommations énergétiques qui en découlent. Le quatrième fait référence au comportement et aux programmes d'activité des usagers afin de quantifier la répartition modale des différents moyens de transport.

3.2.2.1. Accessibilité à 10 minutes

Cet indicateur présente une carte par IRIS indiquant le nombre moyen de personnes accessibles en 10 minutes par transport en commun ou en mode doux en heure de pointe, ainsi qu'un tableau synthétique fournissant ce nombre moyen par grande zone, à partir d'une moyenne du nombre de personnes accessibles en 20' de chaque IRIS pondéré par sa population.

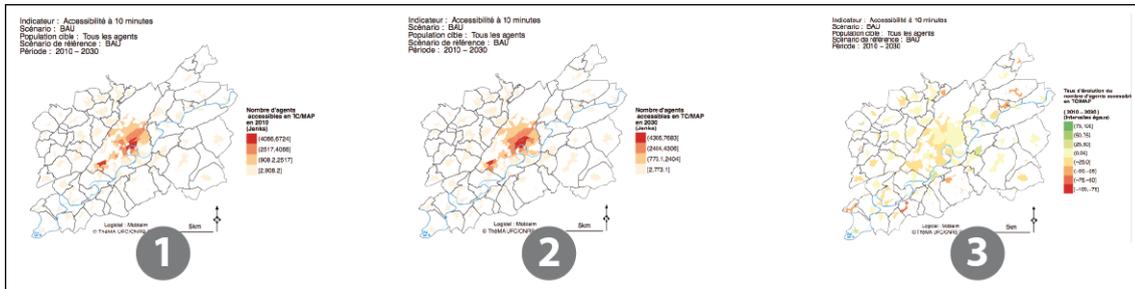


Figure 3.7 – Indicateur : Accessibilité à 10 minutes

3.2.2.2. Accessibilité à 0,5 litre

Carte indiquant le nombre moyen d’emplois accessibles en VP pour les habitants de chaque IRIS, avec 0,5 litre de carburant en heure de pointe du matin. Pour affiner les résultats, des consommations complémentaires (1 et 2 litres) sont également représentées Tableau synthétique fournissant cette accessibilité moyenne par grandes zones, à partir d’une moyenne du nombre d’emplois accessibles avec x litres de chaque IRIS pondéré par sa population.

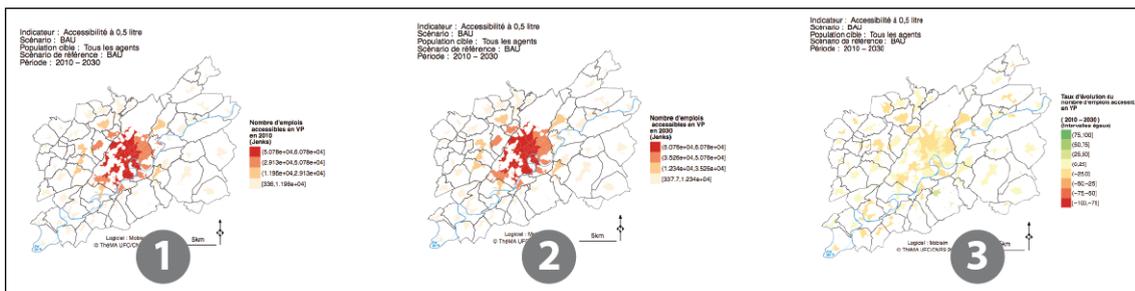


Figure 3.8 – Indicateur : Accessibilité à 0,5 litres

3.2.2.3. Consommation énergétique

L’indicateur des consommations énergétiques est généré à partir des résultats obtenus par la modélisation des distances des déplacements effectuées par les individus. Ces déplacements ne concernent que l’automobile individuelle, dont l’impact environnemental est particulièrement décrié dans le contexte de la ville durable. Les distances parcourues en automobile sont ici simplement multipliés par une constante : le consommation moyenne de carburant d’une voiture à essence standard du parc automobile français, soit 7 l/km. Compte tenu de la construction de cet indicateur, il peut également être utile de l’interpréter en termes d’émissions de gaz à effet de serre, en évaluant le nombre de grammes de GED émis par le même type de véhicule. Cette évaluation restant très approximative, elle vaut essentiellement pour la comparaison de deux périodes. Ainsi, comme l’indique la Figure 3.9, l’indicateur se compose d’une carte des distances quotidiennes parcourues en automobile en 2010 (cas 1) et 2030 (cas 2), discrétisées selon la méthode de Jenks et Coulson, d’un graphique montrant l’évolution sur l’ensemble de la période 2010-2030 (cas 3), et d’une carte d’évolution indiquant le taux d’évolution de la distance parcourue entre les deux dates en pourcentages, discrétisés selon des intervalles égaux (cas 4).

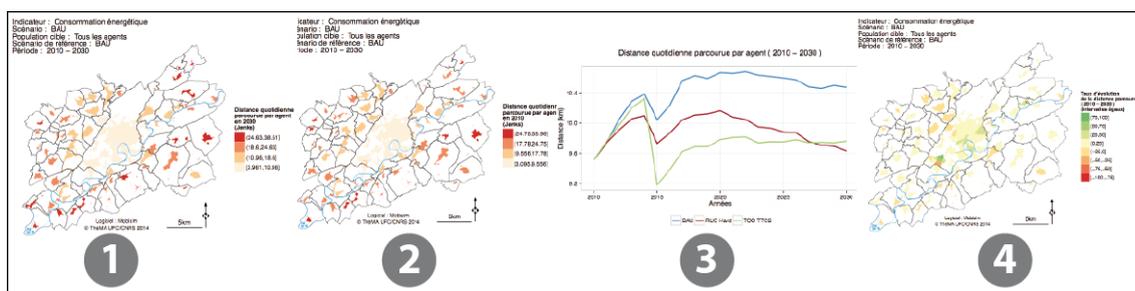


Figure 3.9 – Indicateur : Consommation énergétique

3.2.2.4. Parts modales

L'indicateur des parts modales indique la fréquence d'utilisation des modes de transports dans chaque IRIS pour les déplacements quotidiens des individus, tous motifs de déplacement confondus. Sa principale originalité réside dans le fait qu'il ne montre pas le mode de transport dominant, mais rend compte de leur répartition par l'intermédiaire d'un graphique triangulaire. Sur chacun de ses côtés, ce graphique indique la part de l'automobile individuelle, des transports en commun et des modes doux, sur échelle qui varie de 0 à 100%. Chaque coté du triangle est découpé en trois tiers pour construire 10 catégories caractérisées par une utilisation différenciée des modes de transport : modes alternatifs, collectifs/individuels, doux/motorisés, individuels, modes doux (MD), mixité des modes, modes motorisés, transports en commun, automobile individuelle (VP) et VP/alternatifs. Chaque IRIS est représenté par un point dans ce triangle et sa localisation indique dans quelle catégorie il se situe. D'un point de vue géographique, la couleur de chaque catégorie peut être associée à chaque IRIS sur les documents cartographiques.

Les graphiques triangulaires et les cartes associées pour 2010 et 2030 composent les quatre premiers documents de cet indicateur (cas 1 à 4 sur la Figure 3.10). Ils sont complétés par un graphique temporel indiquant l'évolution de l'utilisation des modes de transport sur l'ensemble de la période 2010-2030 (cas 5), et une carte d'évolution (en points de pourcentage, discrétisés en classes d'intervalles égaux) de la part de l'automobile individuelle entre 2010 et 2030 (cas 6), ce mode de transport constituant un enjeu important dans l'analyse des scénarios.

3.2.3 Sous-système « Pratiques et relations sociales »

Ce troisième sous-système est approché par trois indicateurs complémentaires qui renseignent sur la qualité de vie et l'accessibilité sociale des trois scénarios simulés : évolution et répartition des revenus à l'horizon 2030, budget-temps et taux d'effort des ménages selon leur localisation au sein des aires urbaines.

3.2.3.1. Evolution des revenus

L'indicateur des revenus indique la proportion de ménages en dessous du premier quintile de revenu dans chaque IRIS de l'agglomération, soit les ménages les plus concernés par les enjeux économiques de la mobilité et du logement. Comme l'indique la Figure 3.11, cet

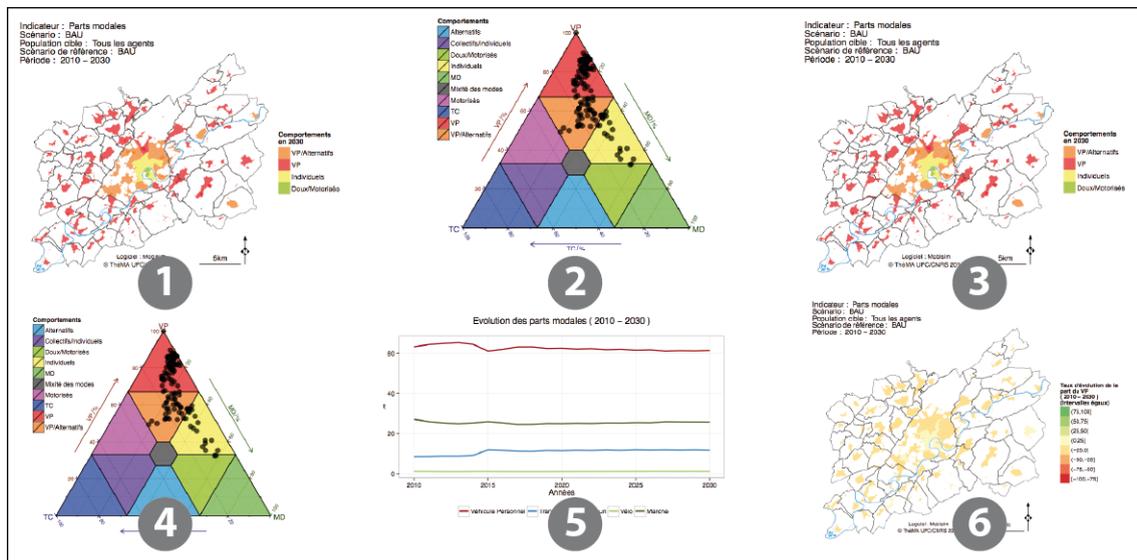


Figure 3.10 – Indicateur : Parts modales

l'indicateur se compose de quatre documents : les revenus au début (2010, cas 1) et à la fin (2030, cas 3) de la période de simulation, discrétisés en quatre classes d'intervalles égaux (en quatre quarts de 100%), et une carte d'évolution de la situation entre 2010 et 2030 (cas 3) dont la taille des cercles indique le nombre de ménages de chaque catégorie dans chaque IRIS (en points de pourcentage) et la couleur indique si le nombre de ménages sous le premier quintile de revenu augmente (en vert) ou diminue (en rouge). Cette évolution peut également être visualisée sur un graphique (cas 3), ce qui permet de mieux identifier les ruptures et les tendances sur la période 2010-2030.

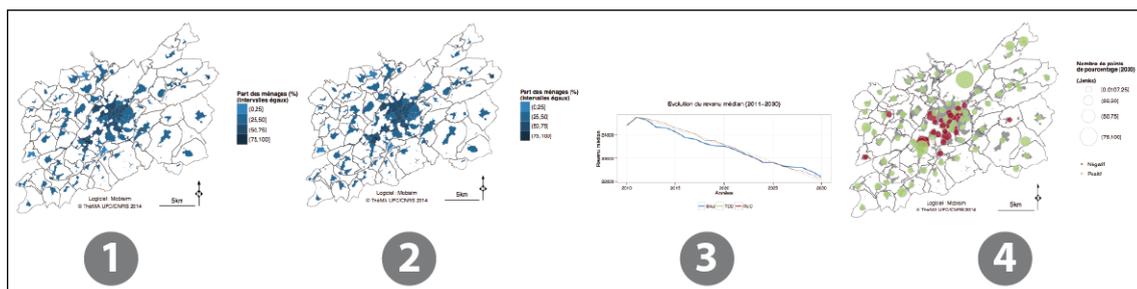


Figure 3.11 – Indicateur : Evolution des revenus

3.2.3.2. Budgets temps

L'indicateur de budget-temps synthétise, pour chaque IRIS, le temps moyen passé chaque jour par les individus dans les transports, tous modes de transport (automobile individuelle, transports en commun, bicyclette, marche à pied) et tous motifs de déplacement (travail, études, achat, loisirs) confondus.

3.2.3.3. Taux d'effort

Cet indicateur présente le rapport entre le revenu des ménages d'un IRIS et deux éléments essentiels pour l'analyse des localisations résidentielles et des mobilités : (i) le coût du logement majoritaire de l'IRIS dans lequel ils se trouvent et (ii) la dépense moyenne pour la mobilité dans ce même IRIS. Les revenus et les coûts sont considérés dans trois catégories ordinales fixes (fort, moyen, faible) qui découpent leur distribution pour l'ensemble de l'agglomération en trois tiers. A partir de cette base, l'originalité de l'indicateur réside dans le recours à la méthode des quadrants (Cauvin, 2008) qui permet de structurer les données deux à deux (revenus et logement d'une part, revenu et mobilité d'autre part) sur deux graphiques composés chacun de neuf classes (bleu pour le logement, rouge pour la mobilité). Les ménages les plus à l'aise sont alors ceux qui présentent un revenu élevé et des coûts faibles (en haut à gauche), alors que les plus vulnérables se situent dans la situation inverse, et donc dans la diagonale inverse du graphique (en bas à droite). Chacune des neuf catégories est associée à une couleur, dont la valeur augmente en fonction du taux d'effort des ménages.

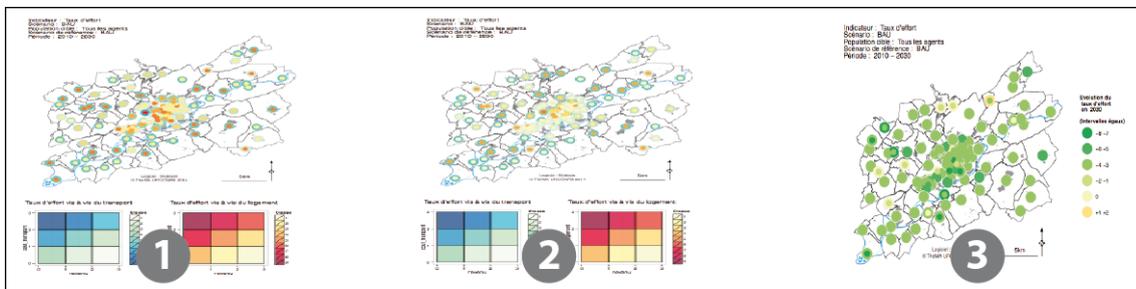


Figure 3.12 – Indicateur : Taux d'effort des ménages

Spatialement, ces couleurs se retrouvent sur des pastilles de taille constante qui sont apposées sur chacun des IRIS de l'agglomération : pour chaque IRIS, une pastille (la grande) indique le taux d'effort pour le transport et une autre (la petite), imbriquée dans la première, indique celui de le logement. Ces pastilles et le graphique qui leur est associé y sont présentés pour chaque scénario pour les deux dates de 2010 et 2030 (cas 1 et 2 de la Figure 3.12). Une dernière carte (cas 3) montre l'évolution de la situation par IRIS : sa légende indique soit une dégradation (effort plus important) soit une amélioration (effort moins important) en comptant le nombre de classes franchies par l'IRIS entre les deux dates dans le sens de la diagonale haut-gauche / bas-droite sur les deux précédents graphiques.

3.3 Analyse des résultats

EN totalité, près de 200 cartes et documents graphiques ont été produits dans le cadre du projet. Une sélection est donc nécessaire pour l'analyse des scénarios et de leurs conséquences sur les localisations et les mobilités urbaines. Cela étant, pour les lecteurs qui souhaiteraient approfondir l'un ou l'autre point, l'intégralité de ces résultats est présentée dans un document annexe à ce rapport, qui prend la forme d'un atlas. Après un bref rappel du contexte démographique des simulations produites à Besançon et à Lyon, les résultats sont analysés selon la logique des trois sous-systèmes (localisation, déplacements, pratiques et relations sociales) mis en évidence dans les deux points précédents.

3.3.1 Contexte démographiques des simulations

Pour analyser les résultats des simulations, nous commençons par rappeler brièvement le contexte démographique commun aux simulations présentées. Besançon est une agglomération en croissance. D'une population de 177 000 individus et 84 000 ménages en 2010, elle passe dans les simulations à 195 000 individus et 105 000 ménages en 2030, ce qui nécessite la construction de 850 logements par an. La structure par âge de la population montre une augmentation à la fois des jeunes et des plus âgés (plus de 65 ans), en laissant globalement inchangé le nombre d'adultes (Figure 3.13).

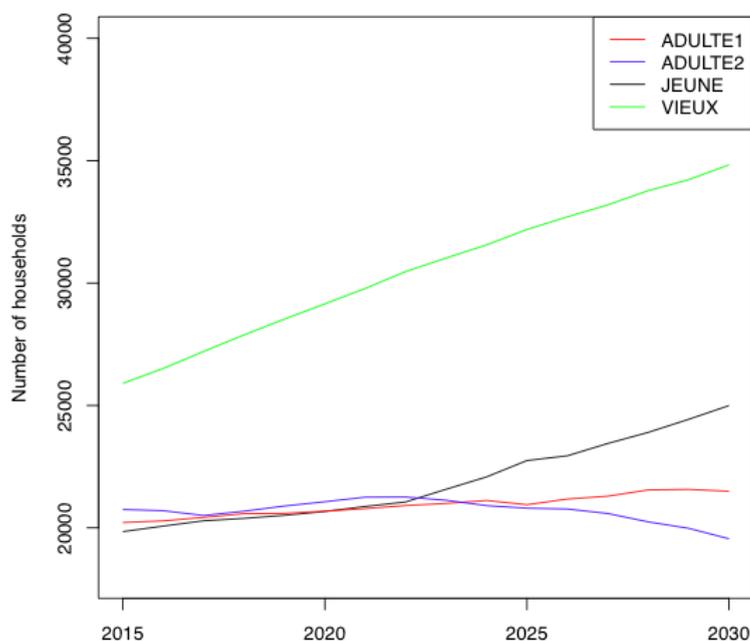


Figure 3.13 – Evolution de la population par type de ménage (CAGB, 2010-2030)

Par conséquent de cette évolution, on observe une stabilisation du nombre de couples et du nombre d'enfants, et une augmentation du nombre de personnes vivant seules (célibataires, veufs, etc.). Enfin, l'évolution des revenus montre une stagnation des revenus élevés, et une croissance des autres catégories de revenus.

Les hypothèses d'évolution de la population de l'aire urbaine de Lyon sont, quant à elles, du même ordre que celles de Besançon, avec une croissance de 7% du nombre d'habitants entre 2010 et 2030 (8% pour Besançon). Les évolutions en termes de structure de la population vont également dans le même sens, avec notamment un vieillissement sensible (cf. Figure 3.14) auquel se trouve en partie liée une baisse de la taille moyenne des ménages qui passe de 2,26 personnes par ménage en 2010 à 2,08 en 2030.

En revanche, deux différences peuvent être soulignées par rapport à Besançon :

- Il y a tout d'abord un effet taille important puisque l'aire urbaine de Lyon représente 1 732 000 personnes et 766 400 ménages en 2010, et qu'il est nécessaire de construire en moyenne 6 422 logements par an jusqu'en 2030 pour prendre en compte l'effet cumulé de la croissance générale de la population et la baisse de la taille des ménages.
- Par ailleurs, la différence de périmètre d'étude (communauté d'agglomération pour Be-

sançon, aire urbaine pour Lyon) fait que cette croissance se répartit sur des territoires de surfaces et de natures bien différentes, avec par exemple plus de périurbain lointain peu dense et inaccessible aux transports collectifs dans le cadre d'une aire urbaine.

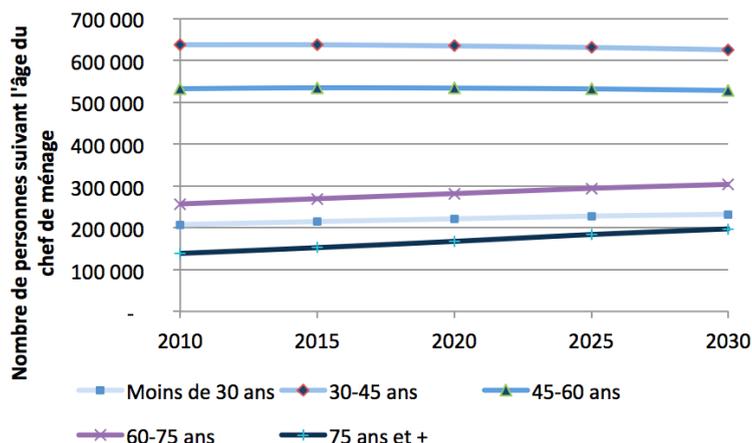


Figure 3.14 – Evolution de la population en fonction de l'âge du chef de ménage (Aire Urbaine de Lyon, 2010-2030)

Par la suite, pour mieux faire ressortir les tendances, variables selon les différentes zones de l'aire urbaine lyonnaise, les cartes et les indicateurs retenus dans VILMODEs pourront être distingués selon un découpage en 6 grandes zones, telles qu'elles sont indiquées dans la Carte 3.15. Les résultats pourront également être présentés au niveau global de l'aire urbaine mais aussi à celui du territoire du SCoT lyonnais, qui correspond aux 4 zones hypercentre (HC), reste de Lyon-Villeurbanne (RLV), 1ère couronne Est (1CE) et 1ère couronne Ouest (1CO) : il correspond à quelques communes près au territoire du Grand Lyon et se trouve donc relativement proche dans sa logique institutionnelle au territoire de la Communauté d'Agglomération du Grand Besançon tel qu'il est modélisé dans MobiSim©.

3.3.2 Analyse des localisations

Le développement résidentiel correspond à la construction de logements individuels ou collectifs, indépendamment de leur occupation effective : on ne simule pas les ménages faisant construire leur maison de manière individuelle, et l'occupant systématiquement. Il s'agit donc d'une action de promoteurs, qui cherchent à anticiper sur le marché, donc à prendre en compte les attentes des futurs habitants.

3.3.2.1. Plans locaux d'urbanisme

Le scénario de laisser-faire (LF) révèle qu'en l'absence de contraintes sur le foncier autres que la délimitation des zones inconstructibles (zones inondables, zones d'intérêt écologique, zones humides etc.), l'étalement urbain se poursuit et continue de grignoter des terres agricoles dans les deux agglomérations de Lyon et Besançon (Figures 3.16 e ??). L'analyse des deux scénarios (renouvellement urbain compact (RUC) et *fractal oriented development* (FOD)) mettra donc en évidence l'effet des politiques d'aménagement et non un effet auto-correcteur, qu'on aurait pu imaginer en cas de saturation totale de l'espace disponible à la

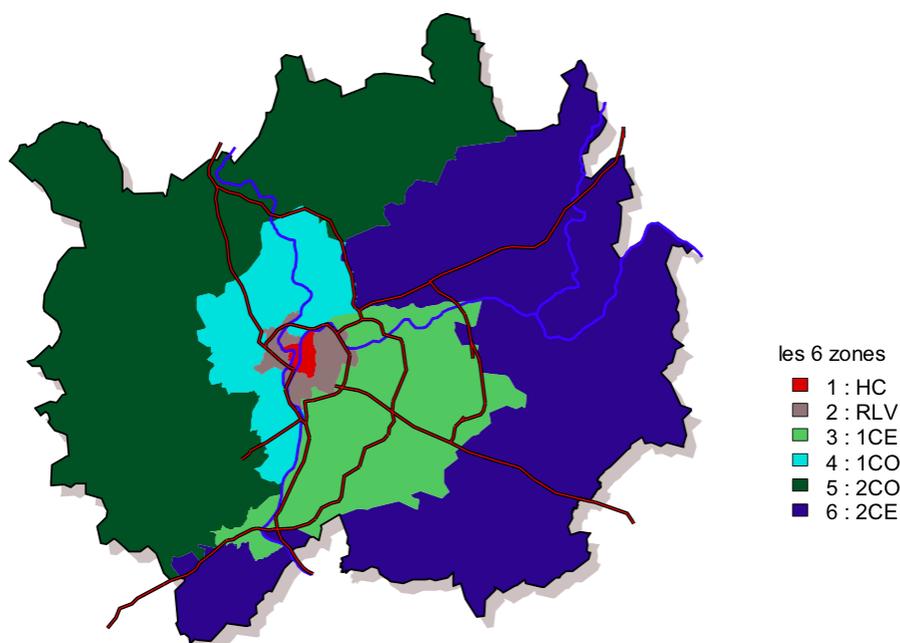


Figure 3.15 – Découpage en 6 zones retenu pour rendre compte des évolutions au sein de l’aire urbaine de Lyon

construction, ou encore d’augmentation vraiment déraisonnable des distances à l’emploi et aux aménités.

On peut également ajouter que le l’hypothèse de renchérissement de l’énergie prise en compte dans ce scénario de laisser-faire ne suffit pas à reconcentrer spontanément l’agglomération.

Le scénario de renouvellement urbain compact (RUC) présente un Plan Local d’Urbanisme simulé extrêmement restrictif, puisqu’il interdit de fait la construction sur les parties de Lyon et Besançon situées en dehors d’une enveloppe morphologique calculée à partir de la situation actuelle (Figure 3.17 et ??) . Il parvient donc parfaitement à contenir l’étalement urbain, ainsi qu’à renforcer certaines zones de densité plus faible, notamment au nord de Besançon (Ecole-Valentin, et entrée nord-ouest de Besançon), ou susceptibles d’accueillir des opérations de renouvellement urbain (Planoise, Hauts de Chazal) au sud-ouest.

Le scénario *Fractal oriented development* (FOD) s’appuie quant à lui sur le PLU fractal présenté dans le § 2.3.4 de ce rapport, qui encourage une déconcentration polarisée sur les nouveaux centres de la hiérarchie urbaine que l’on tente de mettre en place. On constate donc un renforcement très net des noyaux urbains choisis à proximité des gares, affiné localement par la prise en compte dans la simulation du développement résidentiel des aménités locales, et des zones inconstructibles (Figure 3.18). On observe également la bonne répartition entre habitat individuel relativement peu dense et habitat individuel et collectif dense, souhaitée dans ce scénario. Dans la ville-centre, le développement résidentiel se concentre fortement autour des arrêts de tramway et les haltes ferroviaires où les réserves foncières sont suffisantes pour accueillir les nouvelles constructions, notamment dans le nouveau quartier des Hauts de Chazal, au sud-ouest de la commune. Enfin, le développement résidentiel respecte comme attendu les trames vertes et bleues, et fait la part belle aux espaces ouverts, ce qui est un des bénéfices attendus de l’approche multifractale.

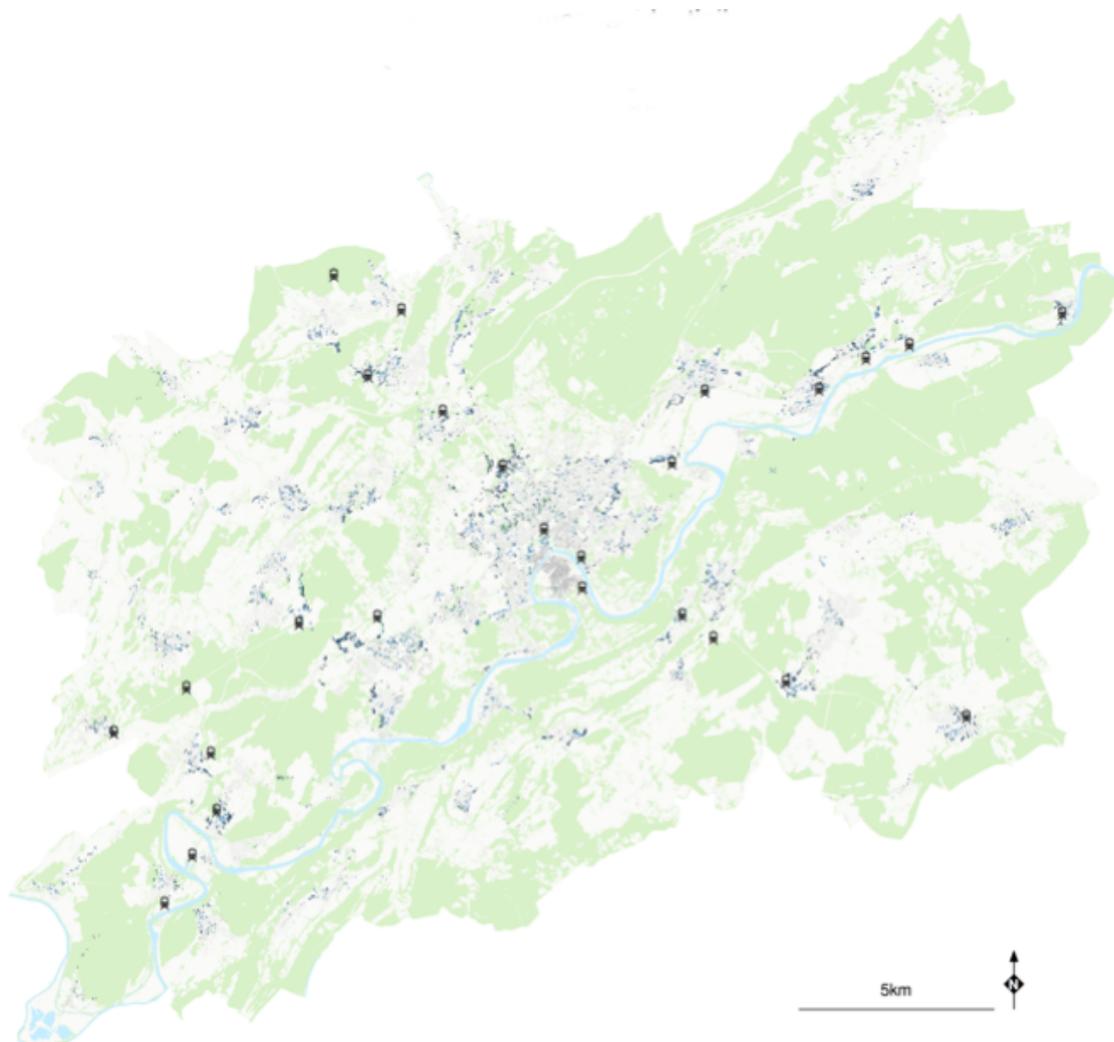


Figure 3.16 – Croissance résidentielle (2010-2030) dans la Communauté d’Agglomération du Grand Besançon selon le scénario laisser-faire (LF). Les nouvelles parcelles construites (cellules de 20x20m) sont figurées en bleu.

Cependant, les zones nouvellement urbanisées dans les scénarios ne sont pas nécessairement immédiatement occupées. En effet, le taux de vacance des logements, un peu inférieur à 10% sur l’agglomération, permet un décalage entre la croissance démographique et l’occupation effective des nouveaux logements.

3.3.2.2. Localisation des ménages

Nous nous intéressons maintenant aux ménages s’installant dans les nouveaux logements, c’est-à-dire ceux créés chaque année lors de l’étape de développement résidentiel. Comme le montre la Figure 3.19, le scénario de laisser-faire (LF) présente une bonne adéquation entre construction et occupation des logements, ce qui était attendu en l’absence de toute contrainte.

Les contraintes imposées par le scénario de renouvellement urbain compact (RUC) permettent de révéler les déséquilibres existant dans le centre de l’agglomération. Par compa-

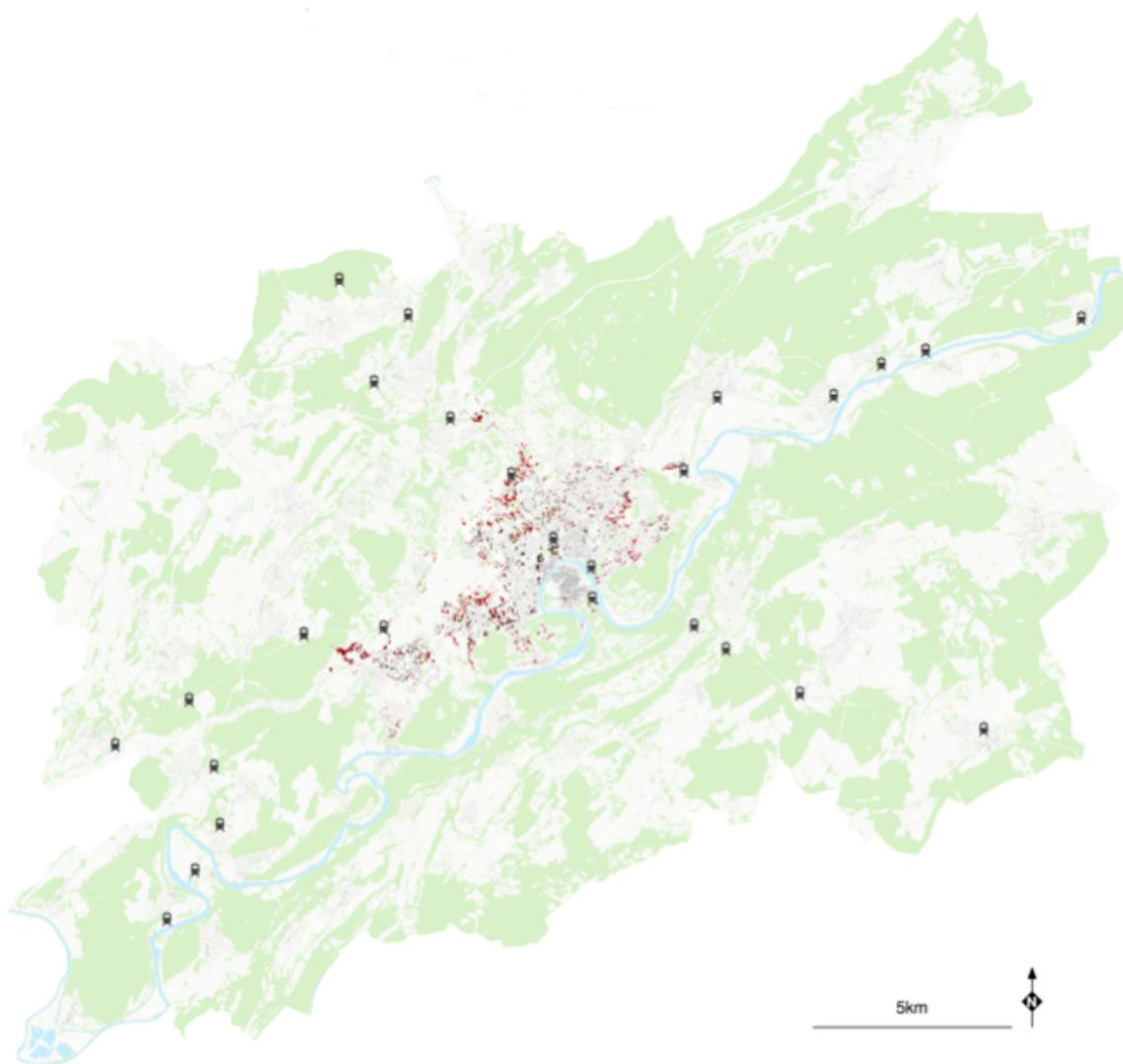


Figure 3.17

– Croissance résidentielle (2010-2030) dans la Communauté d'Agglomération du Grand Besançon selon le scénario Renouvellement urbain compact (RUC). Les nouvelles parcelles construites (cellules de 20x20m) sont figurées en rouge.

raison au scénario de laisser-faire (LF), on observe que les nouveaux logements du sud-est, c'est-à-dire ceux de l'hyper-centre entourant la boucle du Doubs, sont les plus occupés (Figure 3.20). Ceux construits en périphérie sont relativement moins choisis, excepté à l'entrée de ville du nord-ouest (Ecole-Valentin). Les zones de Haut de Chazal, Planoise et Ecole Valentin, qui ont fait l'objet d'un développement résidentiel soutenu, ne se développeraient pas spontanément en l'absence de contraintes dans le scénario laisser-faire (LF).

Le scénario de renouvellement urbain compact (RUC) est donc un scénario qui opère un rééquilibrage de l'agglomération sur un axe nord-ouest / sud-est par rapport au laisser-faire (LF). Ce rééquilibrage peut être accéléré par une politique de renouvellement urbain pour ces quartiers, situés dans la zone péricentrale, qui héritent d'une vision de l'urbanisme des années 50 et 60 qui peinent aujourd'hui à s'intégrer dans la ville, avec des zones de grands

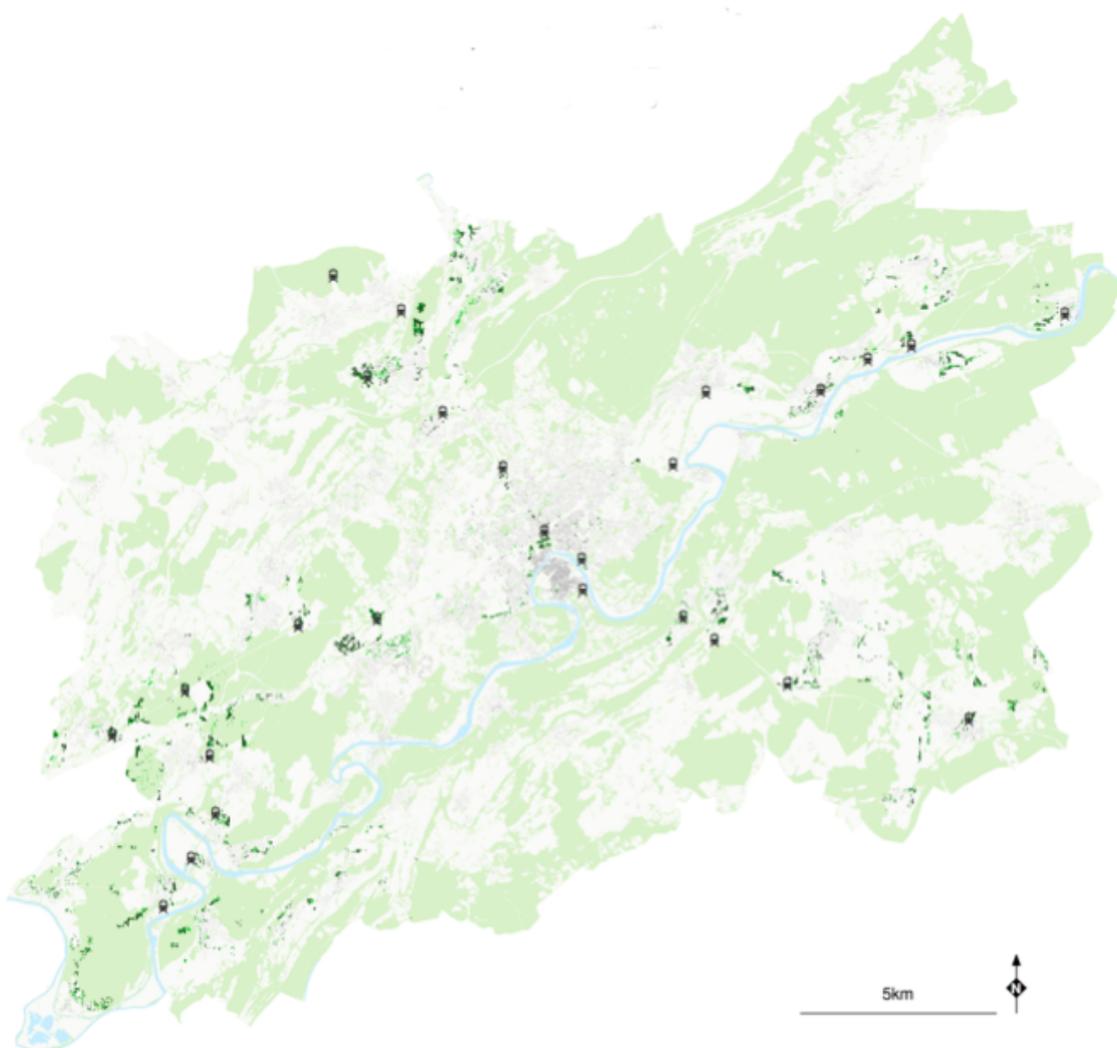


Figure 3.18

– Croissance résidentielle (2010-2030) dans la Communauté d'Agglomération du Grand Besançon selon le scénario *Fractal oriented development* (FOD). Les nouvelles parcelles construites (cellules de 20x20m) sont figurées en vert.

ensembles et des terrains militaires offrant un potentiel important (quartiers Butte et St Ferjeux par exemple).

Comme le montre la Figure 3.21, le scénario *Fractal oriented development* (FOD) laisse quant à lui apparaître par comparaison au scénario de laisser-faire une déconcentration (tâche orangée du centre) polarisée (zones vertes concentrées autour des noyaux urbains existant choisi dans l'optique du renforcement du polycentrisme). Il s'agit donc d'une déconcentration concentrée, opérant bien la logique de développement d'une ville ouverte, mais structurée.

On constate également que, malgré un Plan local d'urbanisme constitué à partir de cellules carrées de 400 m² (Figures 3.16, 3.17 et 3.18), le développement résidentiel s'est naturellement structuré en fonction des contraintes topographiques (lit du Doubs, relief), et du réseau de transport. Il ne s'agit donc pas d'une politique de remplissage de l'espace, mais

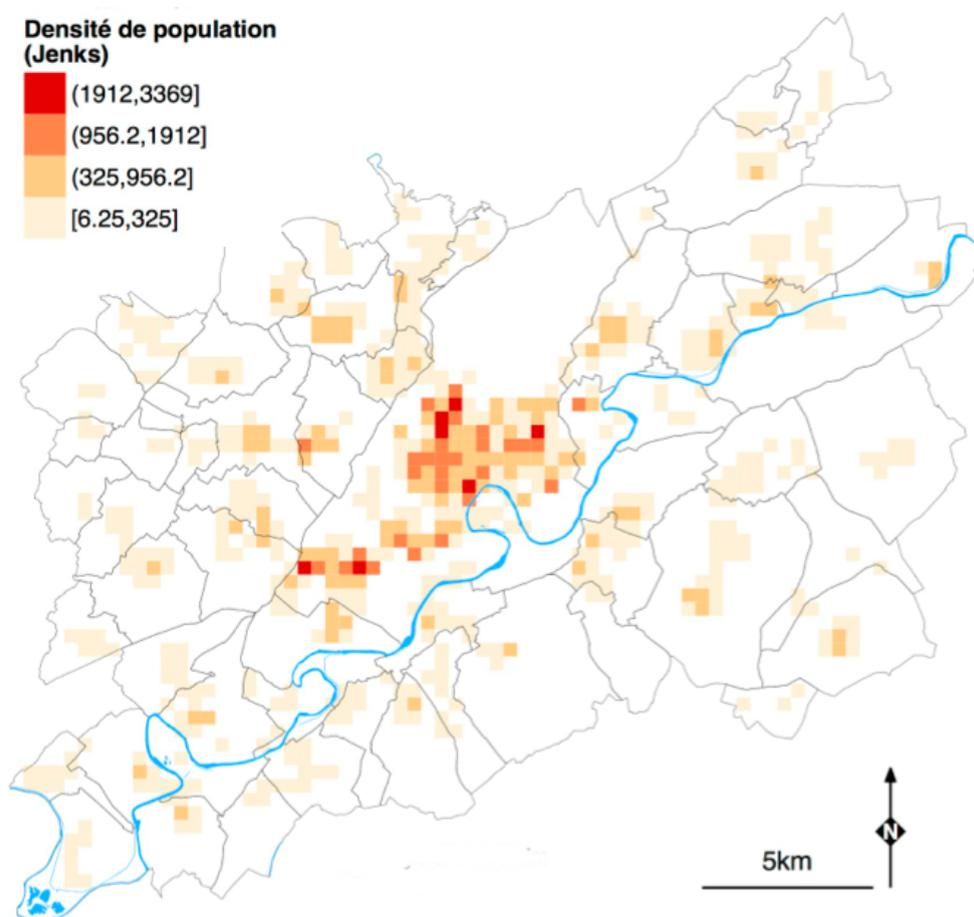


Figure 3.19 – Densité de population dans la Communauté d'Agglomération du Grand Besançon selon le scénario Laisser faire (LF) en 2030

bien de renforcement des structures existantes.

Dans le cas lyonnais, le scénario de laisser-faire (LF) conduit à une croissance sensible de la population au sein des zones périphériques de deuxième couronne, avec +7% d'habitants entre 2010 et 2030, tant à l'est qu'à l'ouest. La première couronne Ouest, initialement moins peuplée qu'à l'Est connaît également un rattrapage (+33 000 personnes, soit +11% en première couronne Ouest contre seulement +9 000 personnes, soit +2,5% à l'Est). Les zones centrales très denses de la Presqu'île et de Préfecture/Part-Dieu restent stables. Le reste de Lyon et Villeurbanne connaît quant à lui une poursuite de croissance entre 2010 et 2020 avant de se stabiliser (+11% sur l'ensemble de la période). Par contre, comme ce territoire concentre 25% de la population totale de 2010, cette augmentation absorbe une part importante des nouveaux habitants de l'aire urbaine (40%).

La politique d'urbanisme envisagée dans le scénario de renouvellement urbain compact (RUC) favorise nettement plus le développement des zones urbanisées de première couronne, qui vont absorber 65% de la croissance de la population de l'aire urbaine en augmentant de 88 000 personnes, avec notamment une forte progression en première couronne ouest (+21%). La croissance de la population périurbaine reste plus mesurée (+41 000 personnes), tandis qu'elle reste quasiment stable sur le centre dense de Lyon et Villeurbanne.

Enfin, le scénario du *fractal oriented development* (FOD) repose sur le développement de

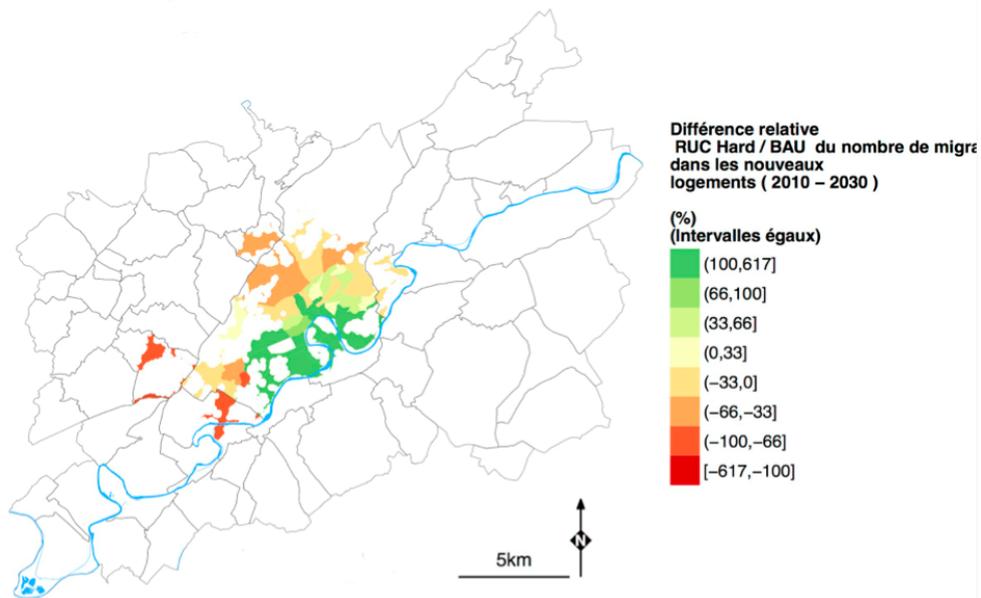


Figure 3.20 – Différentiel de population dans la Communauté d’Agglomération du Grand Besançon entre le scénario Laisser faire (LF) et le scénario Renouvellement urbain compact (RUC) en 2030.

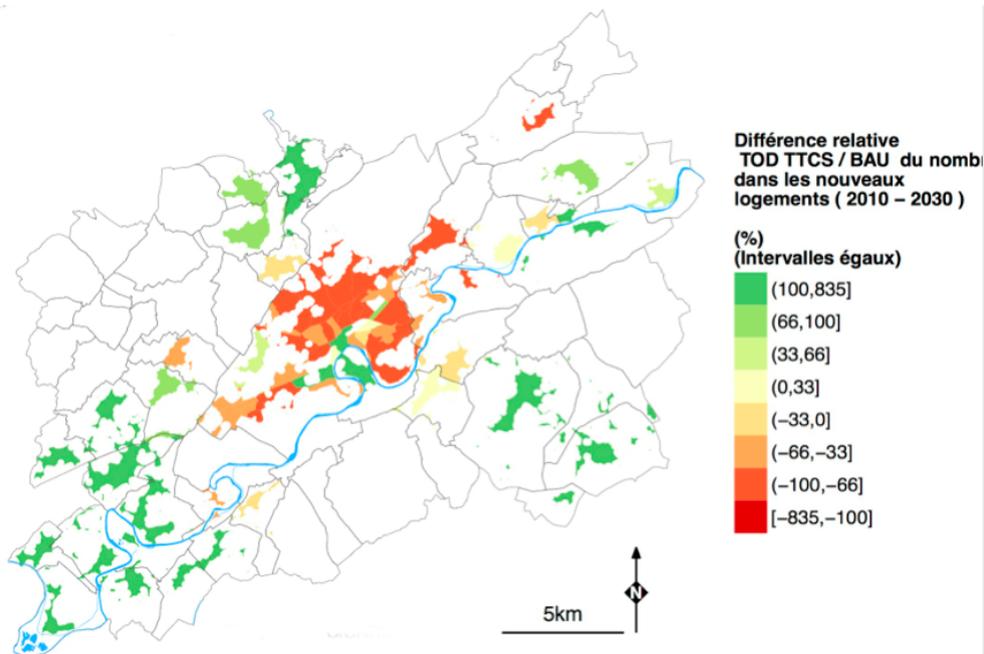


Figure 3.21 – Différentiel de population dans la Communauté d’Agglomération du Grand Besançon entre le scénario Laisser faire (LF) et le scénario *Fractal oriented development* (FOD) en 2030.

pôles urbains autour des stations du réseau de six lignes fortes de tram-train envisagées (cf. Figure 3.22). Cette politique volontariste d’aménagement urbain conduit à renforcer très nettement la première couronne, qui accueille plus que l’équivalent de la croissance totale de la population de l’aire urbaine (+124 000 personnes contre +120 000). En contrepartie,

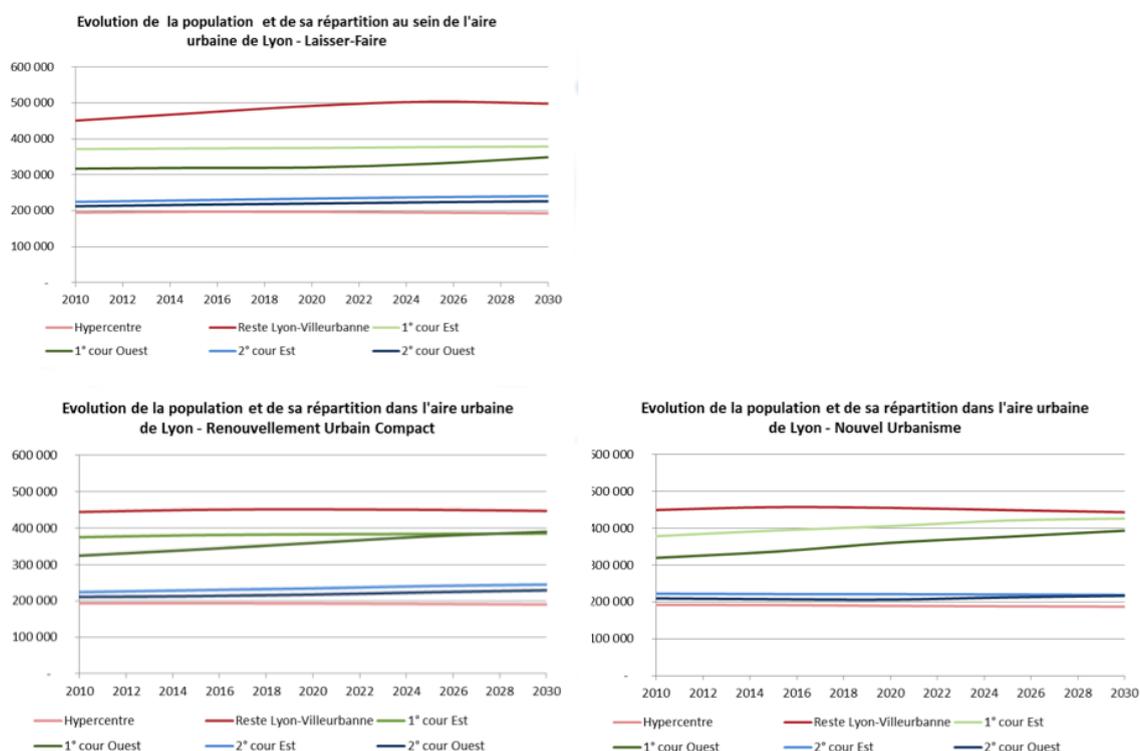


Figure 3.22 – Evolution de la population et de sa répartition au sein de l'aire urbaine de Lyon suivant les trois scénarios retenus

si le nombre de logements augmente légèrement au sein de Lyon et Villeurbanne (+8%, cf. § 2.3.3.2.), cela ne suffit pas à compenser la baisse de la taille des ménages et donc du nombre de personnes par logement, et la population diminue dans le centre (-10 000 personnes) dans ce scénario. La périphérie augmente quant à elle légèrement, avec notamment un rééquilibrage en faveur de l'ouest (+8 000 personnes, soit +4%, contre une stabilité dans le périurbain est).

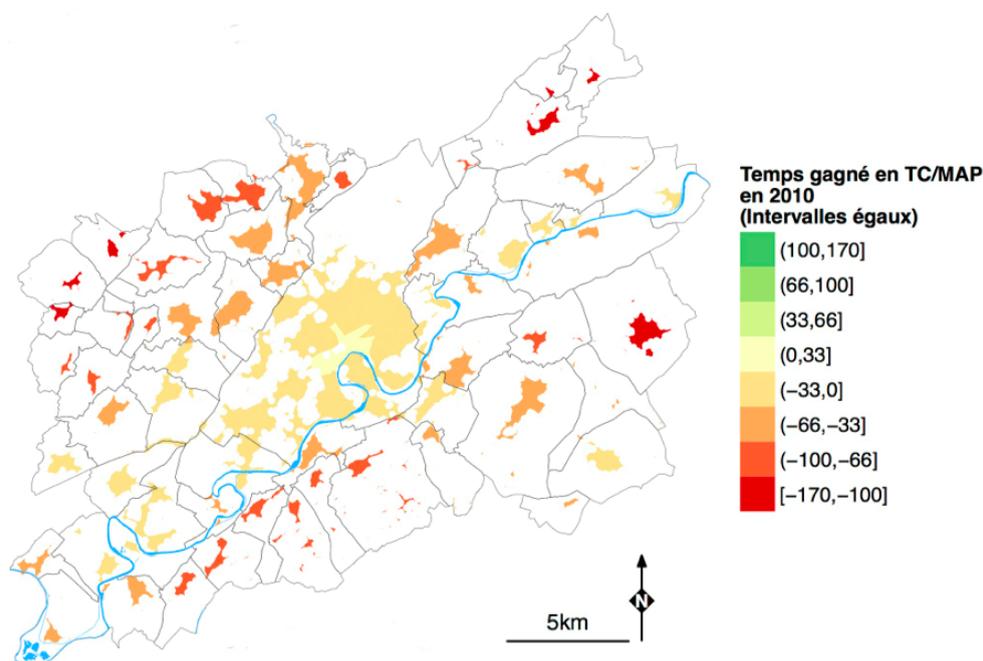
Par ailleurs, la répartition de la population en fonction notamment de l'âge du chef de ménage n'est pas uniforme au sein de l'aire urbaine. Il est intéressant de voir si son évolution reste constante ou si la structure des âges évolue, car elle peut également entraîner des modifications dans les mobilités. Le vieillissement de la population est bien marqué, avec les ménages dont la personne de référence a 60 ans ou plus représentant 23% de la population en 2010 et 27% en 2030. Cette population est moins présente en périphérie (19%) que dans les zones plus denses du centre et de la première couronne (23,5%) en 2010, et ce phénomène se conserve tout au long de la simulation (respectivement 24 et 28% en 2030 dans le scénario de laisser-faire). Il se renforce même légèrement dans les scénarios RUC et FOD où ces ménages âgés représentent 29,5% de la population du centre dense de Lyon-Villeurbanne – la stabilisation voire la baisse de la population de la zone centrale dans ces deux scénarios ne les concerne pas.

3.3.2.3. Influence du système de transport

Enfin, pour conclure cette réflexion sur l'usage du sol, le développement résidentiel et les localisations des agents, on peut se pencher sur l'influence du système de transport

dans les mécanismes de localisation. Nous comparons la performance relative de la voiture individuelle et du transport en commun, en déterminant les zones où l'un des deux modes est plus rapide que l'autre pour se rendre respectivement à la gare de Besançon Viotte et à la gare de la Part-Dieu à Lyon, choisies arbitrairement comme point central de chacune des deux agglomérations. Cet indicateur combine à la fois des effets de la performance intrinsèque des modes (le scénario de nouvel urbanisme introduit un tram-train), et des effets liés à l'évolution de la congestion pour la voiture particulière.

Concernant l'agglomération de Besançon, comme les simulations intègrent la mise en service du tramway en 2015 dans tous les scénarios, nous commençons par évaluer l'effet de ce facteur en comparant, pour le scénario de laisser-faire (LF), la situation en 2010 et la situation en 2030 (Figures 3.23 et 3.24).



Fi-

Figure 3.23 – Temps de transport gagné entre l'usage de l'automobile individuelle et les autres modes de transport selon le scénario Laisser faire (LF) en 2010.

On constate que, comme attendu, la voiture particulière est plus efficace que le transport en commun en dehors de l'hyper-centre (Figure 3.24 pour Besançon et 3.25 pour Lyon). L'étalement de la tâche jaune au centre de l'agglomération montre que l'introduction du tramway joue effectivement un rôle positif sur l'offre de transport en étendant la zone où les transports en commun sont plus rapides que la voiture (Figure 3.25). On constate également que la tâche orangée où l'avantage de la voiture est faible couvre une bonne partie du voisinage du centre, révélant un réseau de transports en commun (notamment bus) bien développé et relativement efficace. Dans le cas lyonnais, les réseaux routiers et de transport collectifs ne connaissent pas de transformation importante dans le cadre du scénario de laisser-faire, et les cartes de 2010 et 2030 restent très proches (Figure 3.25).

A Besançon comme à Lyon, les différences entre le scénario de laisser-faire (LF) et celui de renouvellement urbain compact (RUC) sont très faibles, car attribuables uniquement aux gains éventuels de décongestion du réseau routier en reconcentrant la population. Nous renvoyons donc le lecteur aux cartes présentées en annexe pour l'analyse spatiale

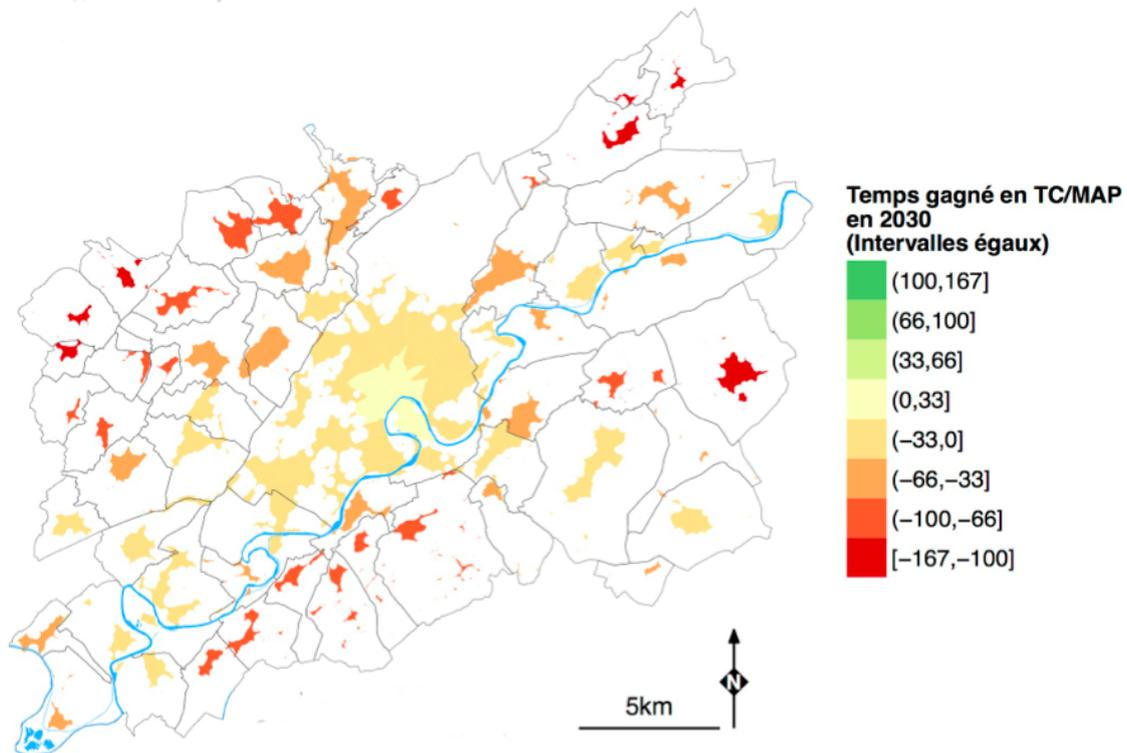


Figure 3.24 – Temps de transport gagné entre l’usage de l’automobile individuelle et les autres modes de transport selon le scénario Laisser faire (LF) en 2030.

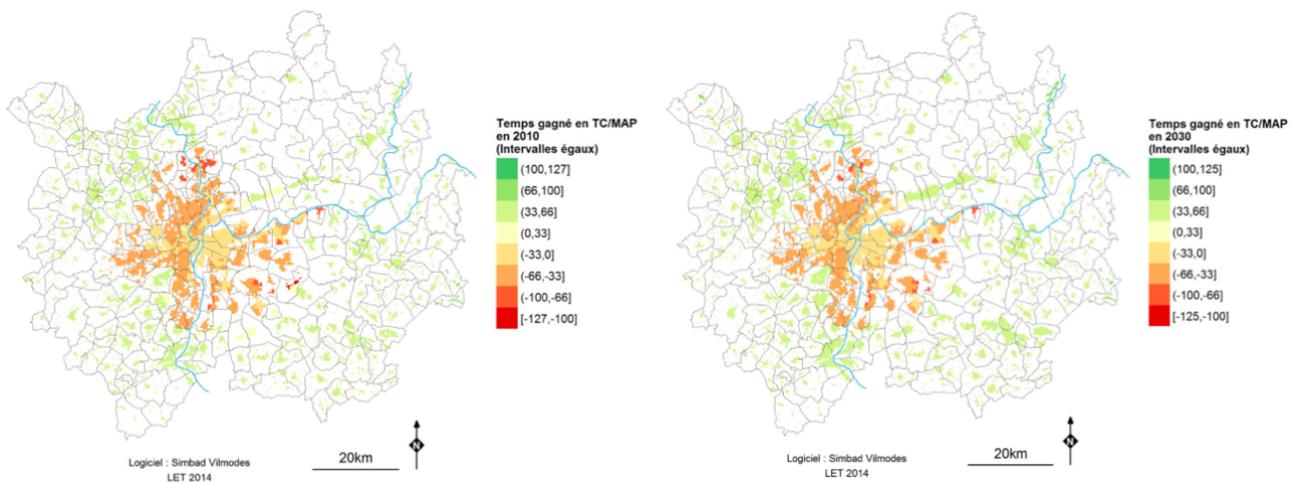


Figure 3.25 – Temps de transport gagné entre l’usage de la voiture individuelle et les autres modes de transports à l’initial en 2010 (à gauche) et selon le scénario Laisser faire (LF) en 2030 (à droite).

détaillés des effets des scénarios sur l’influence du système de transport, en rappelant que ces dernières sont à nuancer du fait de certains paramètres stochastiques requis par les modèles utilisés pour les simulations.

Dans le cas du scénario *Fractal oriented development* (FOD), plus on s’éloigne du centre,

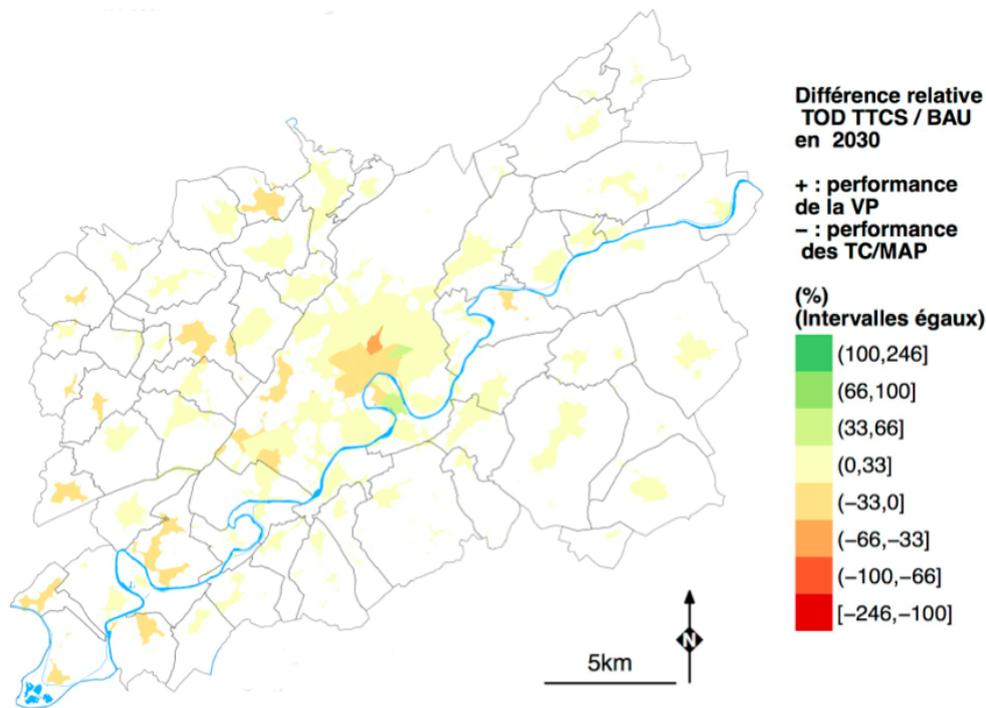


Figure 3.26 – Différentiel de temps de transport gagné entre l’usage de l’automobile individuelle et les autres modes de transport entre le scénario Laisser faire (LF) et le scénario *Fractal oriented development* (FOD) en 2030.

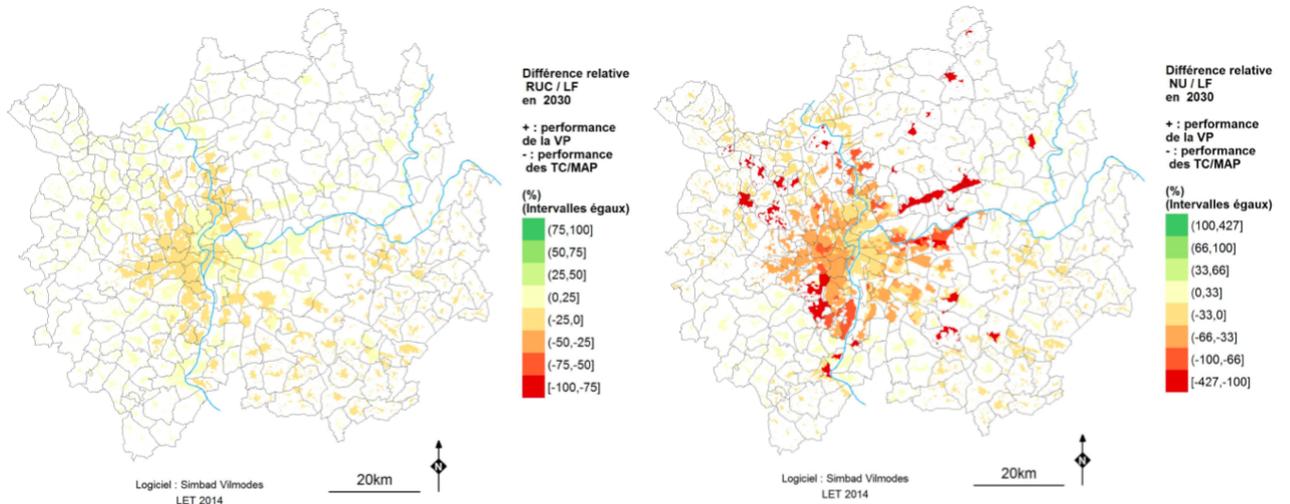


Figure 3.27 – Différentiel de temps de transport gagné entre l’usage de la voiture individuelle et les autres modes de transports entre le scénario LF (2030) et le scénario Renouvellement urbain compact RUC (à gauche) et le scénario *Fractal oriented development* FOD (à droite) en 2030.

déjà bien couvert par un système de transport collectif performant, plus les gains d’accessibilité permis par la nouvelle offre de tram-train apparaissent importants. Dans le cadre de Besançon où le territoire modélisé correspond à la communauté d’agglomération, ces effets se font sentir sur les franges. Dans le cas lyonnais, où c’est l’aire urbaine qui est représentée, ces gains d’accessibilité apparaissent nettement dans les zones périurbaines

extérieures au Grand Lyon tout le long des 6 axes où le tram-train a été simulé (Figure 3.27).

Pour compléter l'analyse de ces résultats, il convient maintenant d'étudier dans quelle mesure ces potentialités sont réellement utilisées par les individus en nous intéressant à leurs pratiques de déplacement.

3.3.3 Analyse des déplacements

Les déplacements sont un marqueur intéressant pour l'évaluation des scénarios. Naturellement, la mobilité n'est pas une fin en soi ; elle apparaît simplement comme un moyen de parvenir à réaliser un programme d'activité dans la journée. Nous analysons donc les déplacements de manière globale, puis par motif de déplacement, de manière à mesurer les impacts concrets des politiques d'aménagement évaluées par l'intermédiaire de chacun des trois scénarios. Cependant, de manière à percevoir le contexte urbain dans lequel ces déplacements virtuels ont été simulés, nous commençons par analyser les aménités accessibles en modes doux et transports en commun, puis en voiture. En effet, un réseau très performant, mais permettant d'accéder à peu d'aménités, aura un intérêt limité. Les modes doux et les transports en commun présentent l'avantage d'être plus accessibles que la voiture, avec moins de conditions d'âge ou de santé.

3.3.3.1. Accessibilité aux aménités et aux emplois

Les Figures 3.28 et 3.29 présentent le nombre moyen de personnes accessibles en 10 minutes depuis chaque lieu de résidence des agglomérations de Besançon et Lyon, en faisant l'hypothèse d'une corrélation entre la population et la densité de services en un lieu. Dans le cas du scénario de laisser-faire (LF), l'évolution de cette accessibilité entre 2010 et 2030, qui combine le facteur démographique (évolution démographique et localisation des ménages) et l'amélioration des performances du système de transports collectifs (ouverture du tramway à Besançon notamment) est très faible dans les deux cas : en 2030, les zones présentant le plus grand nombre d'individus accessibles sont limitées au centre, avec la combinaison d'une population concentrée et de la présence d'un réseau de transport en commun dense. Dans le reste des deux agglomérations, le développement d'un habitat dispersé empêche l'émergence de zones de bonne accessibilité en transport en commun et en mode doux.

Le scénario de renouvellement urbain compact (RUC) présente une amélioration de cette mesure d'accessibilité dans les centres d'agglomération, du fait de la plus grande densité de population (Figures 3.30 et 3.31). Il a en revanche un effet négatif sur le reste des territoires urbains, augmentant l'isolement relatif des habitants de la périphérie.

Enfin comme l'indiquent les Figures 3.32 et 3.33, le scénario *Fractal oriented development* (FOD) a quant à lui pour effet de redistribuer les accessibilités le long des axes de transport en commun, réalisant une sorte de compromis entre distance et densité de population. Dans le cas bisontin, on remarque que l'axe sud-ouest / nord-est est le seul à voir son accessibilité augmenter, ce qu'on peut attribuer en partie à un relief plus favorable au vélo, pris en compte dans les simulations. Le cas lyonnais fournit les mêmes tendances qu'à Besançon. Les zones avec une amélioration relative des accessibilités par rapport au scénario de Laisser Faire sont principalement situées le long des axes de desserte du nouveau réseau de tram-train, en lien notamment avec leur redensification.

Etant donné que la voiture particulière est le mode dominant pour les déplacements domicile-travail, et que ces derniers représentent le plus fort kilométrage, un regard particulier peut-être tourné vers l'accessibilité à l'emploi en voiture avec 0,5 litre de carburant.

La répartition spatiale des emplois étant fortement polarisée, on constate dans les deux cas lyonnais et bisontin une accessibilité décroissante avec la distance au centre. Cette

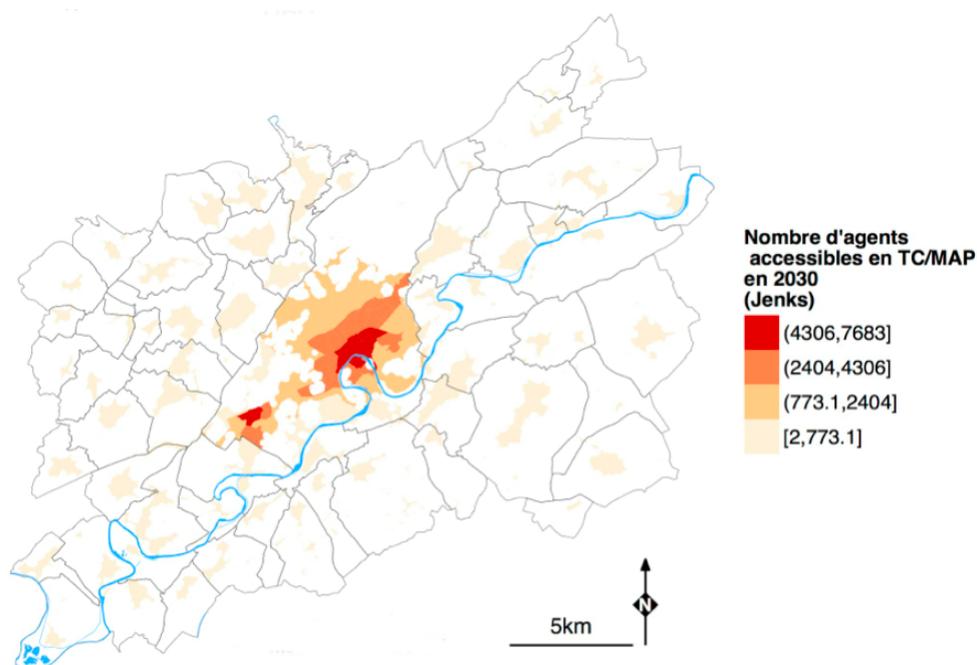


Figure 3.28 – Nombre de personnes accessibles en 10 minutes en mode doux et en transports en commun selon le scénario Laisser faire (LF) en 2030.

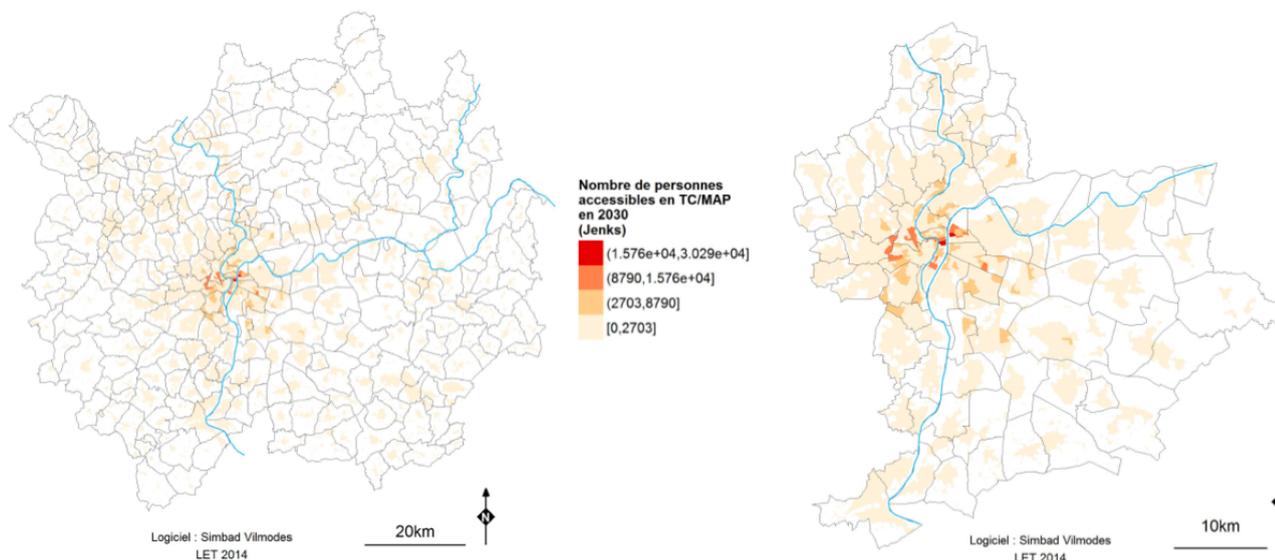


Figure 3.29 – Nombre de personnes accessibles en 10 minutes en mode doux et en transport en commun selon le scénario Laisser Faire (LF) en 2030 au sein de l'aire urbaine de Lyon (zoom sur le territoire du SCoT lyonnais à droite).

structure reste marquée au fil des simulations et l'indicateur retenu ne montre pas de variation particulièrement sensible entre 2010 et 2030, quel que soit le scénario considéré. Nous présentons ci-dessous les cartes de Lyon et Besançon correspondant au cas du scénario Laisser Faire (LF) en 2030 (Figures 3.34 et 3.35).

Dans le cas bisontin, on constate sur la Figure 3.34 que la structure de l'accessibilité à

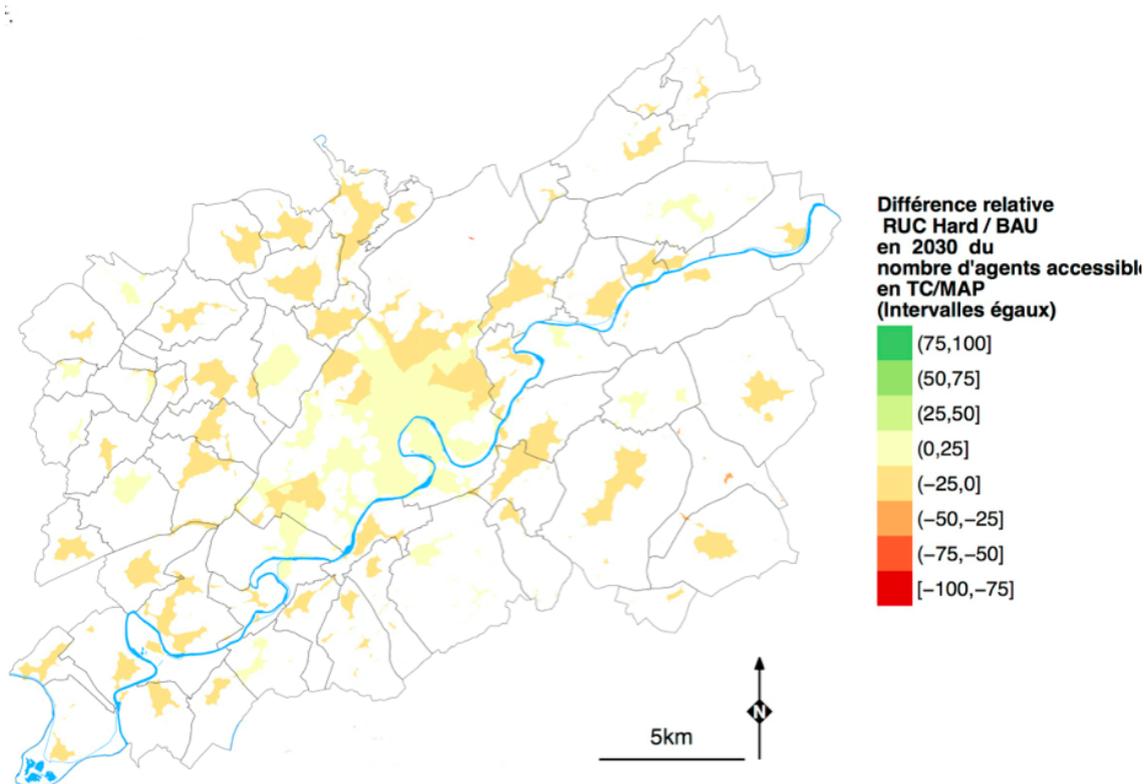
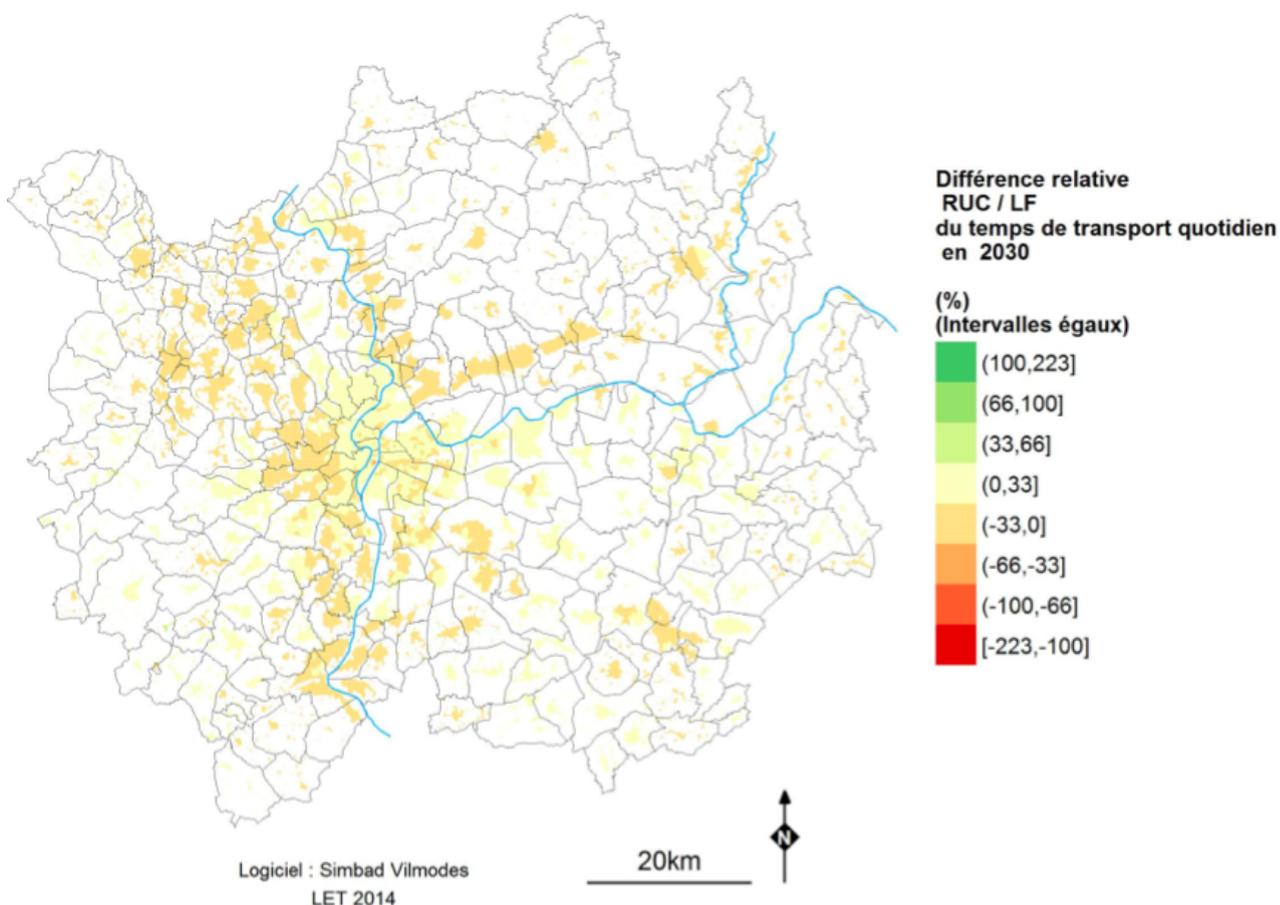


Figure 3.30 – Différentiel du nombre de personnes accessibles en 10 minutes en mode doux et en transports en commun entre le scénario Laisser faire (LF) et le scénario Renouvellement urbain compact (RUC) en 2030.

l'emploi n'est pas totalement un gradient régulier à partir du centre, mais présente une polarisation nord-sud, du fait à la fois de la répartition des emplois et de la structure du réseau de transport. Les localisations au sud-est de la ville dense (Planoise et Châteaufarine), présentent un nombre d'emplois accessibles équivalent à celui de la première couronne périurbaine du nord-ouest (Ecole Valentin). On constate également que le relief et les espaces verts provoquent des discontinuités que les aménagements (routes en remblai / déblai, etc.) ne parviennent pas à lisser complètement.

**Figure 3.31**

– Différentiel du nombre de personnes accessibles en 10 minutes en mode doux et en transport en commun entre les scénarios Laisser Faire (LF) et Renouvellement Urbain Compact (RUC) en 2030 au sein de l'aire urbaine de Lyon

3.3.3.2. Parts modales

Lors de la simulation des scénarios, les accessibilités passées en revue dans le point précédent sont transformées en kilomètres parcourus par la génération des déplacements des individus (modélisation du transport intégrée aux modèles LUTI). Ces déplacements peuvent être analysés sous plusieurs angles, notamment sur le plan des modes de déplacements privilégiés par les habitants pour réaliser leur programme d'activité.

Ainsi, en ce qui concerne la mobilité globale sur l'agglomération de Besançon, les résultats montrent tout d'abord, dans le cas du scénario de laisser-faire (LF), une grande stabilité des parts modales entre 2010 et 2030, après l'augmentation modeste de la part modale transports en commun observée en 2015 avec la mise en service du tramway (Figures 3.36 et 3.37).

Le scénario de renouvellement urbain compact (RUC) montre également une stabilité des parts modales, que l'on observe en le comparant au laisser-faire (LF). Naturellement, cette stabilité s'accompagne d'une diminution des distances parcourues, du fait de la plus grande concentration des habitants associée à l'importante densité des zones centrales simulées dans ce scénario. Il en découle une légère augmentation des modes actifs (vélo et marche à

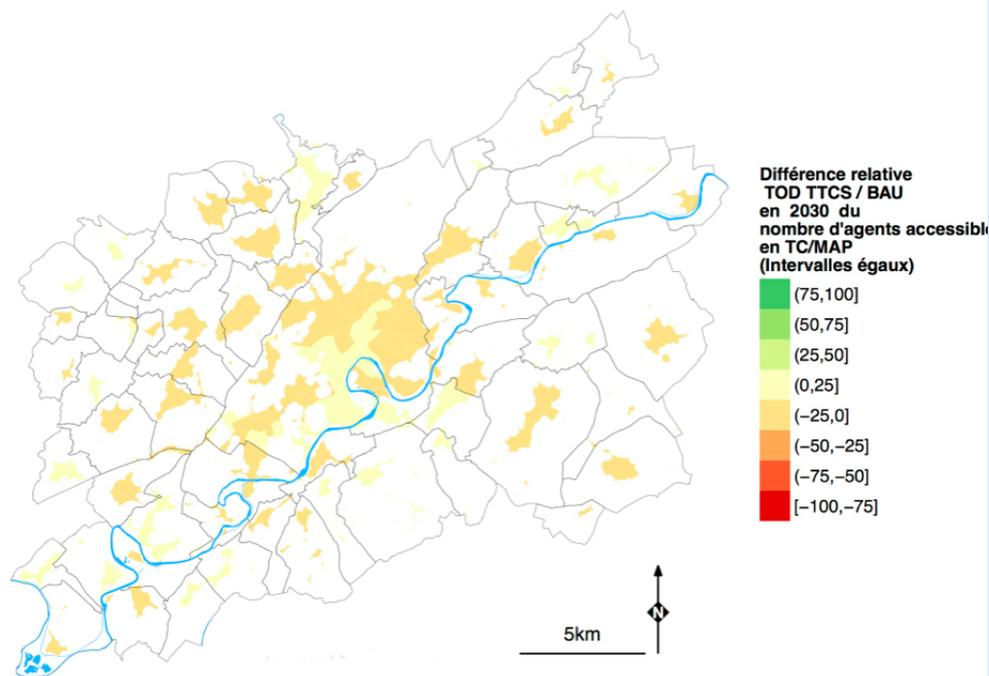


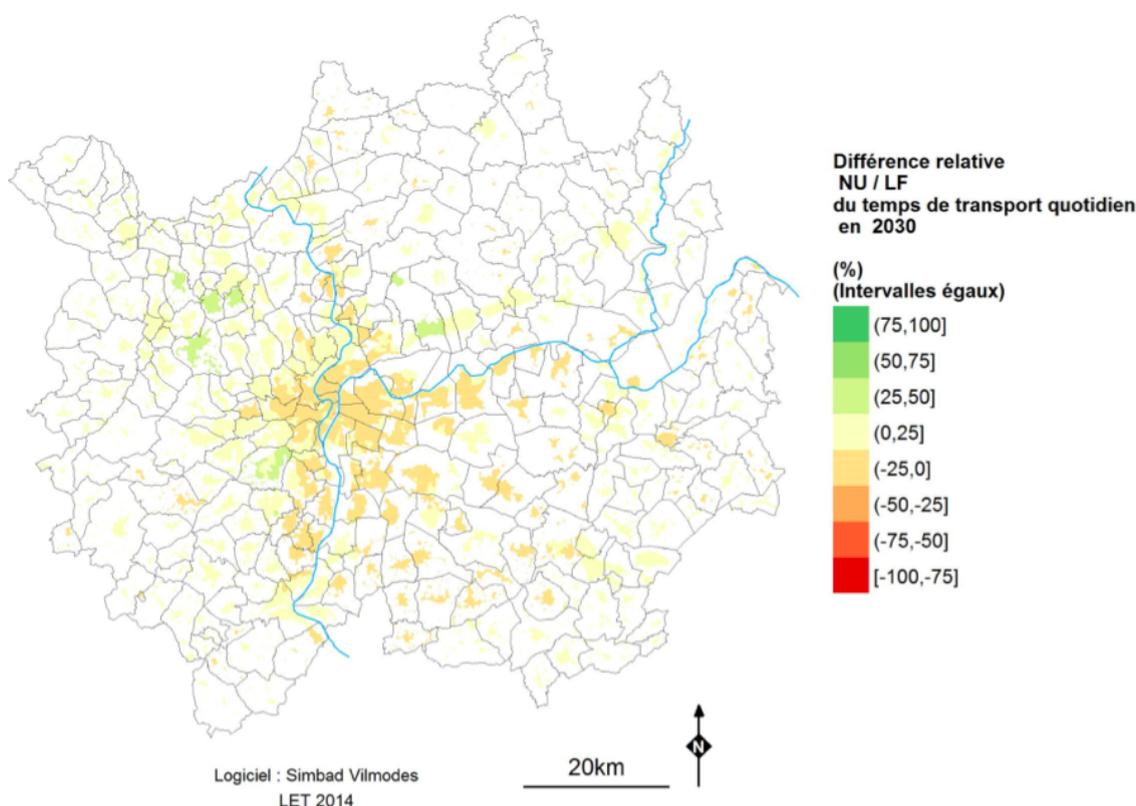
Figure 3.32

– Différentiel du nombre de personnes accessibles en 10 minutes en mode doux et en transports en commun entre le scénario Laisser faire (LF) et le scénario *Fractal oriented development* (FOD) en 2030 dans l'agglomération de Besançon.

ped) au détriment de l'utilisation de la voiture individuelle, (Figure 3.36), selon un schéma tout à fait compatible avec les attentes d'une forme urbaine plus compacte. Le scénario entraîne logiquement une diminution de l'usage de la voiture au profit des modes doux et des transports publics : une disparition complète de l'usage exclusif de la voiture (VP) peut ainsi être observée dans la commune de Besançon (Figure 3.44).

Le scénario *Fractal oriented development* (FOD) présente quant à lui un contraste plus marqué avec le laisser-faire (LF) : la mise en place du nouveau réseau en 2015 (intégrant le tramway et l'intensification des lignes de train dans l'agglomération) provoque un net report modal de tous les modes, dont l'automobile individuelle, vers les transports en commun, ainsi qu'une légère augmentation tendancielle de l'utilisation de ces derniers (Figure 3.45), révélant le fait que les nouveaux arrivants (ménages ayant déménagés dans les nouveaux logements créés dans le cadre de ce scénario) utilisent effectivement les nouveaux réseaux mis en place.

L'aire urbaine de Lyon présente des profils modaux plus diversifiés qu'à Besançon du fait de son étendue et de l'hétérogénéité des territoires qu'elle contient, allant du périurbain aux caractéristiques rurales prononcées jusqu'au centre urbain très dense et suffisamment important pour permettre la mise en œuvre d'un réseau de transport collectif performant et étendu. Comme le montre la figure 3.xx, plus on s'éloigne du centre, plus la voiture domine, avec un grand nombre de zones rouges où elle représente plus des deux tiers des déplacements. Dans ces territoires, les transports collectifs sont peu présents et leur usage apparaît marginal comme l'indique le grand nombre de zones calées sur la droite VP-MD du triangle des parts modales (Figure 3.38).

**Figure 3.33**

– Différentiel du nombre de personnes accessibles en 10 minutes en mode doux et en transports en commun entre le scénario Laisser faire (LF) et le scénario *Fractal oriented development* (FOD) en 2030 au sein de l'aire urbaine de Lyon.

A l'inverse, du fait de sa taille et de sa diversité, le centre urbain dispose d'un important réseau de transports en commun. On y retrouve dès lors de nombreuses zones au profil modal très équilibré (proche de 1/3 voiture, 1/3 transports collectifs et 1/3 modes doux), mais également des zones où les modes doux et/ou les transports collectifs sont majoritaires et la voiture en bonne partie exclue (Figure 3.39). Un zoom sur l'aire du Scot Lyonnais (Figure 3.40) permet de retrouver ces zones dans l'hypercentre, sur la Presqu'île et entre les quais du Rhône et le quartier de la Part Dieu.

Les évolutions liées aux deux scénarios Laisser-faire (LF) et Renouvellement urbain compact (RUC) ne laissent apparaître que de faibles changements par rapport à ce premier constat car l'offre de transport évolue peu dans ces deux cas. Par contre, même analysé à un niveau global, le scénario de *Fractal oriented development*, avec des pôles urbains secondaires irrigués par un réseau de tram-train, provoque des évolutions sensibles dans les simulations. Ainsi, la part modale des transports collectifs passe de 18% en 2010 à 20% en 2030 au niveau de l'aire urbaine, avec une variation plus sensible en termes de kilomètres parcourus qui s'élèvent quant à eux de 13 à 17%. Cette augmentation de la part des distances parcourues en transports collectifs se retrouve dans toutes les zones de l'aire urbaine, passant de 27 à 30% dans le centre de Lyon-Villeurbanne, de 18 à 22% dans le reste du périmètre du Scot lyonnais et, enfin et surtout, de 1 à 5% dans les territoires périurbains plus éloignés. Cette évolution provoque un léger décalage dans les 10 catégories de zones du triangle des parts modales (Figure 3.41), et se retrouve très bien dans un

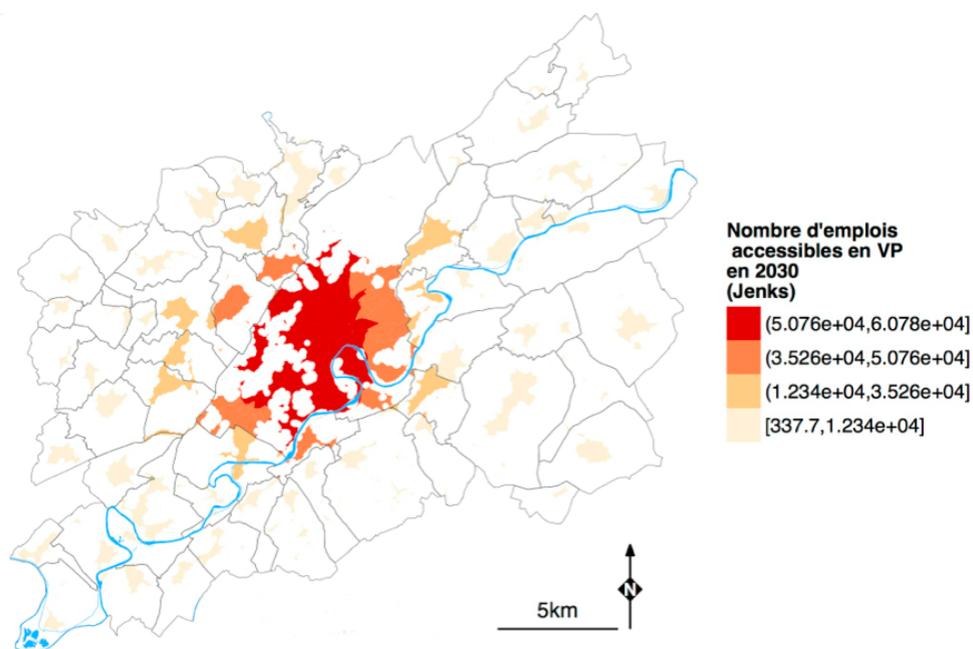


Figure 3.34 – Nombre d’emplois accessibles avec 0,5 litre de carburant selon le scénario Laisser faire (LF) en 2030 à Besançon.

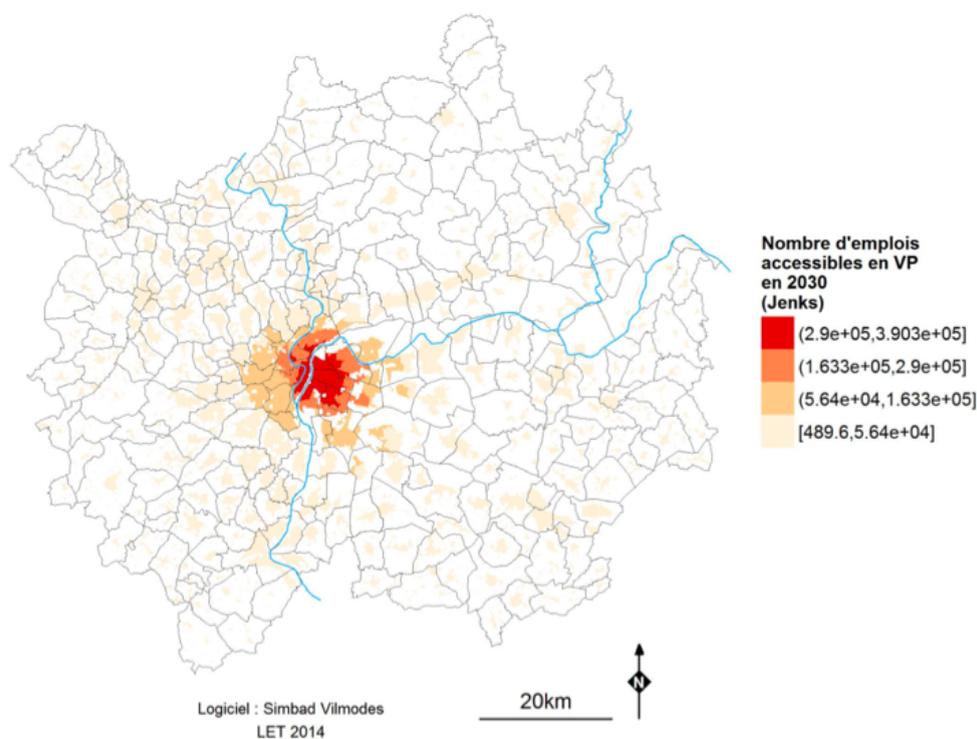


Figure 3.35 – Nombre d’emplois accessibles avec 0,5 litre de carburant selon le scénario Laisser faire (LF) en 2030 à Lyon.

tableau agrégé (Figure 3.42).

Ainsi, dans tous les scénarios, le mode de transport principalement utilisé dépend fortement

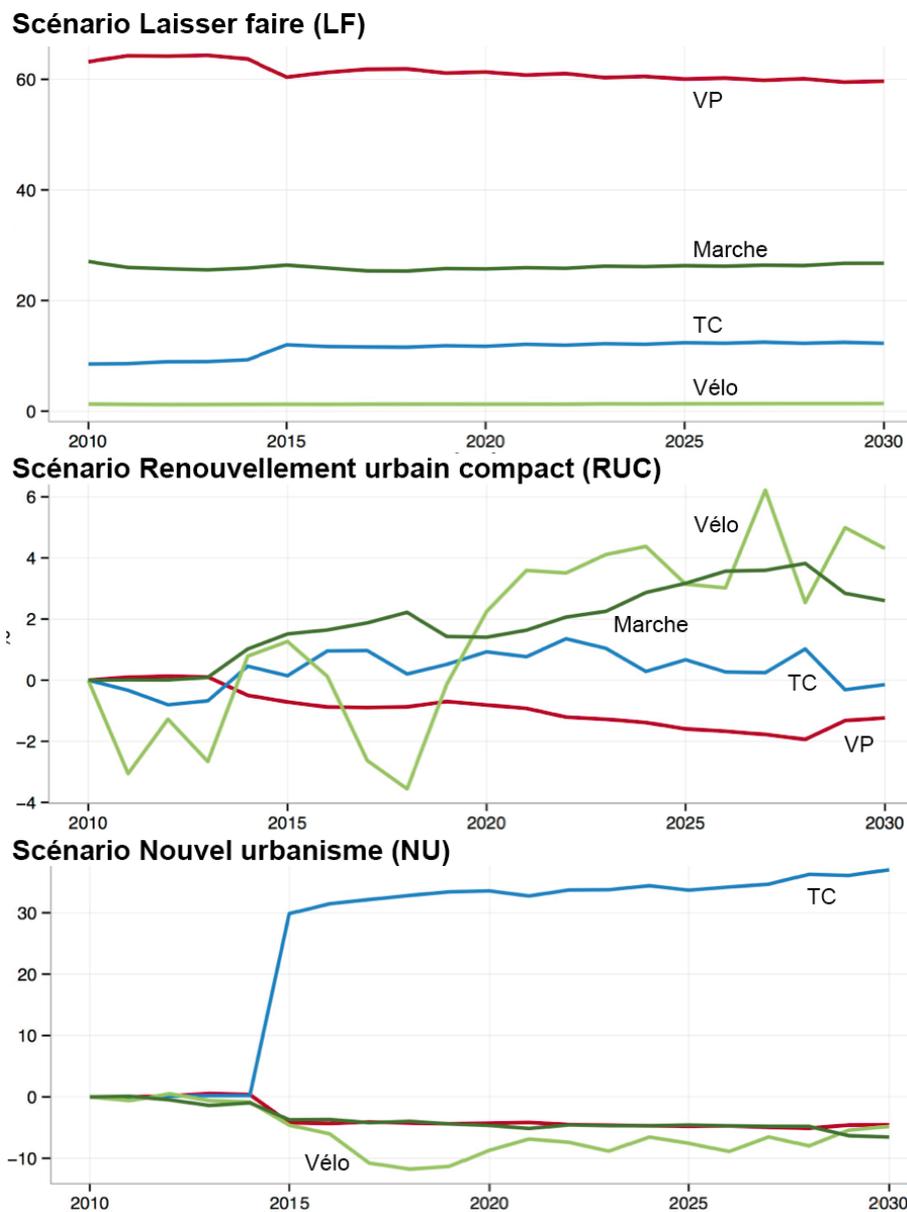


Figure 3.36 – Evolution des parts modales (2010-2030) selon les trois scénarios

de la structure spatiale du réseau et de la forme urbaine générée. Le transport en commun n'est jamais utilisé majoritairement (à l'échelle d'un IRIS), mais l'usage de l'automobile est dominant essentiellement dans les espaces périurbains et sur les franges de l'agglomération. Les modes doux sont quant à eux fortement présents dans l'hypercentre, et une combinaison de ces deux extrêmes dans les espaces intermédiaires du centre et de la banlieue proche.

De surcroît, le contraste du scénario *Fractal oriented development* (FOD) avec le scénario laisser-faire (LF) est non seulement plus marqué en termes de points de report modal, mais il fait également apparaître des comportements de mobilités fortement différenciés dans l'espace. Les modes de déplacement auparavant exclusivement urbains apparaissent en zone périurbaine, avec soit une dominante de modes motorisés (voitures ou transport en commun), soit un partage plus équilibré entre voiture, transport en commun et modes doux. Cette diffusion spatiale de modes de déplacement alternatifs est observée

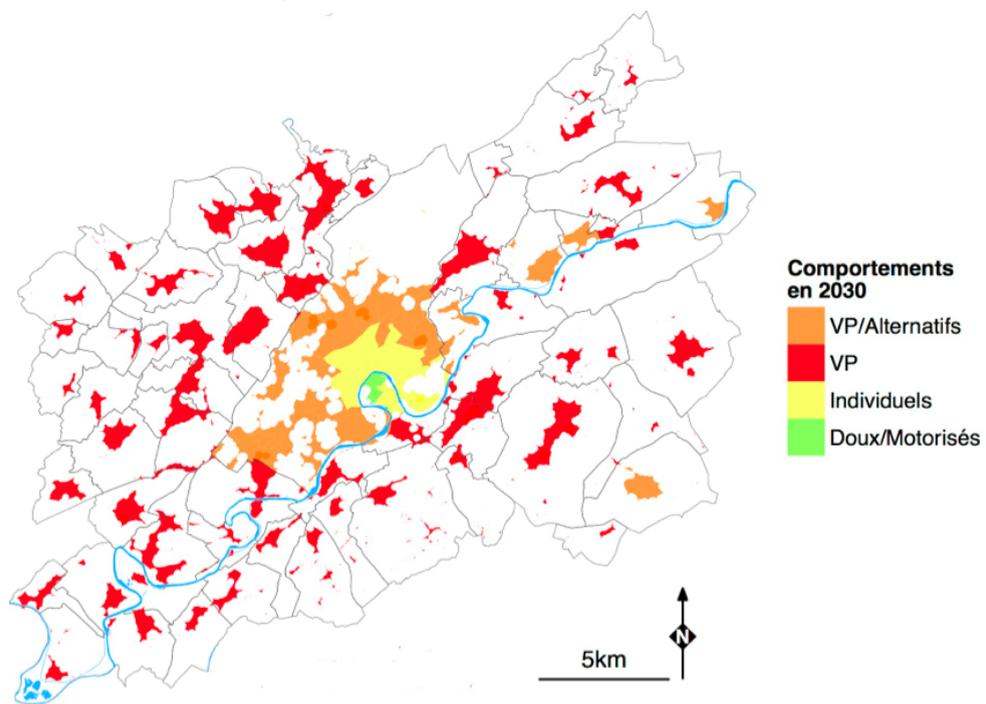


Figure 3.37 – Parts modales selon le scénario Laisser faire (LF) en 2030

jusque dans dans les communes les plus éloignées de la ville-centre.

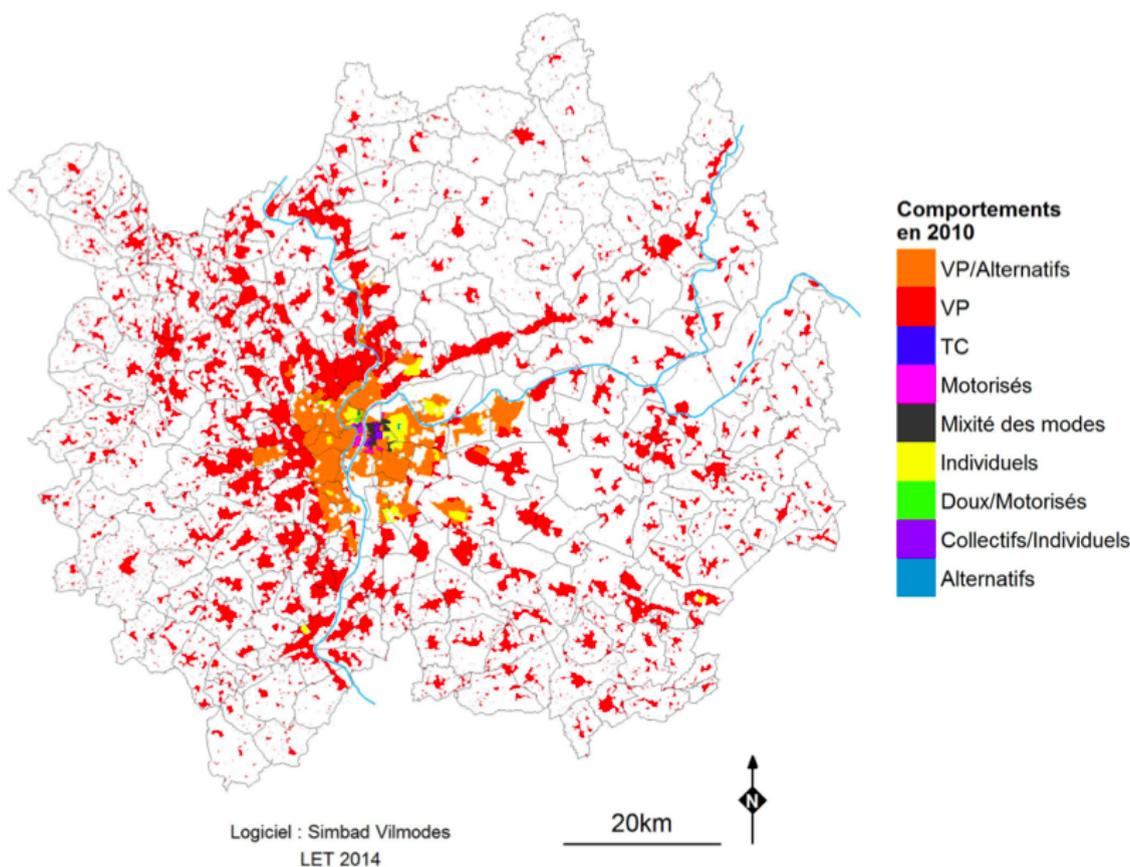


Figure 3.38 – Parts modales sur l’aire urbaine lyonnaise en 2010

3.3.3.3. Distances et consommations énergétiques

Comme nous l’avons relevé, la part modale n’est qu’une indication de l’efficacité d’un scénario sur sa capacité à infléchir l’usage de la voiture individuelle. Il doit être complété par l’analyse des distances parcourues par l’ensemble des usagers de l’automobile individuelle. Traduite en kilomètres, cette distance apparaît en effet comme un indicateur pertinent pour évaluer la capacité de chaque scénarios à limiter les consommations d’énergie, les émissions de gaz à effet de serre et de polluants, c’est-à-dire ses atteintes à l’environnement . Pour les évaluer, il convient de s’intéresser exclusivement à l’usage de l’automobile individuelle, et de mesurer la mobilité qui lui est associée dans chaque scénario (Figures 3.46 et 3.47).

L’analyse de ces distances quotidiennes montre que le scénario de renouvellement urbain compact (RUC) et le scénario *Fractal oriented development* (FOD) parviennent à diminuer nettement le kilométrage en automobiles (avec une performance à peu près équivalente pour les deux scénarios en 2030). Quoique radicalement différents, les formes urbaines et les systèmes de transport mis en place dans chacun de ces scénarios semblent tous deux performants pour réduire les atteintes environnementales, et mettre les deux agglomérations étudiées sur la voie du Facteur 4.

Les gains réalisés, c’est-à-dire la diminution du nombre de kilomètres parcourus, ne sont toutefois pas identiques pour chaque zone de résidence. Dans le cas du scénario de renouvellement urbain compact (RUC), ce sont avant tout les zones centrales et de la périphérie

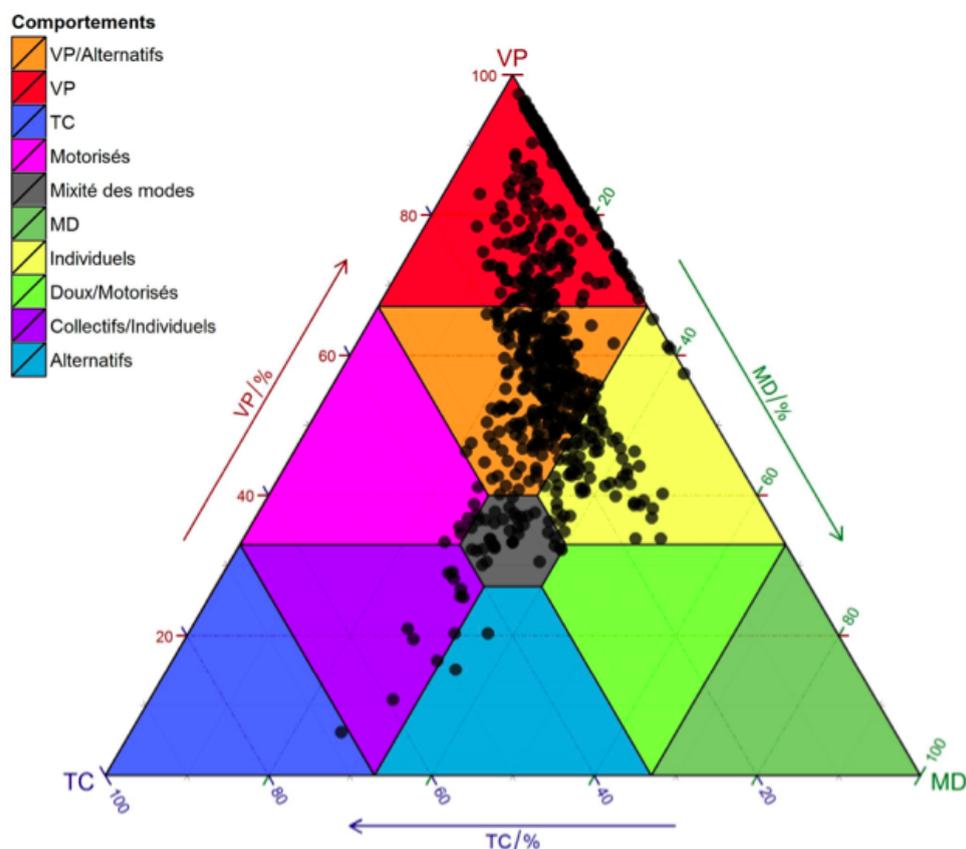


Figure 3.39 – Parts modales par IRIS sur l’aire urbaine lyonnaise en 2010

immédiate de ce centre qui enregistrent une baisse importante du nombre de kilomètres parcourus (Figures 3.48 et 3.49). Dans le cas du scénario *Fractal oriented development* (FOD), les gains les plus importants (zones orangées) sont obtenus dans les nouveaux centres et aux voisinages des nouveaux centres développés dans le scénario, et parfois très éloignés de la boucle bisontine et de la presqu’île lyonnaise (Figures 3.50 et 3.51).

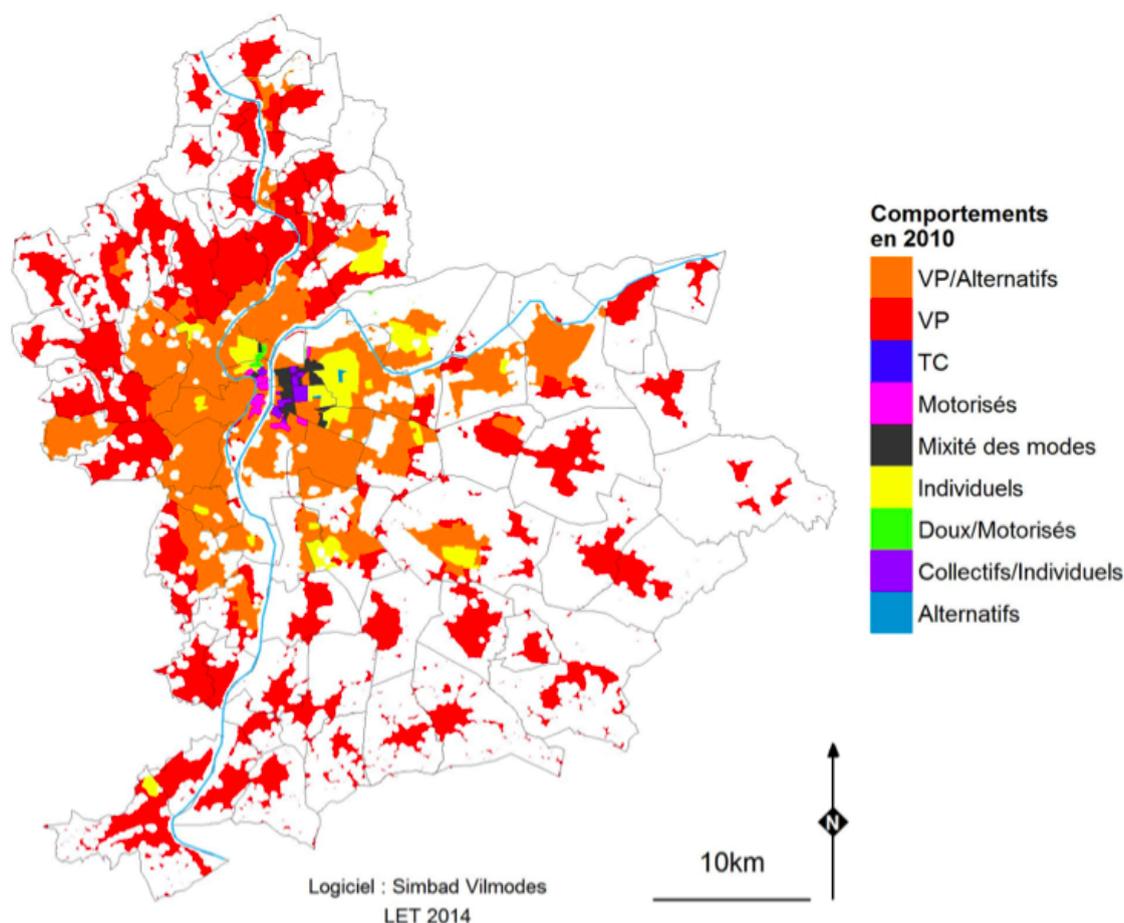


Figure 3.40 – Parts modales au sein du territoire du SCoT de Lyon en 2010

3.3.4 Pratiques et relations sociales

Si les résultats présentés dans le point précédent semblent encourageants pour réfléchir à une politique d'urbanisation et de transport plus vertueuse, la durabilité d'un système urbain ne peut pas être appréciée uniquement sur un plan environnemental. En effet, si chacun des deux scénarios parviennent à diminuer la consommation d'espace agricole, à préserver les trames vertes et bleues, à supporter la croissance de la population et à réduire de manière notable les kilomètres parcourus en voiture particulière, il est également fondamental d'analyser les effets de ces résultats d'un point de vue économique et social, en particulier sur le plan de la mixité et de l'effort budgétaire qu'il génèrent pour les ménages.

3.3.4.1. Revenus

La cartographie de la part des ménages sous le revenu médian en 2010 (Figure 3.52) montre que Besançon présente un centre moyennement aisé, entouré des zones de grands ensembles plutôt pauvres, et d'un espace périurbain relativement aisé.

La continuation de cette tendance selon le scénario de laisser-faire (LF) en 2030 révèle que ces inégalités socio-spatiales ne se résorbent pas spontanément (Figure 3.53). Les différences entre la situation de 2010 et la situation de 2030 indiquent une légère résorption

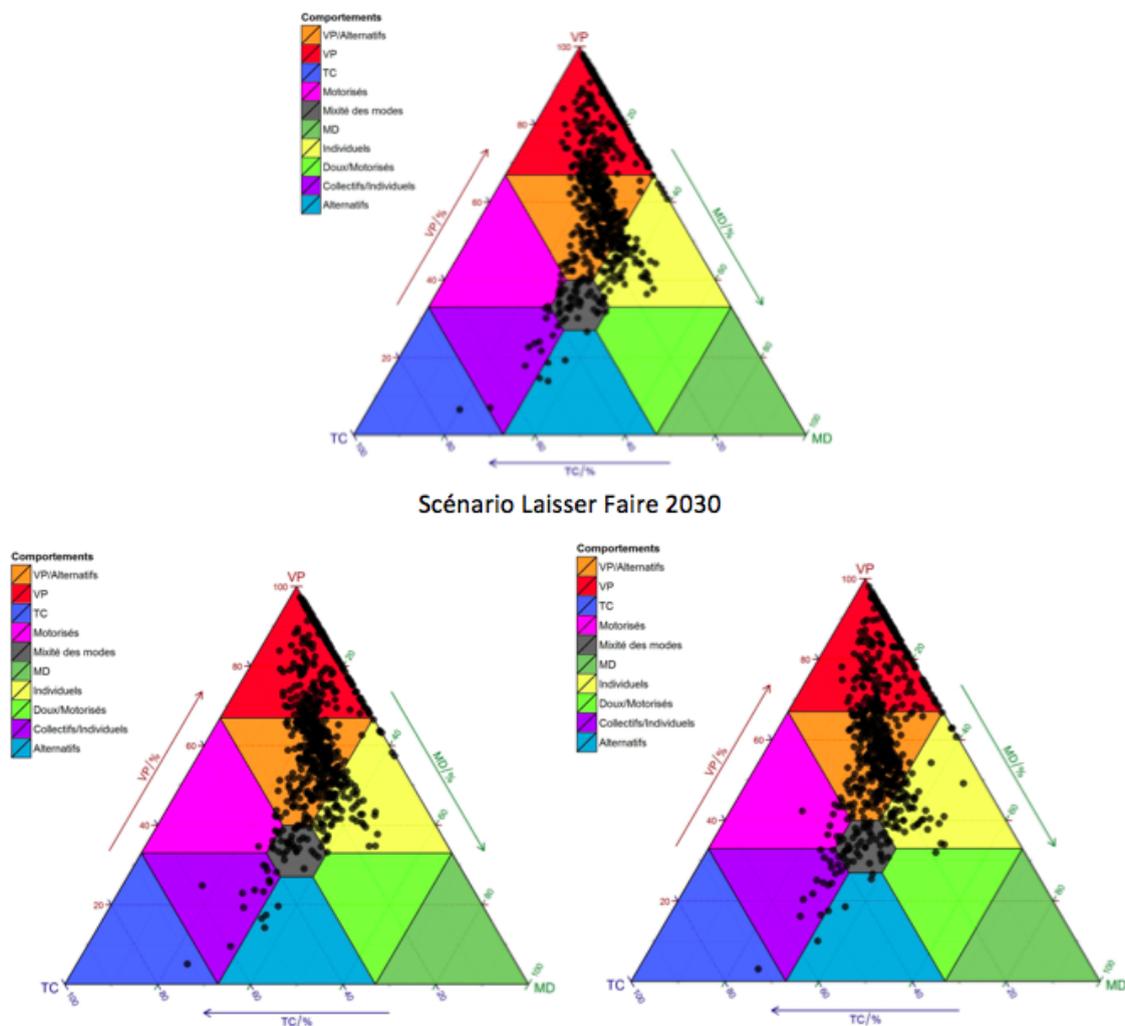


Figure 3.41 – Parts modales par IRIS sur l’aire urbaine lyonnaise en 2030 suivant les trois scénarios.

des inégalités dans l’hyper-centre, mais témoignent en revanche de leur augmentation assez nette dans le voisinage immédiat du centre, même si cette lecture doit évidemment être nuancée par la stagnation des revenus élevés et l’augmentation des revenus faibles et moyens que nous avons déjà soulignées.

Par rapport à cette situation de base, le scénario de renouvellement urbain compact (RUC) a relativement peu d’effet sur la répartition des faibles revenus, et semble provoquer une légère augmentation des inégalités au centre, contre-balançée par leur diminution dans le reste de l’agglomération (Figure 3.54). On observe donc de manière modérée l’effet décrit par le modèle monocentrique où les ménages aisés, insensibles au coût de la mobilité, peuvent se localiser plus loin des aménités centrales. L’absence de développement résidentiel en dehors du centre influe probablement lui aussi sur de double effet.

Le scénario *Fractal oriented development* (FOD) présente quant à lui un effet de rééquilibrage territorial un peu plus prononcé que le renouvellement urbain compact : les zones orangées (sur la carte) prédominent, traduisant une diminution de la prédominance de ménage à revenus faibles dans ces zones (Figure 3.55). A l’inverse, les zones de rééquilibrage

Situation initiale en 2010

	vp	tc	md
Lyon-Villeurbanne	0,61	0,27	0,13
Scot Lyon	0,76	0,18	0,06
Périurbain	0,96	0,01	0,03
Aire urbaine	0,81	0,13	0,06

Situation en 2030

	Laisser-Faire			Renouvellement Urbain Compact			Fractal oriented development		
	vp	tc	md	vp	tc	md	vp	tc	md
Lyon-Villeurbanne	0,59	0,27	0,14	0,58	0,27	0,14	0,56	0,30	0,14
Scot Lyon	0,76	0,18	0,06	0,76	0,18	0,06	0,72	0,22	0,06
Périurbain	0,96	0,01	0,03	0,96	0,01	0,03	0,92	0,05	0,03
Aire urbaine	0,81	0,13	0,06	0,81	0,13	0,06	0,76	0,17	0,06

Figure 3.42 – Evolution globale des parts modales, exprimées en passagers.kilomètres, au sein de l’aire urbaine de Lyon (vp = voiture particulière; tc = transports en commun; md = modes doux)

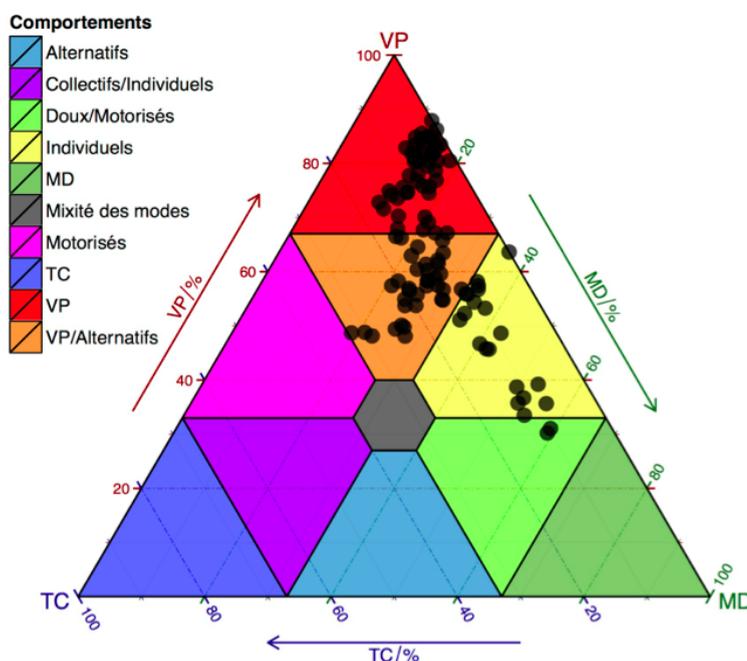


Figure 3.43 – Parts modales par IRIS selon le scénario Laisser faire (LF) en 2030 à Besançon

témoignent d’une tendance inverse, puisque les zones périurbaines peuplées de ménages relativement aisés dans le scénario de renouvellement accueillent proportionnellement plus de ménages modestes (zones vertes sur la carte). Le scénario *Fractal oriented development* (FOD) semble ainsi opérer une redistribution plus uniforme des ménages modestes dans ces zones, en décloisonnant les zones de pauvreté du centre et le phénomène de périurbanisation des ménages aisés.

La répartition des ménages au sein de l’aire urbaine lyonnaise en fonction de leur revenu

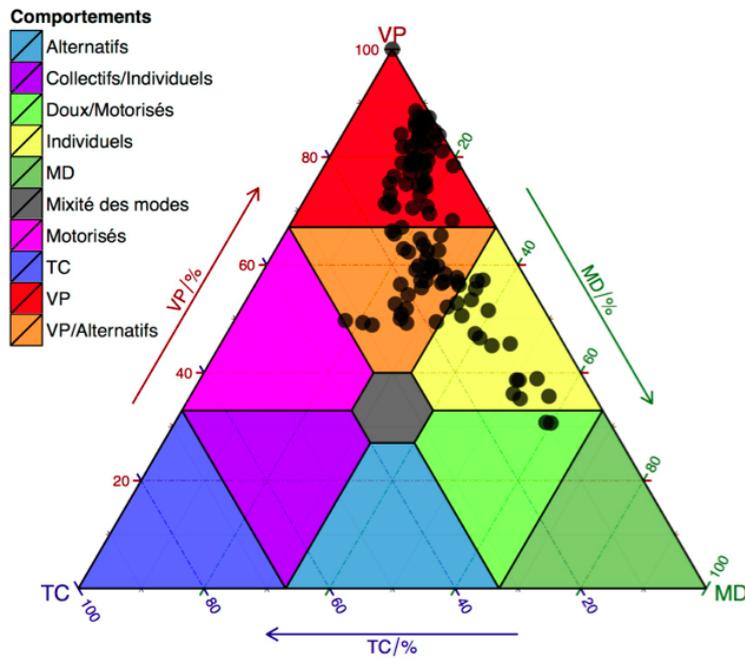


Figure 3.44 – Parts modales par IRIS selon le scénario Renouvellement urbain compact (RUC) en 2030 à Besançon

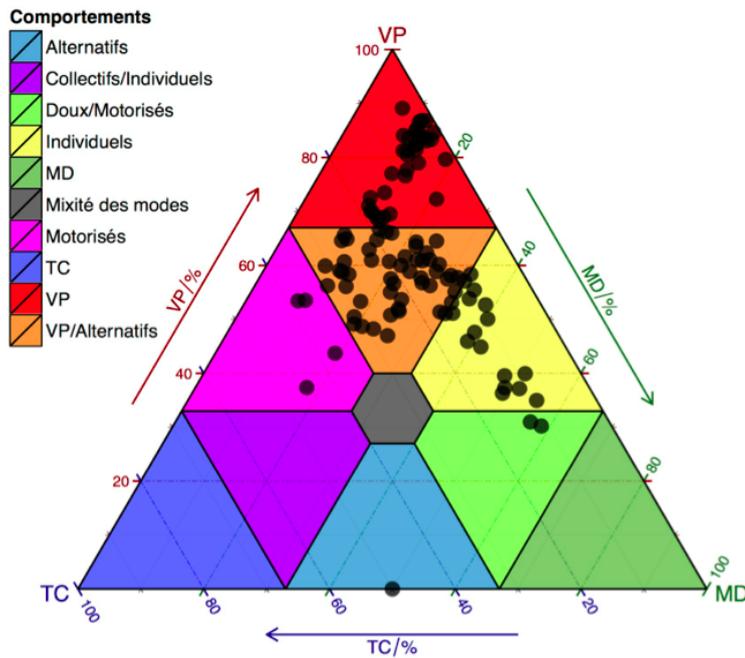


Figure 3.45 – Parts modales par IRIS selon le scénario *Fractal oriented development* (FOD) en 2030 à Besançon

est marquée par une double opposition, entre le centre et sa périphérie d’une part, et entre l’Est et l’Ouest d’autre part (Figure 3.56). Ainsi, les membres des ménages modestes du premier quintile de revenu sont sous-représentés dans l’hypercentre et en première couronne Ouest (16%), alors qu’ils sont plus nombreux en première couronne Est (26%); la carte des personnes appartenant aux ménages aisés du dernier quintile de revenu est

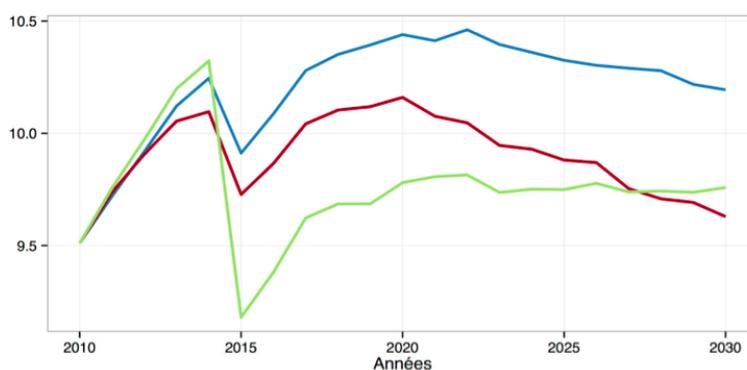


Figure 3.46 – Distance quotidienne parcourue en automobile individuelle en 2030 selon chaque scénario (LF en bleu, RUC en rouge et FOD en vert)

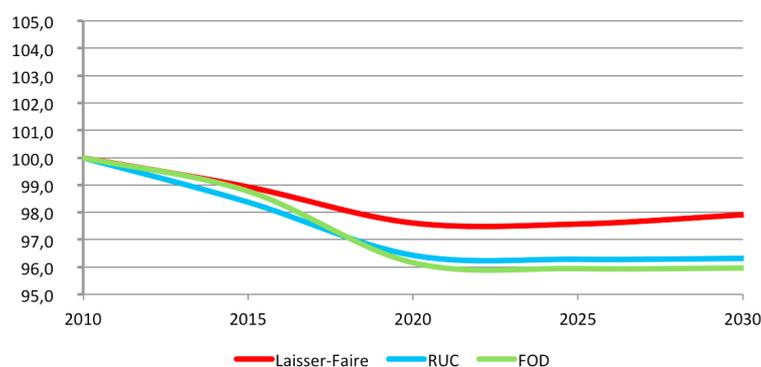


Figure 3.47 – Evolution du kilométrage automobile par personne et par jour au sein de l'aire urbaine de Lyon suivant les trois scénarios LF, RUC et FOD (13,4 km/j/pers, base 100 en 2010).

symétrique : elles constituent respectivement 31 et 21% de la population de l'hypercentre et de la première couronne Ouest, et seulement 13% de la première couronne Est.

Cette structure se conserve tout au long des trois scénarios, avec cependant un léger rééquilibrage entre les premières couronnes Est et Ouest : les proportions 26/16% des populations modestes de ces deux couronnes passent à 24/17% en 2030, quel que soit le scénario ; à l'inverse, la proportion de personnes aisées de la première couronne Ouest baisse légèrement de 25 à 23% au cours des 20 années de simulation (cf. Figure 3.57), établie à partir du scénario Laisser Faire, sachant que les deux autres scénarios donnent les mêmes tendances).

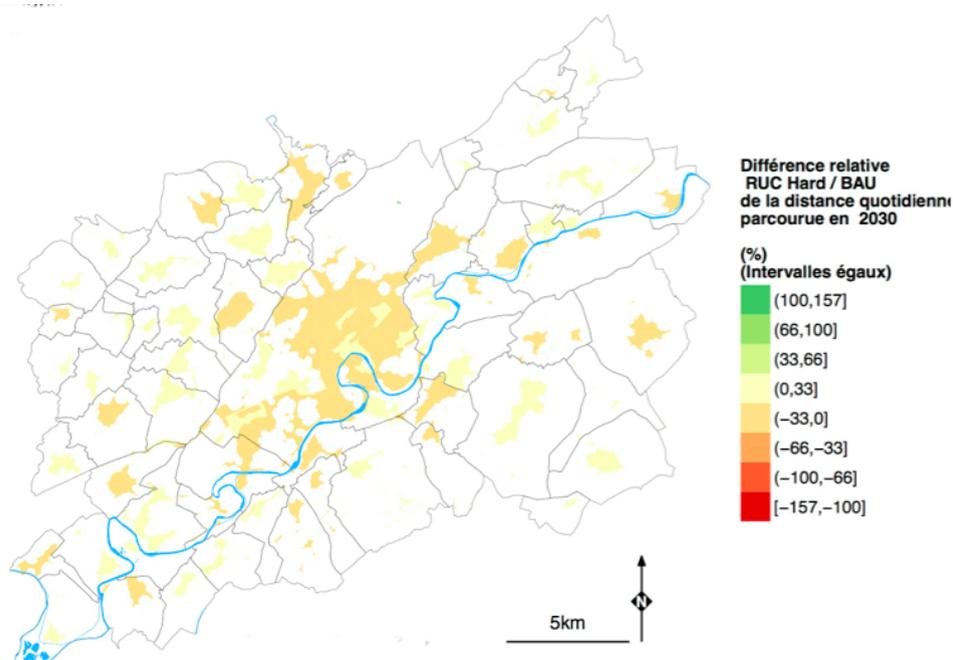


Figure 3.48 – Différentiel de consommation énergétique en 2030 entre les scénarios Renouvellement urbain compact (RUC) et LF à Besançon

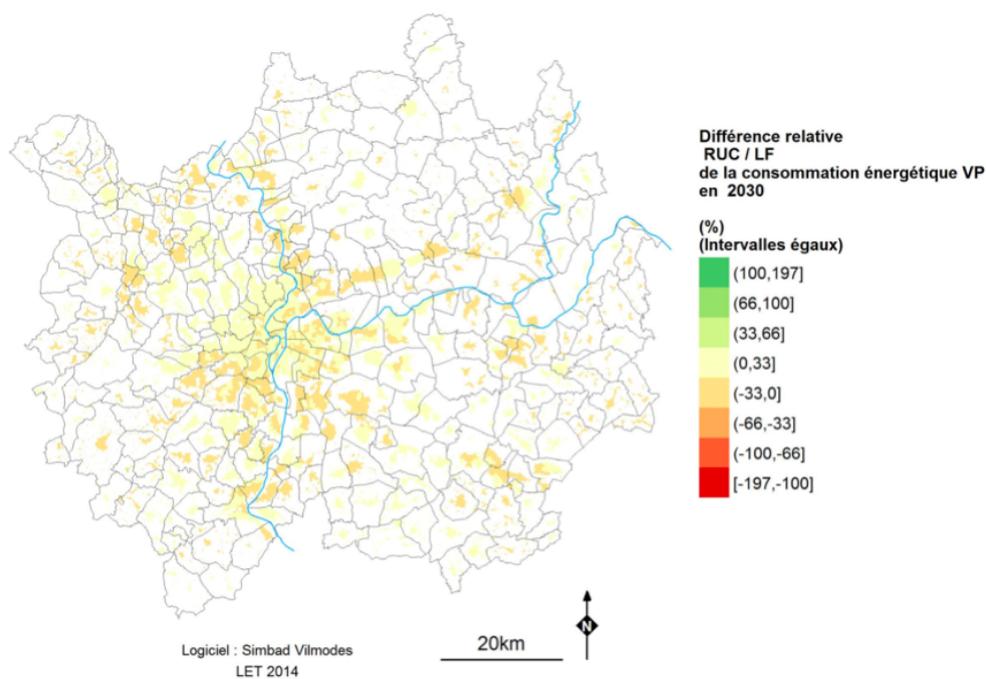


Figure 3.49 – Différentiel de consommation énergétique en 2030 entre les scénarios Renouvellement urbain compact et Laisser-Faire au sein de l'aire urbaine de Lyon

3.3.4.2. Temps de transport

L'analyse des temps de transport constitue un indicateur important pour évaluer l'effort réalisé par les ménages pour effectuer leur planning d'activités quotidiennes, en fonction

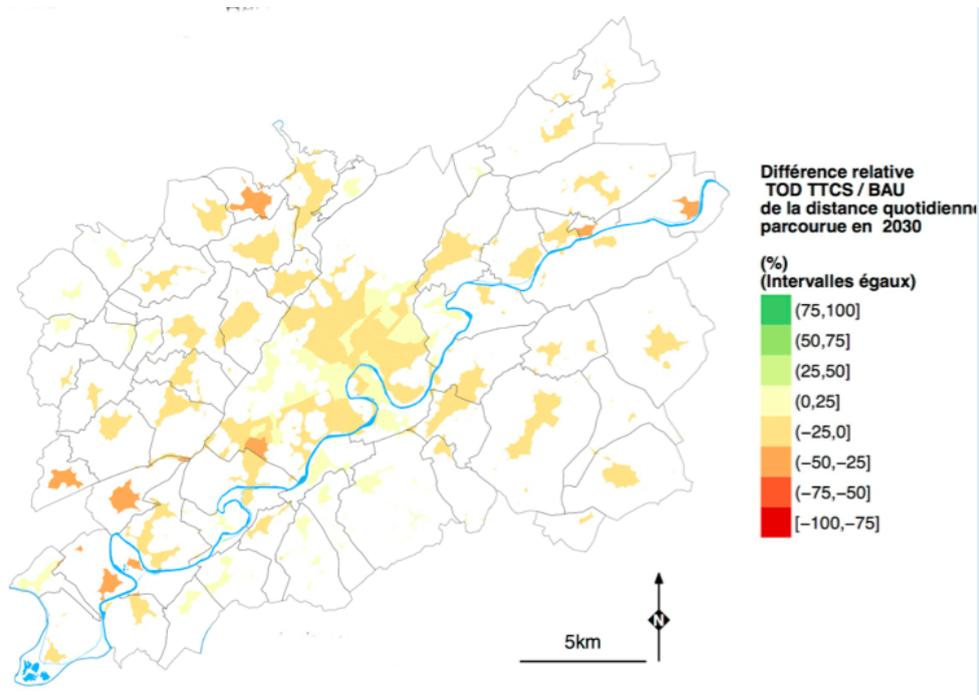


Figure 3.50 – Différentiel de consommation énergétique en 2030 entre les scénarios *Fractal oriented development* (FOD) et LF à Besançon

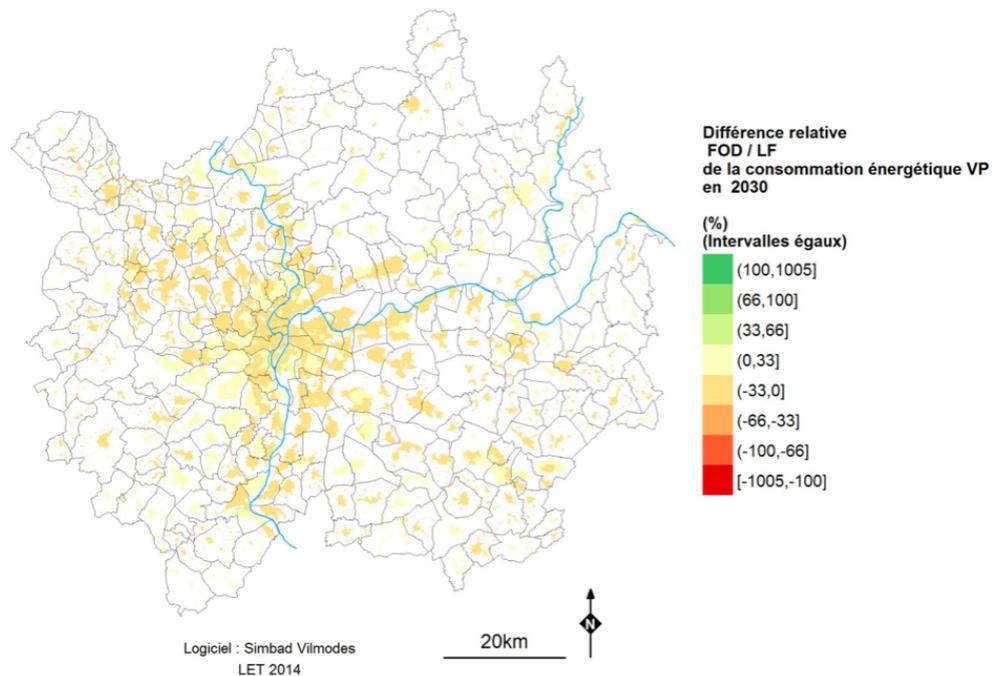


Figure 3.51
– Différentiel de consommation énergétique en 2030 entre les scénarios *Fractal oriented development* (FOD) et Laisser-Faire au sein de l'aire urbaine de Lyon

de leur lieu de résidence. La Figure 3.58 qui résulte de cette analyse pour la période 2010-2030 à Besançon montre un net avantage pour le scénario de renouvellement urbain compact (RUC) : en regroupant les habitants au centre, les temps de transport, les temps

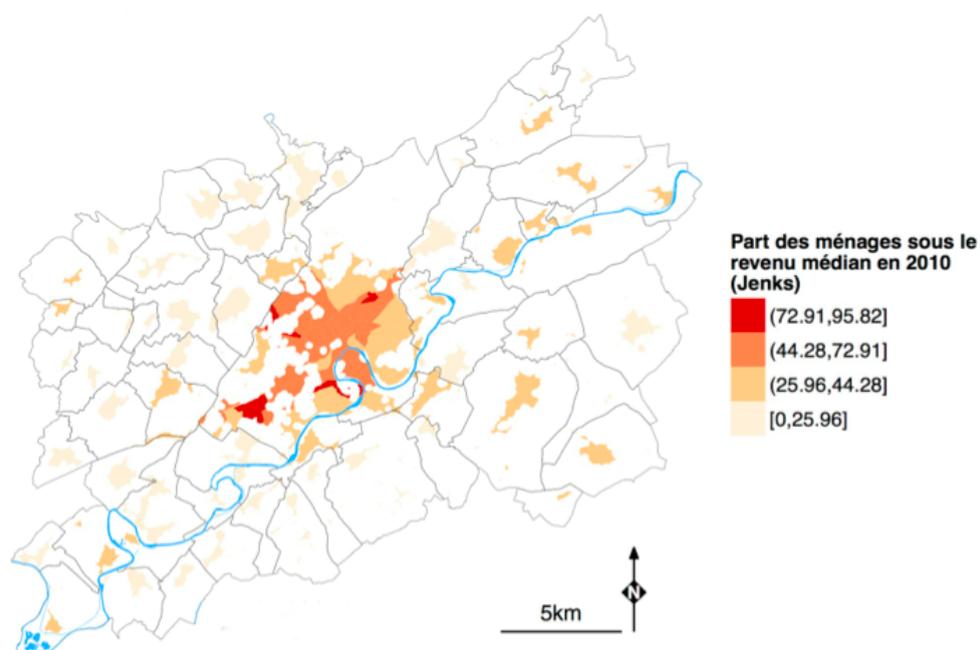


Figure 3.52 – Part des ménages sous le revenu médian en 2010 selon le scénario Laisser faire (LF)

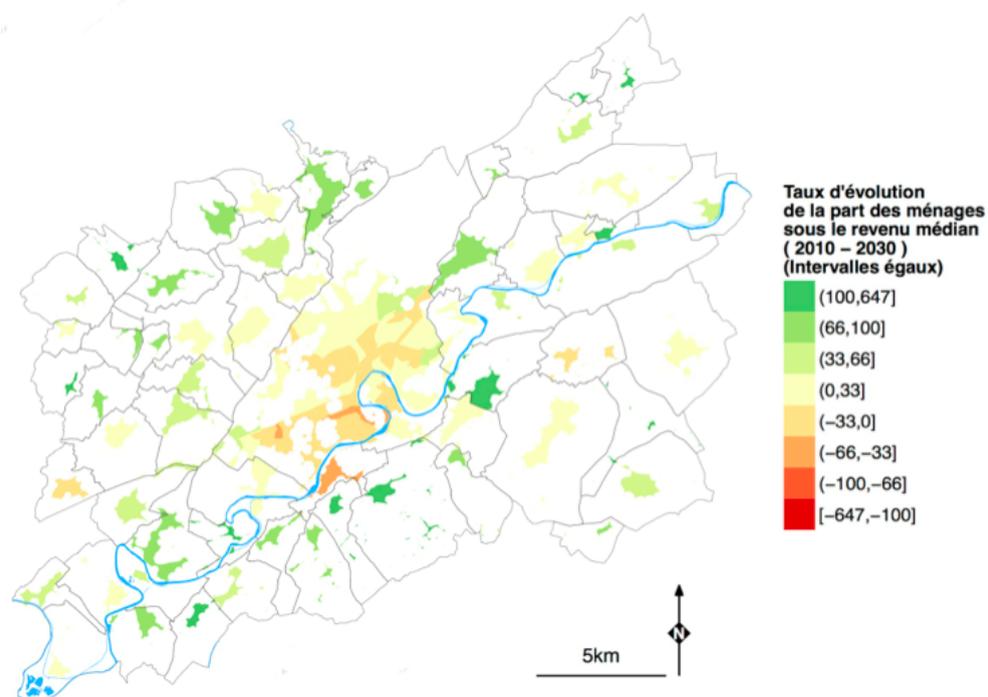


Figure 3.53 – Evolution de la part des ménages sous le revenu médian en 2030 selon le scénario Laisser faire (LF)

de transport globaux sont mécaniquement réduits. On peut noter également que le scénario *Fractal oriented development* (FOD) n'induit pas d'accroissement de ce temps de transport, malgré le développement très restreint de l'urbanisation dans la zone centrale : le système de transport fondé sur l'usage de trains et de transports en commun rapides est utilisé

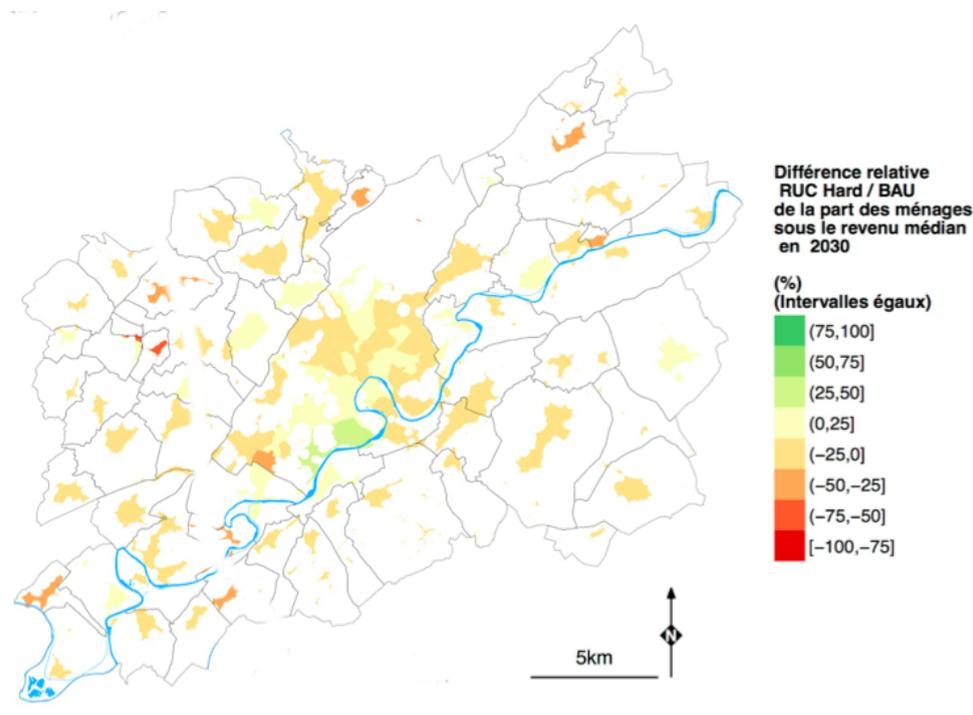


Figure 3.54 – Evolution de la part des ménages sous le revenu médian en 2030 selon le scénario Renouvellement urbain compact (RUC)

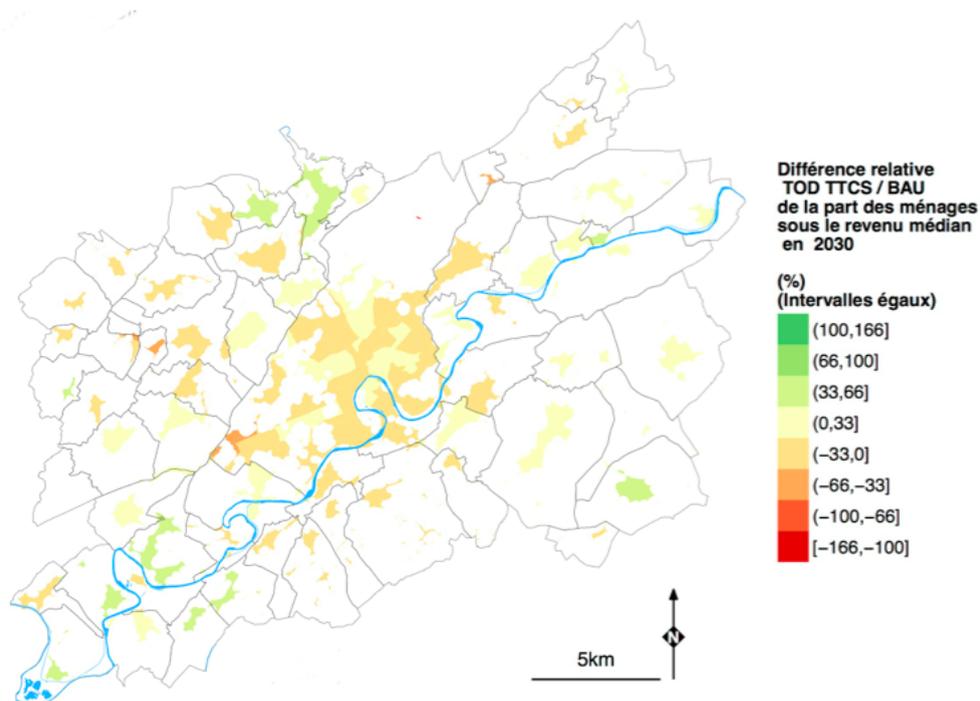


Figure 3.55 – Evolution de la part des ménages sous le revenu médian entre 2010 et 2030 selon le scénario *Fractal oriented development* (FOD)

efficacement : il permet une croissance urbaine dans des zones éloignées du centre sans induire de pénalité particulière pour les habitants.

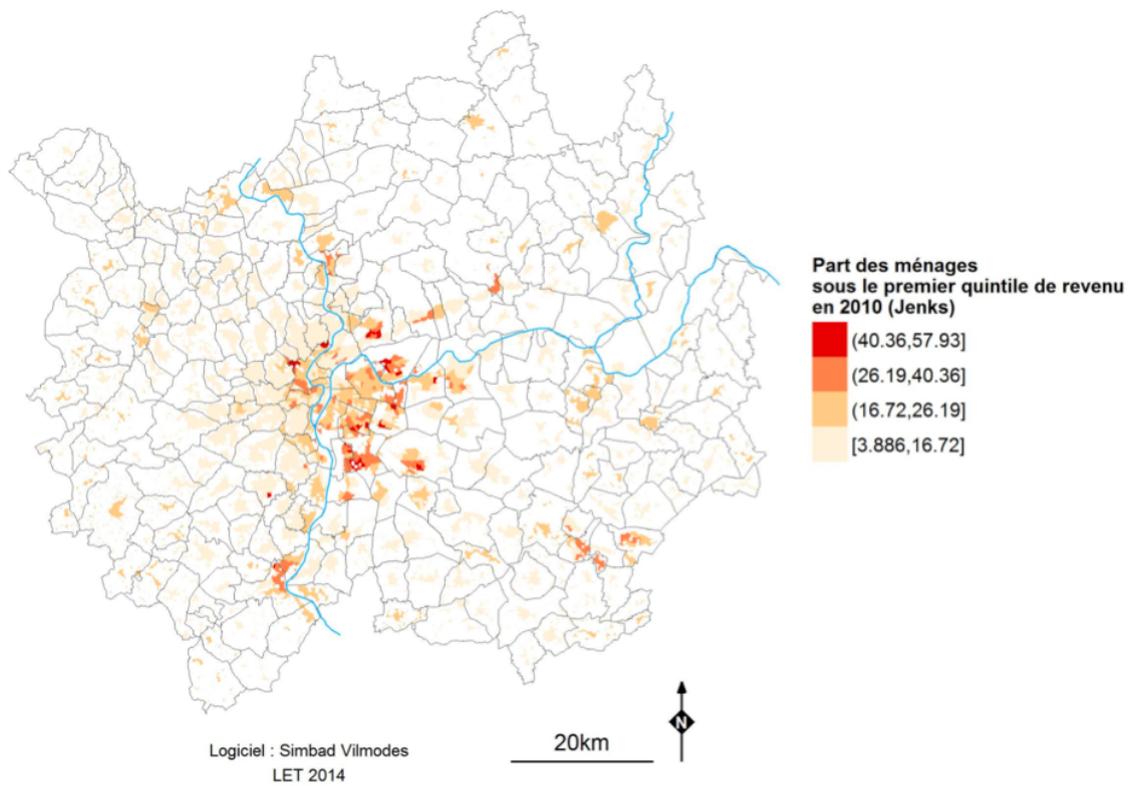


Figure 3.56 – Part des ménages appartenant au premier quintile de revenu dans chaque IRIS de l’aire urbaine de Lyon en 2010

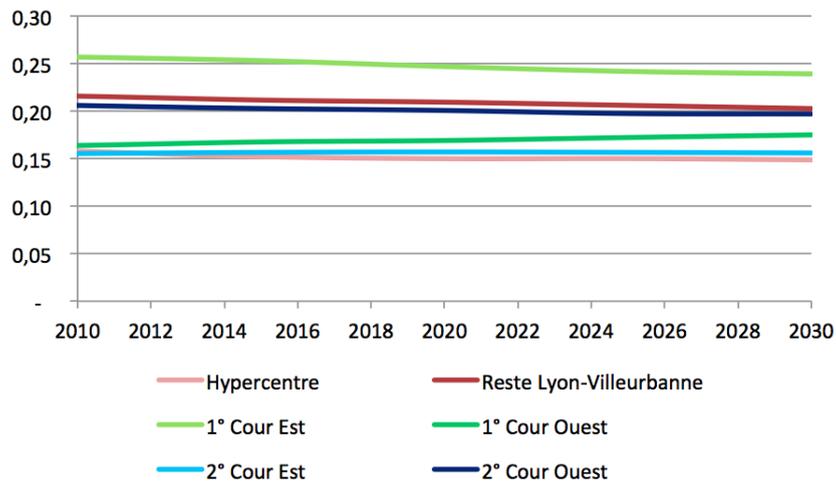


Figure 3.57 – Evolution de la part des ménages appartenant au premier quintile de revenu par grandes zones de l’aire urbaine de Lyon suivant le scénario Laisser Faire (LF)

D’un point de vue géographique, la distance au centre n’est que partiellement corrélée au temps de trajet dans le scénario du laisser faire (LF) : la structure du réseau de transport, ainsi que les barrières naturelles fortement présentes dans l’agglomération de Besançon (Doubs, plateaux et collines), « déforment » et allongent des zones dans lesquelles les individus effectuent des trajets très différents avec des temps de transport globalement

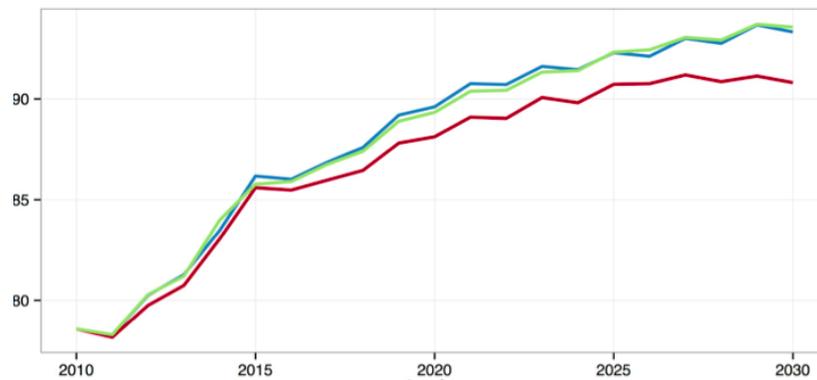


Figure 3.58 – Evolution du temps de transport quotidien entre 2010 et 2030 selon chaque scénario (LF en bleu, RUC en rouge et FOD en vert)

similaires (Figure 3.59).

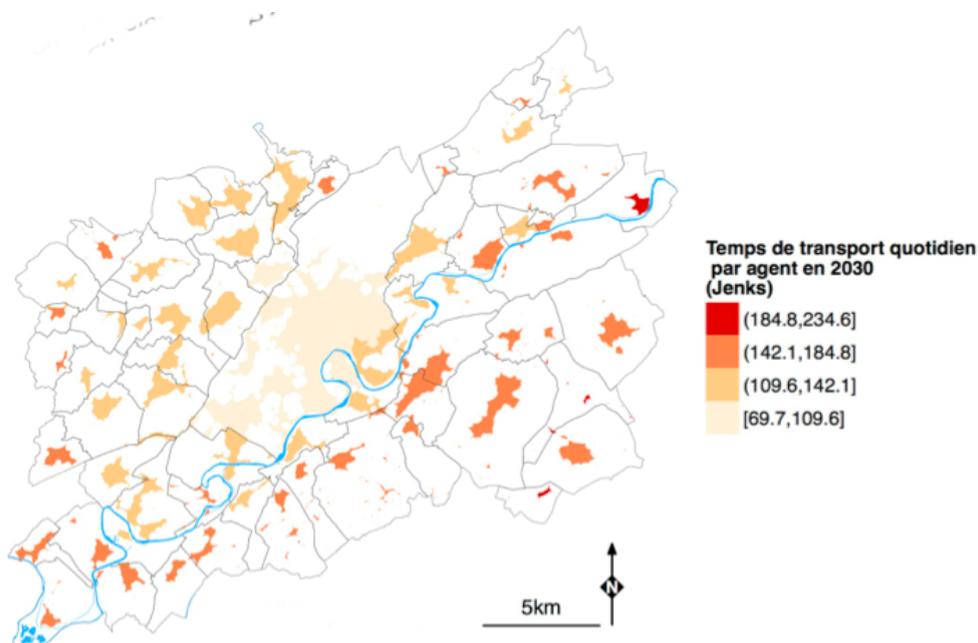


Figure 3.59 – Budget temps en 2030 selon le scénario Laisser faire (LF)

En revanche, si, comme nous l'avons déjà souligné, le scénario du renouvellement urbain compact (RUC) diminue globalement le temps de trajet, il ne modifie que marginalement la structure spatiale de ces temps de trajet. Le scénario *Fractal oriented development* (FOD) présente quant à lui des durées de déplacement à peu près similaires, mais plus redistribuées d'un point de vue spatial, notamment pour les ménages qui se déplacent le moins longtemps. Ainsi, la carte des différences de temps de trajet avec le scénario de laisser-faire (LF) présente des zones de baisse (en orange sur la carte), qui coïncident avec le réseau de transport en commun, révélant ainsi que sa bonne performance pour les longues distances est bénéfique (Figure 3.60).

Dans le cas lyonnais, le budget temps-transport quotidien initial est en moyenne de 54 minutes par personne et par jour, avec des différences sensibles suivant les grandes zones de l'aire urbaine (Figure 3.61). Dans le centre de Lyon-Villeurbanne, les distances à parcourir

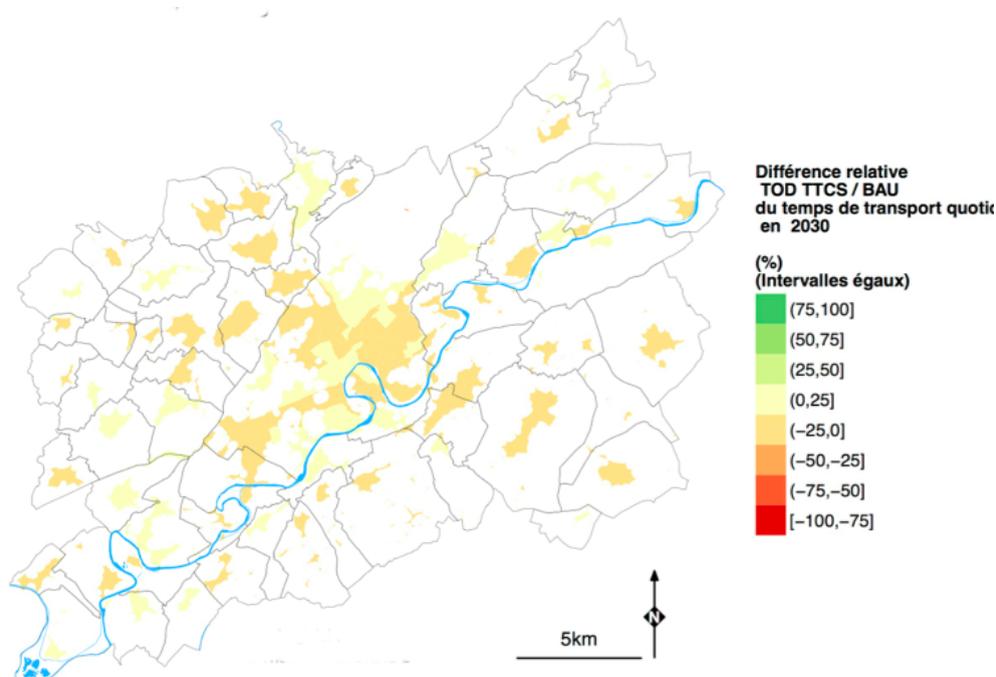


Figure 3.60 – Différentiel du budget temps en 2030 selon le scénario *Fractal oriented development* (FOD) par rapport au scénario Laisser faire (LF)

en moyenne plus courtes que dans le reste du territoire permettent de contenir ce budget temps dans la moyenne, avec 53 minutes/pers/jour. En première couronne, les distances s’allongent et les vitesses, tous modes confondus, restent limitées. Ainsi, le budget temps moyen est plus fort que dans le reste du territoire, avec 61 minutes/pers/jours. En périurbain, les distances s’allongent encore mais le recours important à la voiture, le bon niveau moyen des vitesses et une optimisation accrue du nombre de déplacements par rapport aux zones urbaines plus centrales permettent de contenir largement le budget temps moyen des habitants, qui s’établit à 43 minutes/pers/jour.

Les simulations révèlent un budget temps qui reste très stable entre 2010 et 2030 pour les trois scénarios. En effet, il peut y avoir de légères évolutions de l’ordre de 1 à 2% des budgets temps par grandes zones (Lyon-Villeurbanne, reste du territoire du Scot lyonnais, périurbain) mais elles se compensent entre elles, avec par ailleurs une redistribution spatiale de la population impliquée par chaque scénario qui favorise cette inertie dans chacun des trois cas. Ainsi, par exemple dans le cas du *Fractal oriented development*, la population s’accroît essentiellement aux franges de la première couronne et le budget temps augmente légèrement dans cette zone, là où il est déjà initialement le plus haut. Mais par contre, il baisse dans le centre et en périphérie et, en résultante, le budget temps moyen au sein de l’aire urbaine n’évolue pas.

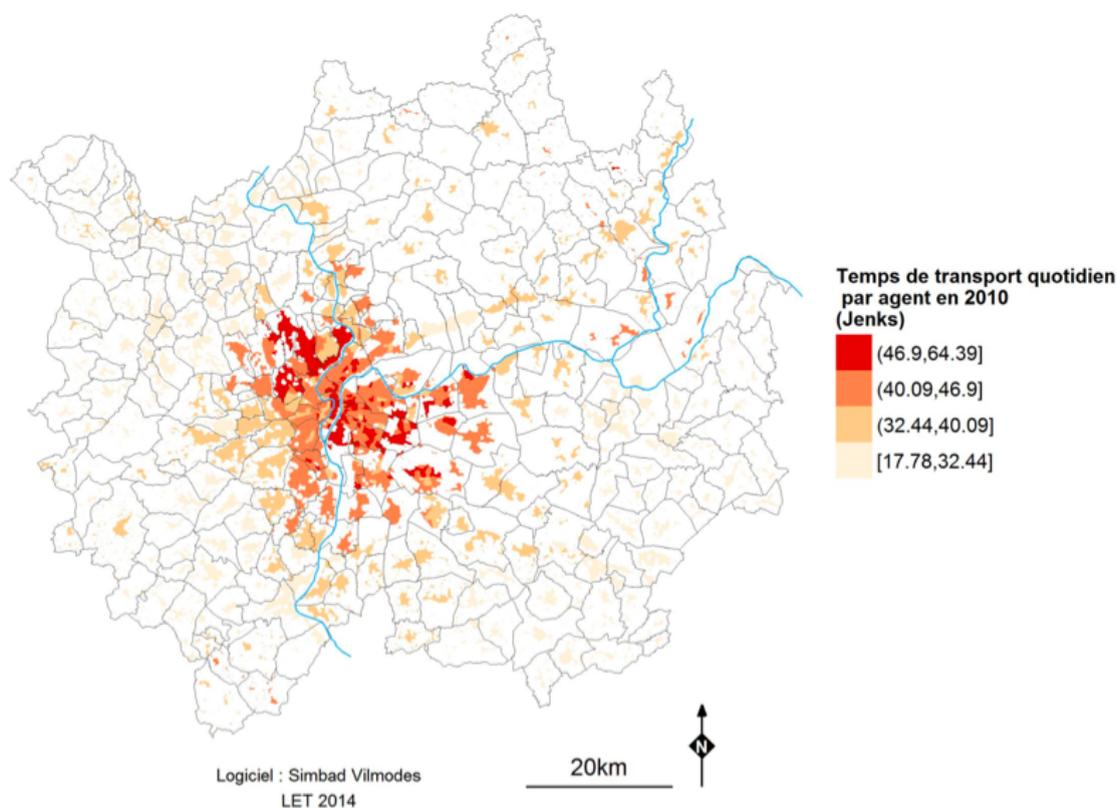


Figure 3.61 – Budget temps quotidien consacré aux transports par les habitants de l'aire urbaine de Lyon en 2010

3.3.4.3. Taux d'effort

Pour compléter cette analyse, l'étude des taux d'efforts des ménages apporte un dernier éclairage à la question des inégalités socio-spatiales. Cet indicateur permet en effet de ne pas analyser la répartition de la population uniquement selon son revenu, mais également selon la fraction de son revenu qu'elle consacre à se loger et à assurer ses besoins de mobilité. Ce taux d'effort pour le logement et pour le transport est ici décrit en neuf classes qui croisent trois niveaux de revenu (faible, moyen, fort) et trois niveaux de dépense (important, moyen, peu important), estimés à partir de la répartition générale des revenus et des coûts de logement et de mobilité sur les deux territoires étudiés. L'effort concernant le transport est représenté par une couronne dans des gammes de bleu, entourant un cercle dans des gammes de rouge qui représente l'effort pour le logement (la taille du cercle étant toujours constante ; cf la légende de la Figure 3.62).

Nous constatons ainsi que dans le scénario de laisser-faire (LF) le taux d'effort pour le transport apparaît globalement comme fonction linéaire de la distance au centre (couronne extérieure), avec toutefois une bonne représentation de revenus moyens et élevés pour les habitants du périurbain, selon un schéma que nous avons déjà souligné pour les indicateurs précédents (Figures 3.62 et 3.63). Comme on pouvait s'y attendre, le taux d'effort pour le logement est quant à lui plus élevé dans les espaces centraux et plus faible en périphérie. Son gradient est plus *plat* à Besançon qu'à Lyon, où le marché immobilier est plus tendu dans les espaces centraux. Nous sommes donc face à un double gradient assez classique qui montre que, à classe de revenus égale, les habitants peuvent, selon leurs préférences, se

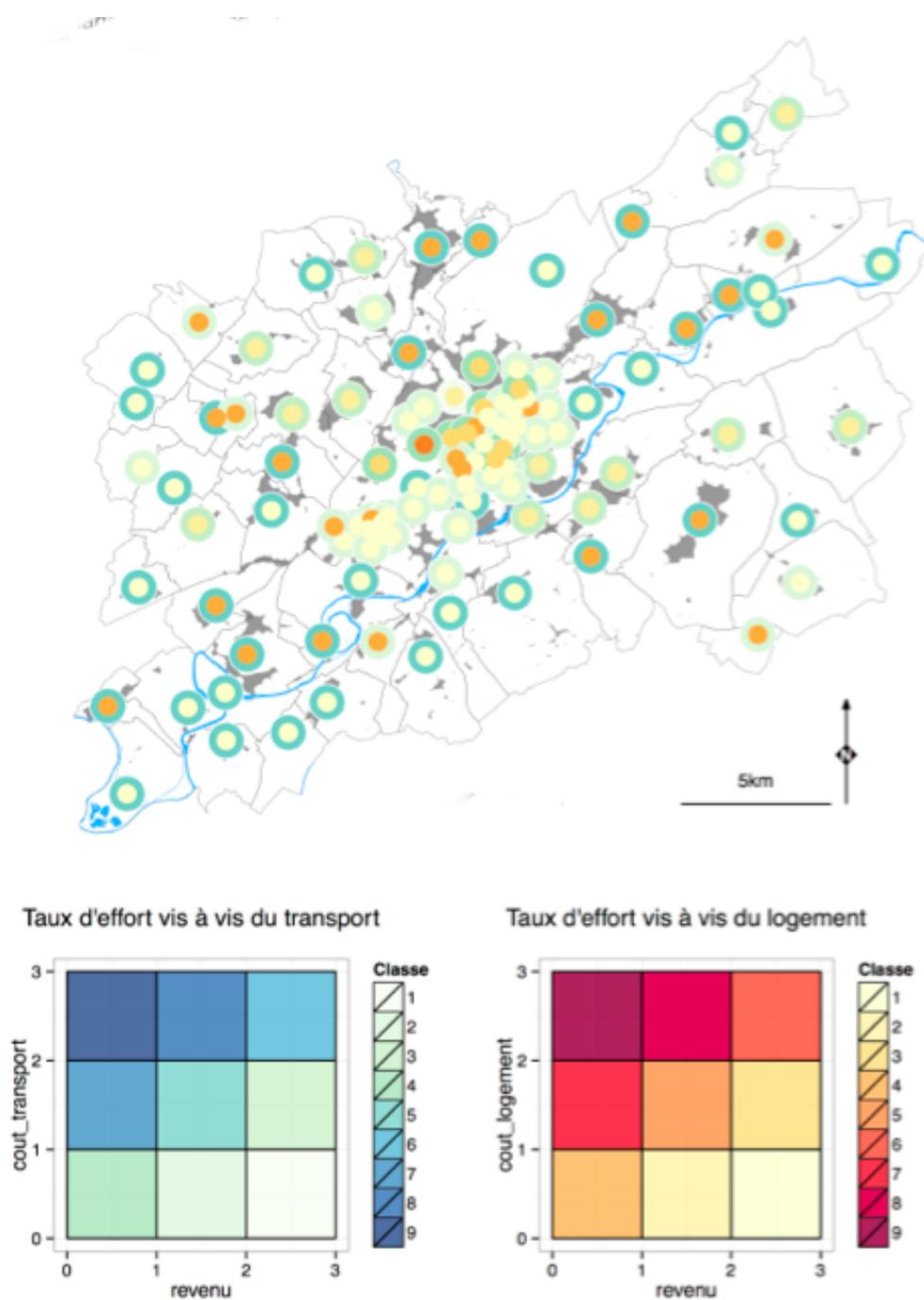


Figure 3.62

– Effort des ménages en 2030 selon le scénario Laisser faire (LF) à Besançon

localiser au centre, avec un coût de transport faible et un coût de logement élevé, ou dans le périurbain, avec des taux d'effort opposés. La situation dominante concernant le périurbain le plus lointain est la présence de revenus élevés, supportant des coûts de transport élevés, et des coûts de logement moyens à élevés, sauf dans les zones plus rurales en périphérie de l'agglomération.

Le scénario de renouvellement urbain compact (RUC) portant plus spécifiquement sur

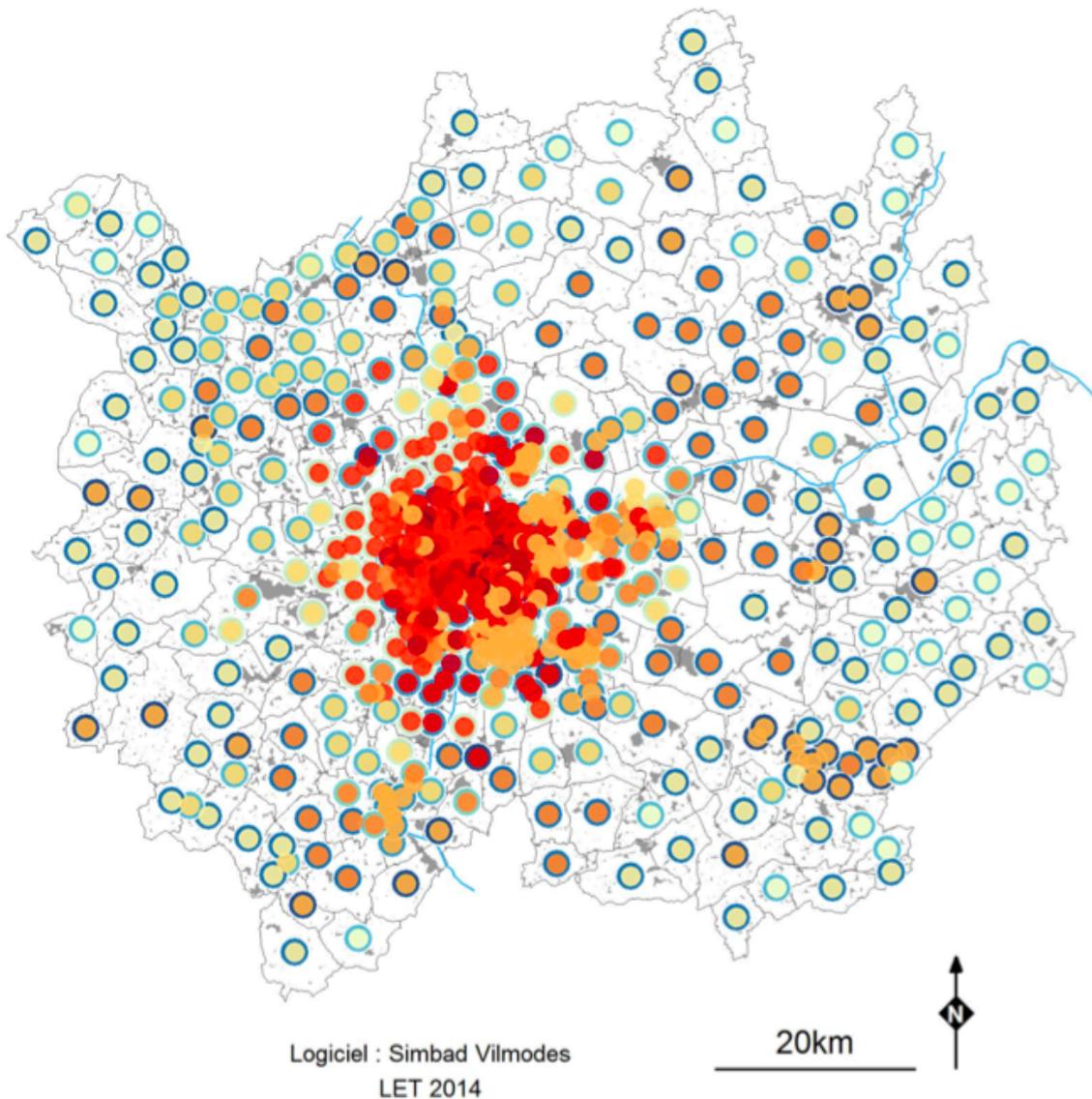


Figure 3.63

– Effort des ménages en 2030 selon le scénario Laisser faire (LF) à Lyon

le centre de l'agglomération, il convient d'analyser avant les taux d'effort dans cette zone centrale, en la comparant à la situation observée dans les espaces périurbains (Figures 3.64 et 3.65). La carte des simulations pour 2030 présente des différences qui sont à première vue minimes, tant à Lyon qu'à Besançon. Dans le centre de Besançon, le taux d'effort transport augmente légèrement, sans doute du fait d'une congestion plus importante liée à l'augmentation des densités de population. Cependant, la simulation ne met pas réellement en évidence une augmentation du taux d'effort pour le logement, qui était l'effet que l'on pouvait craindre suite à une plus forte compétition pour se localiser dans les espaces centraux. En revanche, on constate une augmentation du taux d'effort vis-à-vis du transport pour les habitants des zones périurbaines, probablement sous le double effet de l'augmentation de la congestion dans le centre, et de l'appauvrissement de la population en dehors de l'hyper-centre, déjà constatée par l'analyse des indicateurs précédents. Dans le cas lyonnais, ces variations apparaissent trop marginales et ponctuelles pour être relevées.

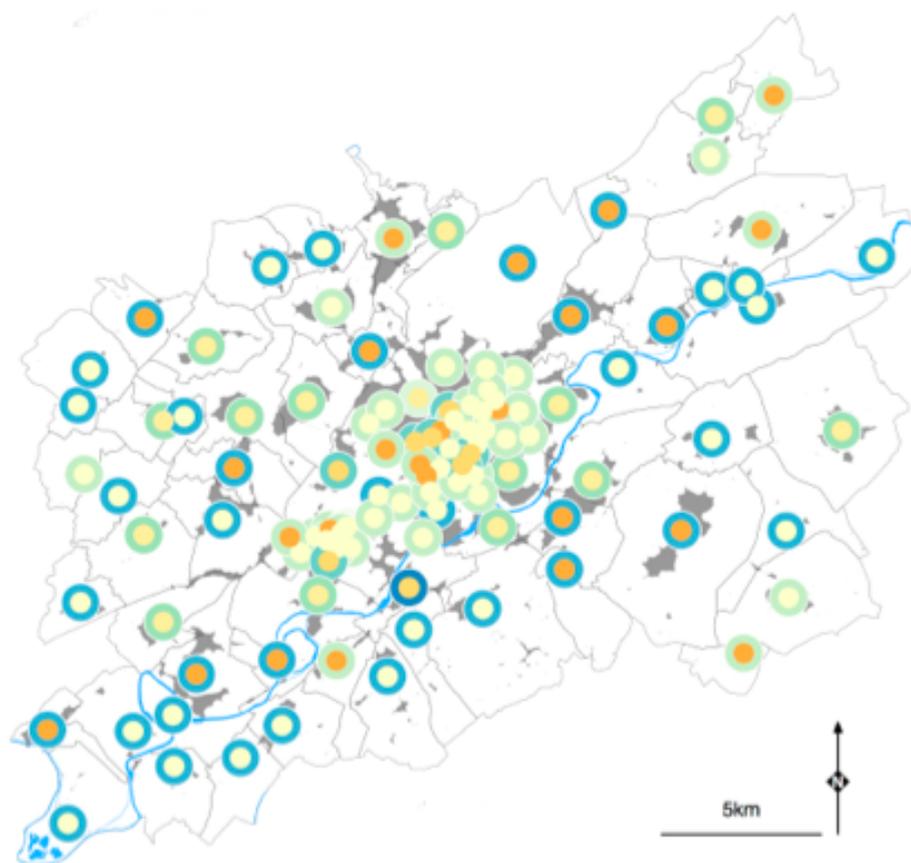


Figure 3.64 – Effort des ménages en 2030 selon le scénario Renouvellement urbain compact (RUC). La légende est la même que pour la figure précédente.

Selon une logique complètement différente, le scénario *Fractal oriented development* (FOD) ne modifie pas, ou très peu, les taux d'effort dans le centre de l'agglomération, comme on pouvait s'y attendre (Figures 3.67 et ??). En revanche, malgré des nouveaux logements parfois très éloignés des aménités centrales, il permet de diminuer notablement le taux d'effort vis-à-vis du transport dans le sud-ouest de l'agglomération, dans des zones qui ne se situent pas uniquement à proximité immédiate des haltes ferroviaires prévues par le scénario. On constate ainsi que la mise en place d'une forme urbaine polycentrique apparaît effective : les habitants dépensent moins pour leur mobilité du fait des nouvelles centralités qui sont créées ou renforcées. Au nord de l'agglomération, sur la ligne de transport en commun qui relie le nord-nord-ouest, on observe d'ailleurs une zone spécifique dans laquelle l'effort lié au transport diminue drastiquement, alors que l'effort porté au logement diminue également un peu. Il s'agit d'une zone habitée principalement de ménages aisés dans le scénario du laisser-faire (LF), et qui se trouve rééquilibrée dans le scénario *Fractal oriented development* (FOD), avec une augmentation de la part des ménages en-dessous du revenu médian. Ce rééquilibrage se fait sans que les ménages aient à supporter des efforts financiers démesurés, notamment grâce à la desserte efficace du système de transports en commun.

Cet effet positif sur les coûts de la mobilité de certaines zones périurbaines est moins visible dans le cas lyonnais car le report modal sur le tram-train, même s'il est réel, reste trop marginal par rapport à l'usage de la voiture (cf. § 3.3.3.) pour avoir un impact sensible sur le budget moyen des ménages, agrégé à l'IRIS. En revanche, la densification de pôles

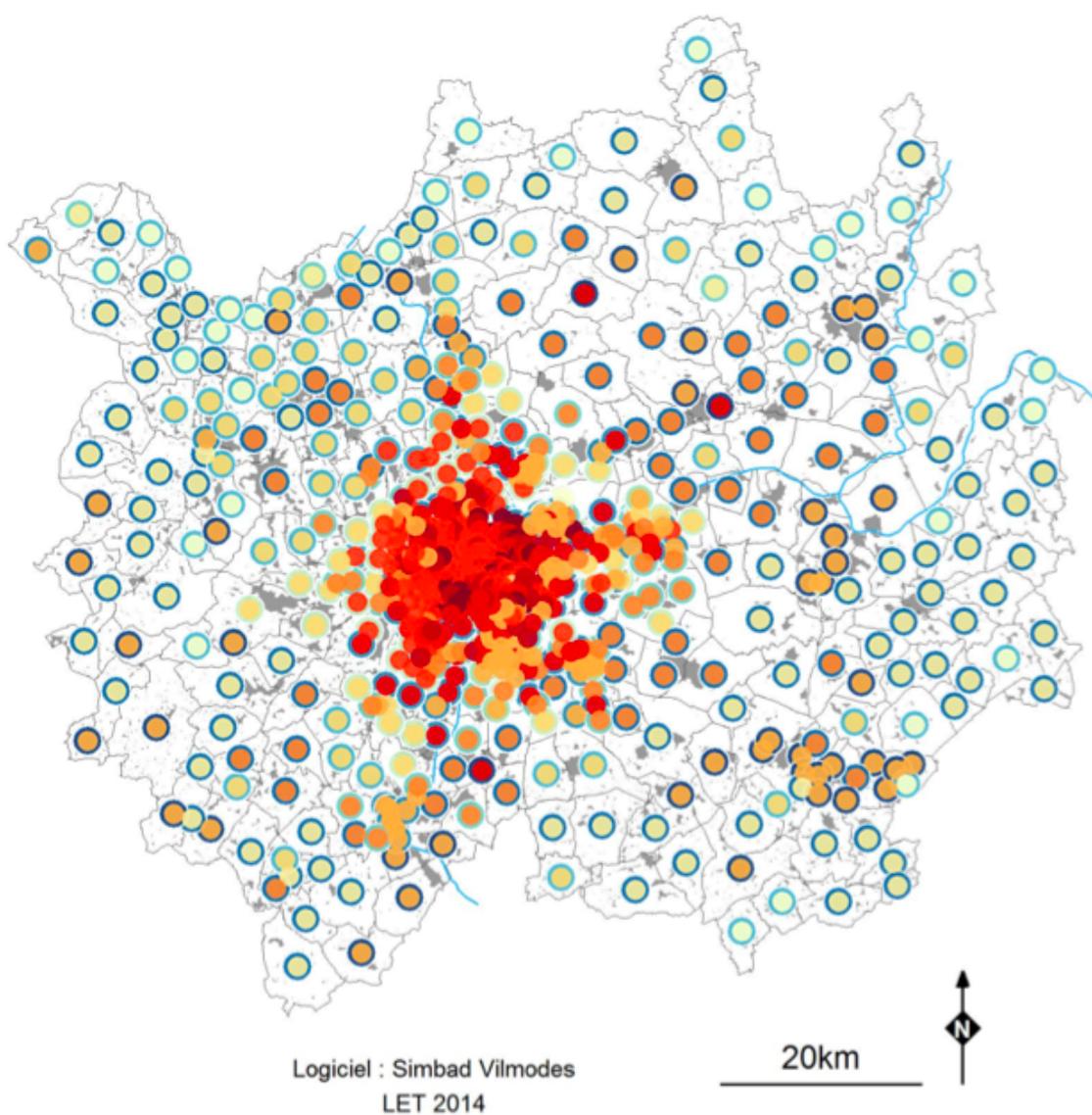


Figure 3.65 – Effort des ménages de l'aire urbaine de Lyon en 2030 selon le scénario Renouvellement Urbain Compact (RUC).

urbains autour des gares laisse apparaître une croissance des coûts de l'immobilier le long des axes du tram-train, et le taux d'effort pour le logement s'en ressent légèrement dans certains des IRIS concernés.

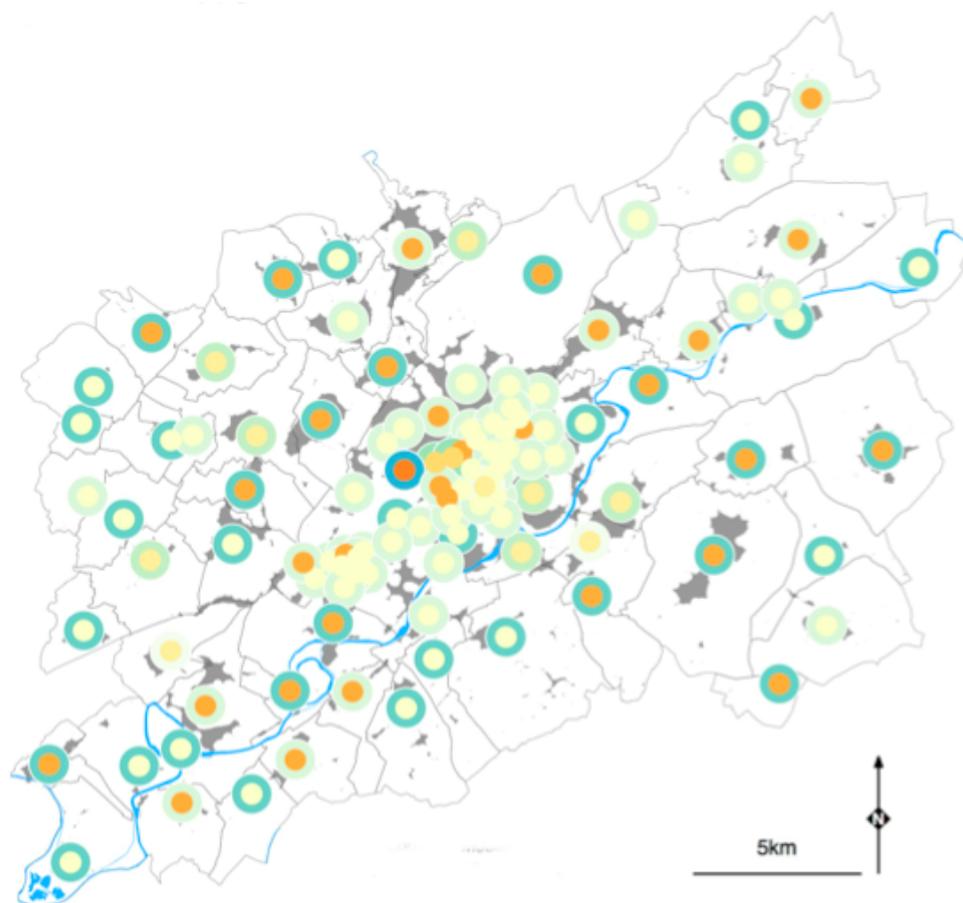


Figure 3.66 – Effort des ménages en 2030 selon le scénario *Fractal oriented development* (FOD). La légende est la même que pour la figure précédente.

Conclusion

Pour conclure, les simulations réalisées dans le cadre du projet VILMODEs² montrent que les deux scénarios construits dans la Partie 2 (Renouvellement urbain compact et monocentrique *vs* *Fractal oriented development* plus polycentrique) proposent des solutions très contrastées quant aux futurs possibles de l'urbanisation. Ils ont en particulier l'avantage d'en offrir une image assez précise, qui invite à la réflexion collective sur la question plus générale de la durabilité urbaine et de sa mise en œuvre concrète. Cependant, **malgré les contrastes forts qui opposent le renouvellement urbain compact (RUC) et le**

2. En ce qui concerne MobiSim©, les résultats demandent toutefois à être relativisés en rappelant la méthode mise en œuvre pour les produire : lors d'une simulation de scénarios, une série de tirages aléatoires est effectuée pour distribuer le comportement des habitants selon un jeu de probabilités connues (c'est notamment le cas pour la génération des plannings d'activités, le développement résidentiel, les migrations résidentielles, etc.). Par conséquent, les résultats obtenus pour différentes répliques d'un même scénario simulé sont susceptibles de varier. Une analyse statistique complémentaire sur ces résultats s'avère donc nécessaire pour les valider complètement, en calculant par exemple, la valeur de chaque indicateur par la moyenne de 10 répliques d'une même simulation. Ainsi, si cette méthode permet d'interpréter avec plus de certitude, elle n'a pas été mise en œuvre dans le cadre du projet VILMODEs, compte tenu du temps et des ressources de calcul nécessaires à sa mise en œuvre. Pour les simulations réalisées à l'aide de Simbad©, en revanche, la stabilité des résultats a été testée pour contrôler l'effet des multiples processus aléatoires utilisés au cours d'une simulation : les résultats ne varient que de manière marginale.

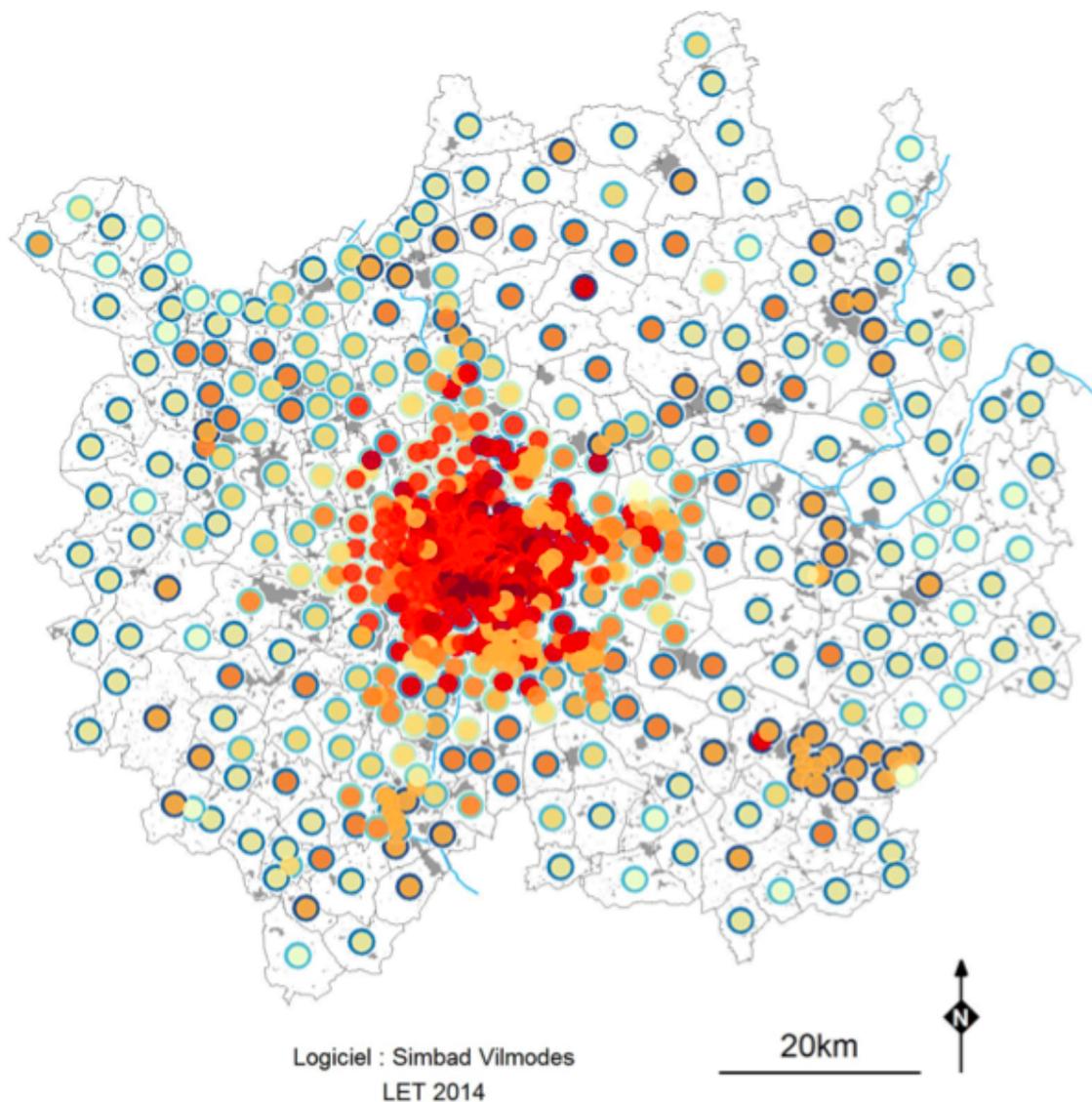


Figure 3.67 – Effort des ménages de l'aire urbaine de Lyon en 2030 selon le scénario Fractal Oriented Development (FOD).

Fractal oriented development (FOD), les options qu'ils proposent en termes de forme urbaine et de politique de transport présentent, dans un cas comme dans l'autre, un meilleur caractère de durabilité global qu'une situation de laisser faire (LF), du moins pour la plupart des indicateurs analysés. Cette performance nécessite bien entendu d'introduire des contraintes relativement fortes sur les plans locaux d'urbanisme, ainsi que des modifications importantes, mais somme toute raisonnables, pour le déploiement des futurs réseaux de transport. Les résultats sont plutôt encourageants et indiquent que la marge d'évolution vers un urbanisme plus durable est importante, tout en laissant de nombreuses marges de manoeuvre aux décideurs publics dans le cadre d'une politique publique plus interventionniste.

Conclusion

LES conclusions thématiques du projet VILMODes ayant fait l'objet d'une présentation détaillée dans le Chapitre 3, nous proposons d'axer la conclusion générale sur son apport théorique et technique pour la modélisation de l'urbanisation et des politiques de transport. Dans ce domaine, le principal apport du projet a en effet été de fournir un dénominateur commun à une partie des modèles et des logiciels utilisés en France, dont la très grande majorité a été développée dans le cadre du PREDIT. Construits au départ dans des buts qui leur étaient propres et fondés sur des approches théoriques spécifiques (et parfois très originales), ils ont ici été utilisés de manière complémentaire, et trouvent désormais chacun une « place » dans la simulation de scénarios relativement complets et réalistes. Cette « mise en complémentarité » n'a toutefois pas été immédiate : elle a demandé des modifications, certes légères mais tout de même parfois complexes, du fonctionnement des plateformes MobiSim© et Simbad©, qui a nécessité de clarifier les concepts sous-jacents à leur développement dans un contexte plus interdisciplinaire, alliant les acquis de l'économie des transports et de la géographie quantitative. Cette intégration, dont la difficulté était délicate à estimer au début du projet, est apparue particulièrement fastidieuse et chronophage ; elle se solde aujourd'hui par un ensemble de procédures établies et formalisées qui multiplient de manière exponentielle les résultats que l'on peut escompter de ces différents modèles, en même temps qu'elle ouvre la voie à de nouvelles possibilités françaises de modélisation LUTI pour l'aménagement du territoire, qui ne trouve, à notre connaissance, aucun équivalent en Europe ni dans le monde.

Parallèlement, comme nous l'avons largement rappelé dans la conclusion du Chapitre 2, l'expérimentation prospective réaliste menée sur deux cas d'étude réels (Lyon et Besançon) contribue également à mieux situer l'exercice de modélisation dans les processus et les pratiques d'aide à la décision en aménagement. Le rapport montre en effet que l'utilisation de modèles de simulation ne se réduit pas à une approche technique « clique bouton », mais nécessite une connaissance fine des territoires modélisés. Cette connaissance du terrain s'appuie sur d'innombrables études (démographiques, économiques, sociales, prospectives, etc.) réalisées par ailleurs. Pour les intégrer, la question de l'échelle apparaît alors déterminante à plusieurs égards. *Primo*, sur des agglomérations aussi différentes par leur taille et leur structure que Lyon et Besançon, des scénarios identiques dans leur principe théorique ne s'implémentent pas de la même manière et produisent des résultats différents, voire contradictoires, notamment dans les marges périurbaines. La modélisation urbaine, même si elle s'appuie sur un outillage général plus ou moins « universel » (les modèles) n'en reste pas moins toujours un cas particulier, qui n'est interprétable que dans un contexte nominal.

Secundo, la question de l'échelle de restitution des résultats n'est pas anodine non plus : si la cartographie des résultats est possible à une échelle très fine, elle n'est souvent lisible et interprétable sur des territoires étendus qu'après avoir été généralisée dans des zones plus vastes, parmi lesquelles les IRIS, les communes et les couronnes radiconcentriques entourant le centre-ville gardent toute leur pertinence.

De ce fait, l'un des enseignements complémentaires du projet VILMODes aura été de montrer que la modélisation LUTI, en particulier quand elle est désagrégée, produit une grande quantité de données et de résultats : caractéristiques des individus et des ménages, itinéraires et modes de transport empruntés, satisfaction résidentielle et programme d'activité, etc. Ces données paraissent tout à fait cohérentes et exploitables pour la prise de décision en aménagement, mais leur exploitation complète se heurte *de facto* à la complexité de manipulation et d'analyse que la littérature identifie aujourd'hui par un terme générique : *big data*. Ainsi, même si des plateformes comme Simbad© ou MobiSim©, couplés à des modèles qui répondent eux-même à des questions plus spécifiques, sont capables de simuler des scénarios de grande qualité, l'analyse de leurs résultats n'est pas immédiatement opérationnelle et demande souvent à réaggréger les informations produites ou à ne les présenter que de manière partielle, comme c'est le cas de ce rapport³. Au jour d'aujourd'hui, deux pistes paraissent intéressantes pour pallier cette difficulté.

Premièrement, on peut poser l'hypothèse que la géovisualisation pourrait être une solution pour une meilleure analyse de la masse de données produite par les modèles LUTI. Dans ce contexte, la géovisualisation ne s'entend pas comme une simple représentation de données géographiques. Selon Adrienko *et al.* (2007), elle doit également offrir de nouvelles possibilités pour donner un sens aux données (en particulier quand elles sont nombreuses), en combinant la gestion des bases de données et leur visualisation interactive et dynamique dans un outil unique et ergonomique. L'intégration de la géovisualisation dans les simulations LUTI s'appuie elle-même sur deux questions qui ouvrent des pistes pour les recherches à venir pour la mise en place de système d'aide à la décision en aménagement et en urbanisme :

1. De quelle manière les outils de géovisualisation peuvent-ils aider à généraliser, à intégrer et à manipuler des bases de données spatio-temporelle, et contribuer à l'analyse et à la validation des résultats prospectifs de simulation LUTI ?
2. Comment peut-elle permettre aux collectivités et aux aménageurs d'améliorer la compréhension des mobilités quotidiennes et résidentielles et d'intervenir de manière opérationnelle pour la planification des réseaux et des équipements à venir ?

Deuxièmement, comme en témoigne également ce rapport, de nombreux indicateurs sont actuellement disponibles pour évaluer les stratégies qui peuvent conduire à une urbanisation plus durable dans différents domaines : localisation, déplacements pratiques et relations sociales. La difficulté n'est plus tant de les produire, que de les harmoniser et de les croiser dans une vision plus globale de l'avenir des villes. Cette démarche ne relève pas seulement du domaine de la modélisation et de la recherche en aménagement : elle doit intégrer l'ensemble des acteurs et des experts concernés par les problématiques de l'aména-

3. Dans le cadre de l'exploitation des indicateurs retenus pour le projet VILMODes, près de 150 cartes et graphiques ont été générés par un ensemble de requêtes automatiques appliquées sur les fichiers de sortie des modèles de simulation. Seule une partie de ces documents, évaluée comme la plus pertinente dans le cadre thématique présenté ici, a été intégrée au rapport. L'ensemble des indicateurs, ainsi que les bases de données qui ont permis de les construire, restent toutefois disponibles sur demande.

gement et de l'urbanisme afin de produire une méthodologie renouvelée pour l'évaluation croisée des impacts économiques, sociaux et environnementaux des politiques publiques envisagées (Nicolas *et al.*, 2014; Hély *et al.*, 2014). Cette méthodologie, qui est encore à construire, relèverait alors de l'analyse de la « performance » des territoires étudiés et devrait permettre une analyse plus précise de leurs atouts et de leurs faiblesses, afin d'inciter à la mise en place de mesures de compensation. Elle pose de ce fait immédiatement une nouvelle série de questions, qui relèvent en grande partie du champ politique : à quelle échelle spatiale peut-on réellement évaluer la performance et la durabilité des territoires, et quelles pondérations faut-il appliquer entre les indicateurs qui permettent partiellement de statuer sur leur niveau de durabilité ?

Références bibliographiques

- Alonso W., 1964, *Location and land use. Towards a general theory of land rent*, Cambridge, Harvard University Press.
- Andrienko G., Andrienko N. and Wrobel S., 2007. Visual analytics tools for analysis of movement data. *ACM SIGKDD Explorations Newsletter - Special issue on visual analytics*, 9, 2, pp. 38-46.
- Antoni J.P., 2009, *Lexique de la ville*, Ellipses, 184 p.
- Antoni J.P., 2010 (a) , L'étalement urbain. Wackermann G., (Dir.), *La France en villes*, Ellipses, pp. 164-176.
- Antoni J.P., (Dir.), 2010 (b) , *Modéliser la ville. Forme urbaine et politiques de transport*, Economica (Méthodes et approches), 438 p.
- Antoni J.P., 2013, L'ambition de modéliser la ville. Brun G. (Dir.), *Ville et mobilité. Nouveaux regards*, Economica (Méthodes et approches), pp. 227-238.
- Aymonino, C. et al., 1970, *Lo Studio dei fenomeni urbani. La città di Padova.*, Centro studi di storia urbanistica, Roma.
- Bailly A., 2009, La science régionale en perspective, *Géographie, Economie, Société*, 11, pp. 1-7.
- Banister, D., 1992, Energy use, transportation and settlement patterns. In Breheny, M. J. (Ed), *Sustainable Development and Urban Form, European Research in Regional Science*, 2, pp. 160-181
- Batty M., 2008, The Size, scale and shape of cities, *Science*, 319, 769 p.
- Batty M., Longley P., 1994, *Fractal Cities : A Geometry of Form and Function*, Academic Press, San Diego, CA and London.
- Baum-Snow N., 2007, "Suburbanization and transportation in the monocentric model", *Journal of Urban Economics* n°62, pp 405-423.
- Beckerman W., 1994, Sustainable development : is it a useful concept ?, *Environmental Values*, 3, 3, pp. 191-209.
- Benguigui, L., Czamanski D., Marinov M., et Portugali Y., 2000, When and where is a city fractal? *Environment and Planning B*, 27, 4, pp. 507-519
- Boulding K.E., 1966, The economics of the coming spaceship earth. In : Lippit D.V. (ed.), 1996, *Radical political Economy. Explorations in Alternative Economic Analysis*, M.E. Sharpe, New-York, pp. 357-367.
- Boutaud B., 2009, Quartier durable ou éco-quartier ?, *Cybergeographie : European Journal of Geography*, <http://cybergeographie.revues.org/22583>
- Bouzouina L., 2008, *Ségrégation spatiale et dynamiques métropolitaines*, Thèse de doctorat de sciences économiques, Université de

- Lyon.
- Breheny M. J., 1992, Contradictions of the compact city : a review. In Breheny, M. J. (ed), *Sustainable Development and Urban Form, European Research in Regional Science*, 2, pp. 138-159
- Breheny M. J., 1997, Urban compaction : feasible and acceptable ?, *Cities*, 14, pp. 209-217
- Brueckner J.K., Thisse J.-F., Zenou Y., 1999, Why is central Paris rich and downtown Detroit poor? An amenity based theory, *European Economic Review*, 43, pp. 91-107.
- Cabrera J., 2013, *Quelle prise en compte des dynamiques urbaines dans la prévision de la demande de transport ?*, Thèse de doctorat en sciences économiques, Université de Lyon.
- Calthorpe P., 1993, *The next American Metropolis*, Princeton Architectural Press, 1993, 175 p.
- Cervero, R., 1998, *The transit metropolis : A global inquiry*, Island Press, Washington.
- Charmes E., 2007, Le malthusianisme foncier, *Etudes Foncières*, 125, pp. 12-16.
- Chaudhry O., Mackaness W., 2008, Automatic Identification of Urban Settlement Boundaries for Multiple Representation Databases, *Computers, Environment and Urban Systems*, 32, pp. 95-109.
- Christaller, W., 1933, *Die zentralen Orte in Süddeutschland*, G. Fischer. Reproduction par la Wissenschaftliche Buchgesellschaft, 1980.
- CMED, 1987, *Notre avenir à tous*, Edition du Fleuve, Montréal.
- Czerkauer-Yamu C., Frankhauser P., 2013, *Development of Sustainable Metropolitan Areas using a Multiscale Decision Support System*, Working paper HALSHS : hal-00837493
- Dantzig, G. et Saaty, T., 1973, *Compact City : a Plan for a Liveable Urban Environment*, Freeman, San Francisco.
- De Jouvenel B., 1976, *La civilisation de puissance*, Paris, Fayard.
- 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*, LET, Rapport de recherche ADEME - DRAST.
- Dupuy, G., 1995, *Les territoires de l'automobile*, Anthropos, Paris.
- Durkheim, E., 1960, *De la division du travail social*, Presses universitaires de France, Paris.
- EEA (European Environmental Agency), 2011, *Laying the foundations for greener transport - TERM 2011 : transport indicators tracking progress towards environmental targets in Europe*, EEA Report, 7/2011.
- Emelianoff C., 2004, L'urbanisme durable en Europe : à quel prix ?, *Ecologie et Politique*, 29, pp. 21-36.
- Emelianoff C., 2010, Les Agendas 21 locaux. In : Zuindeau B. (ed.), *Développement durable et territoire*, Presses Universitaires du Septentrion, Villeneuve d'Ascq, pp. 445-454.
- Ewing R., 1997, Is Los Angeles-style sprawl desirable ?, *Journal of the American Planning Association*, 63, 1, pp. 107-126.
- Chen Y., Feng J., 2010, Spatiotemporal evolution of urban form and landuse structure in Hangzhou, China : evidence from fractals, *Environment and Planning B*, 37, p. 838-856.
- Fouchier V., 1995, La densification : une comparaison internationale entre politiques contrastées, *Les Annales de la recherche urbaine*, 67, pp. 95-108.
- Frankhauser, P., 1990, Aspects fractals des structures urbaines, *L'Espace géographique*, 19-20, 1, pp. 45-69.

- Frankhauser P., 1994, *La fractalité des structures urbaines*, Anthropos, Paris
- Frankhauser P., 2004, Comparing the morphology of urban patterns in Europe : a fractal approach. In : A Borsdorf A., Zembri P. (Ed.), *European cities structures insights on outskirts*, COST Action C10, pp. 93-103.
- Frankhauser P., Tannier C., Vuidel G., Houot H., 2011, Une approche multi-échelle pour le développement résidentiel des nouveaux espaces urbains. In : Antoni J.P. (Ed), *Modéliser la ville. Forme urbaine et politiques de transport*, Economica, Coll. Méthodes et approches, pp. 306-332
- Frankhauser P., 2012, *The Fractalopolis model - a sustainable approach for a central place system*, Working paper HALSHS, hal-00758864
- Frankhauser, P., Ansel, D., (Ed), 2012, *La décision d'habiter ici ou ailleurs*, Anthropos, collection Villes, 383 p.
- Frankhauser P., 2013, La ville fractale – un concept d'aménagement multi-échelle" in : Brun G. (Ed), *Ville et mobilité - Nouveaux regards de la recherche*, Documentation française, collection du Predit, série "Synthèses", pp. 85-99
- Gadrey J., Jany-Catrice F., 2003, Les indicateurs de richesse et de développement. Un bilan international en vue d'une initiative française, *Rapport de recherche pour la DARES*, Université de Lille, Laboratoire CLERSE.
- Galster G., Hanson R., Ratcliffe M., Wolman H. Coleman S., Freihage J., 2001, Wrestling Sprawl to the Ground : Defining and Measuring an Elusive concept, *Housing Policy Debate*, 12, 4, pp. 681-717
- Gardrat M., Serouge M., Toilier F., Gonzalez-Feliu J., 2014, Simulating the Structure and Localization of Activities for Decision Making and Freight Modelling : The Simetab Model, *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 125, pp. 147-158.
- Gerardin B., Patier D., Routhier J. L., Segalou E. (2000), *Diagnostic du Transport de marchandises dans une agglomération, Programme national Marchandises en ville*, Rapport de recherche, DRAST, 92 p.
- Geurs K. T., Van Eck R., 2001, *Accessibility measures : review and applications. Evaluation of accessibility impacts of land-use transport scenarios, and related social and economic impacts*, Bilthoven, Pays-Bas, rapport RIVM n°408505006.
- Godard O., 2005, *Du développement régional au développement durable : tensions et articulations*, Chaire Développement Durable EDF – Ecole Polytechnique, Cahier n°2005-016.
- Gordon, P., Richardson, H. W., 1997, Are compact cities a desirable planning goal?, *Journal of the American Planning Association*, 63, pp. 95–106.
- Grafmeyer, Y. Joseph, I. (dir), 1984, *L'école de Chicago. Naissance de l'écologie urbaine*, Aubier, Paris.
- Hély V., Antoni J.P., 2014, A theoretical approach to combine sustainability indicators for decision making in planning issues, *12th Design and Decision Support Systems Conference*, 25-27 august 2014, Eindhoven, The Netherlands.
- Hillier, B., 1984, *The social logic of space*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Homocianu M., 2009, *Modélisation de l'interaction transport-urbanisme – choix résidentiels des ménages dans l'aire urbaine de Lyon*, Thèse pour le doctorat en sciences économiques. Université de Lyon.
- Hotelling H., 1931, The economics of exhaustible resources, *Journal of Political Economy*, 39, 2, pp. 137-175.
- Huriot J-M., Bourdeau-Lepage L., 2009, *Economie des villes contemporaines*, Economica.
- Knowles R.D. (2012). Transit Oriented Development in Copenhagen, Denmark : from

- Finger Plant to Orestad, *Journal of Transport Geography*, 22, pp. 251-261.
- Korsu E., Massot M.-H., Orfeuil J.-P., 2012, *La ville cohérente : penser autrement la proximité*, La documentation Française, Collection Recherches.
- Latouche S., Harpagès D., 2010, *Le temps de la décroissance*, Ed. Thierry Magnier, coll. Troisième culture.
- Lavedan, P., 1926, *Histoire de l'urbanisme, Tome I « Antiquité, Moyen Âge »*, Henri Laurens, Paris.
- Lavedan, P., 1941, *Histoire de l'urbanisme, Tome II « Renaissance et Temps modernes »*, Henri Laurens, Paris.
- Lavedan, P., 1952, *Histoire de l'urbanisme, Tome III « Époque contemporaine »*, Henri Laurens, Paris.
- Le Goff J.P., 2009, Au nom du développement durable, *Le Débat*, 156, pp. 80-97.
- Le Néchet, F., 2010, *Approche multiscalair des liens entre mobilité quotidienne, morphologie et soutenabilité des métropoles européennes. Cas de Paris et de la région Rhin-Rhur*, Thèse de doctorat, Université Paris-Est.
- Lepetit K., Yvernogeu C., 2012, *Étude comparative des déplacements des périurbains et des urbains. Elaboration d'un outils de calcul*, Projet de fin d'étude, École polytechnique de Tours, 84 p.
- Leysens, T., 2010, *Reconfiguration des réseaux et renouveau urbain : l'enjeu des friches ferroviaires*, Thèse de doctorat, Université Lille 1.
- Lowe D., 1989, Organization of Smooth Image Curves at Multiple Scales, *International Journal of Computer Vision*, 3, pp. 119-130.
- Lunardi N., 2013, *MobiSim, un outil d'aide à l'évaluation de la durabilité des politiques de transports en milieu urbain*, Mémoire de M2, Université de Franche-Comté, 61 p.
- Mancebo F., 2009, Des développements durables. Quel référentiel pour les politiques de développement durable en Europe? *Cybergeo : European Journal of Geography*, 25 p.
- Mangin D., 2004, *La ville franchisée, formes et structures de la ville contemporaine*, Editions de la Villette.
- Masson S., 2000, *Les interactions entre système de transport et système de localisation en milieu urbain et leur modélisation*, Thèse de Doctorat Sciences Economique, Université Lyon 2.
- Meadows D.H., Meadows D.L., Randers J., Behrens W.W., 1972, *Halte à la croissance ?*, Fayard.
- Merenne-Schoumaker B., 1998, *La localisation des services*, Nathan, Coll. Géographie d'aujourd'hui.
- Merlin P., 2002, *L'aménagement du territoire*, Presses universitaires de France, 448 p.
- Mills E.S., 1972, *Urban Economics*, Glenview, Scott, Foresman and Co
- Minkowski H., 1903, Volumen und Oberfläche, *Mathematische Annalen*, 57, pp. 447-95.
- Muratori, S., 1959, *Studi per un'operante storia urbana di Venezia*, Centro studi di storia urbanistica, Roma.
- Muth R.F., 1969, *Cities and housing. The spatial pattern of urban residential land use*, University of Chicago Press.
- Naess A., 1973, The Shallow and the Deep, Long Range Ecology Movement : A Summary, *Inquiry*, 16, 1, pp. 95-100.
- Naess A., 1989, *Ecology Community and Life Style*, Cambridge University Press.
- Neuman M., 2005, The Compact City Fallacy, *Journal of Planning Education and Research*, 25, 1, pp. 11-26
- Newman, P.W.G., Kenworthy, J.R., 1989, *Cities and Automobile Dependence : An*

- International Sourcebook*, Gower, Aldershot/Brookfield, VT.
- Newman, P.W.G., Kenworthy, J.R., 1992, Is there a role for physical planners?, *Journal of the American Planning Association*, 58, pp. 353-362
- Nicolas J.-P. (Dir), Bonnel P. (Dir), Routhier J.-L., Cabrera J., Zuccarello P., Godinot C., Toilier F., Homocianu M., 2009, *Simuler les Mobilités pour une Agglomération Durable*, Rapport de recherche ADEME - DRAST.
- Nicolas J.P., 2012, Mobilité quotidienne et développement urbain durable, *Habilitation à Diriger des Recherches en Aménagement de l'espace et urbanisme*, Université Lumière Lyon 2.
- Nicolas J.P., Toilier F., Verry D., Zuccarello P., 2014, Un système d'indicateurs de mobilité durable pour rendre compte des résultats d'une modélisation transport-urbanisme, *Colloque ASRDLF*, 7-9 juillet 2014, Université Paris Est.
- Nijkamp P., Lasschuit P., Soeteman F., 1991, *Sustainable Development in a Regional System*. Amsterdam, Vrije Universiteit, Serie Research Memoranda.
- Nordhaus W.D., 1974, Resources as a Constraint on Growth, *American Economic Review*, 64, 2, pp. 22-26.
- Olaru D., Smith B., Taplin J.H.E., 2011, Residential location and transit-oriented development in a new corridor, *Journal of Transportation Research Part A*, 45, pp. 219-237.
- Owens, S. E., 1992, Land-use planning for energy efficiency, *Applied Energy*, 43, pp. 81-114.
- Passet R., 1979, *L'économie et le vivant*, Petite Bibliothèque Payot.
- Pearce D.W., 1976, The Limits of Cost-Benefit Analysis as A Guide to Environmental Policy, *Kyklos*, 29, 1, pp. 97-112.
- Pearce D.W., Turner R.K., 1990, *Economics of Natural Resources and the Environment*, Harvester Wheatsheaf.
- Polèse M., Shearmur R., 2009, *Economie urbaine et régionale. Introduction à la géographie économique*, Economica (3è édition).
- Pouyanne G., 2004, *Forme urbaine et mobilité quotidienne*, Thèse de doctorat en Sciences Economiques, Université de Bordeaux.
- Pumain D., Racine J.B., 1999, L'homo geographicus : de l'emprunt à l'empreinte, *Revue européenne des sciences sociales*, 37, 113, pp. 77-86.
- Georgescu Roegen N., 1971, *The entropy law and the economic process*, Cambridge, Harvard University Press.
- Routhier J. L., Toilier F., 2010, Freturb : simuler la logistique urbaine. In Antoni J. P. (ss. dir.), *Modéliser la ville. Formes urbaines et politiques de transport*, Economica, pp. 246-283.
- Sachs I, Bergeret A., Schiray M., Sigal S., Théry D., Vinaver K., 2001, *Initiation à l'écodéveloppement*, Toulouse, Privat.
- Satterthwaite D., 1997, Sustainable cities or cities that contribute to sustainable development?, *Urban Studies*, 34, 10, pp.1167-1691.
- Schwarz G., 1978, Estimating the Dimension of a Model; *Annals of Statistics*, 6, 2, pp. 461-4.
- Selman P., 1995, Local Sustainability. Can the planning system help get us from here to there? *Town Planning Review*, 66, 3, pp. 287-302.
- Shen G., 2002, Fractal dimension and fractal growth of urbanized areas, *International Journal of Geographical Information Science*, 16, 5, pp. 519-437.
- Simmonds D., Echenique M., Bates J., Oosterhaven J., 1999, *Review of land-use/transport interaction models*, London, Reports to The Standing Advisory Committee on Trunk Road Assessment, Department

- of the Environment, Transport and the Regions.
- Smith F.L., 1997, La protection de l'environnement par la privatisation écologique : un paradigme pour la réforme environnementale. In : Falque M. et Massenet M. (dir.), *Droits de propriété et environnement*, Dalloz, pp. 49-55.
- Solow R.M., 1974, The Economics of Resources or the Resources of Economics, *American Economic Review*, 64, 2, pp. 1-14.
- Solow R.M., 1992, *An almost practical step toward sustainability*, Washington, Resource for the Future.
- Tannier C., Thomas I., Vuidel G., Frankhauser P., 2011, A Fractal Approach to Identifying Urban Boundaries, *Geographical Analysis*, 43, 2, pp. 211-227.
- Tannier C., Vuidel G., Houot H., Frankhauser P., 2012, Spatial accessibility to amenities in fractal and non fractal urban patterns, *Environment and Planning B : Planning and Design*, 39, 5, pp. 801-819.
- Thomas I., Frankhauser P. Badariotti D., 2012, Comparing the fractality urban districts : Do national processes matter in Europe?, *Journal of Geographical Systems*, 14, 2, pp. 189-208.
- Turner R.K., 1992, Speculations on weak and strong sustainability, *CSERGE Working paper*, GEC 92-96.
- Vivien F.D., 2005, *Le développement soutenable*, La Découverte, Coll. Repère.
- Vivien F.D., 2010, Les antécédents conceptuels du développement soutenable. In : Zuideau B. (ed.), *Développement durable et territoire*, Presses universitaires du Septentrion, pp. 25-35.
- Waddell P., Bhat C., Ruiter E., Bekhor S., Outwater M., Loy Schroer E., 2001, *Land Use and Travel Demand Forecasting Models : Review of the Literature and Operational Models*, Seattle, WA, Final Report to the Puget Sound Regional Council.
- Wegener M., Fürst F., 1999, Land use transport interaction : state of the art. TRANS-LAND, *IRPUD report*.
- Wegener M., 2014, Land Use Transport Interaction models, in Fisher M.M., Nijkamp P. (editors), *Handbook of Regional Science*, Springer, pp. 741-758
- Wiel M., 1999, Mobilité, système d'interactions sociales et dynamiques territoriales, *Espace, populations, sociétés*, 2, pp. 187-194.
- Wiel M., 2010, *Etalement urbain et mobilité*, La Documentation Française, Coll. Transports Recherche Innovation
- Wulfhorst G., L'Hostis A., Puccio B. (2007). Urbanisme et transport dans les régions urbaine. Enjeux et perspectives d'un urbanisme orienté vers le rail, *Recherche Transports Sécurité*, 94, Janvier-Mars 2007, pp.25.

Table des matières

Introduction	1
1 Ville et mobilités durables	4
1.1 Contexte	4
1.1.1 Développement durable : une vision urbaine	5
1.1.1.1. Interventionnisme local et durabilité forte	5
1.1.1.2. Une inscription territoriale	7
1.1.2 Etalement urbain et pénurie énergétique	10
1.1.2.1. Crise et vulnérabilité énergétique	10
1.1.2.2. De l'étalement à la relocalisation	12
1.2 Objectifs	13
1.2.1 Concepts mobilisés et état de l'art	13
1.2.1.1. Formes urbaines	13
1.2.1.2. Densité	14
1.2.1.3. Compacité	15
1.2.2 Modélisation urbanisation/transport	17
1.2.2.1. L'approche prospective	17
1.2.2.2. Une modélisation intégrée	18
Conclusion	20
2 Scénarios, modèles et simulations	22
2.1 Philosophie des scénarios	22
2.1.1 Un cadre commun de mise en œuvre	24
2.1.1.1. Etapes de construction des scénarios	24
2.1.1.2. Scénarios et niveaux de contrainte	26

2.1.2	Les trois scénarios retenus	28
2.1.2.1.	Description des scénarios	28
2.1.2.2.	Spécificités du scénario FOD	30
2.2	Présentation des modèles	31
2.2.1	Les modèles LUTI	32
2.2.1.1.	MobiSim© à Besançon	33
2.2.1.2.	Simbad© à Lyon	36
2.2.1.3.	Convergences et divergences entre Simbad© et MobiSim©	38
2.2.2	Les modèles complémentaires	40
2.2.2.1.	Occupation du sol : MUP-City© © et MorphoLim©	40
2.2.2.2.	Développement FOD : Fractopolis©	41
2.2.2.3.	Fret et activités économiques : Freturb© et Simetab©	44
2.2.3	Principes et techniques d'intégration	47
2.2.3.1.	Intégration des modèles	47
2.2.3.2.	Simulations et requêtes	49
2.2.3.3.	Analyse des résultats	50
2.3	Mise en œuvre des scénarios à Lyon et Besançon	51
2.3.1	Cadre général des scénarios	51
2.3.1.1.	Evolution démographique à horizon 2030	52
2.3.1.2.	Identification des zones constructibles	53
2.3.1.3.	Choix de localisation	53
2.3.2	L'implémentation <i>Laisser faire</i> (LF)	53
2.3.3	Implémentation <i>Renouvellement urbain compact</i> (RUC)	54
2.3.2.1.	A Besançon	54
2.3.2.2.	A Lyon	57
2.3.4	Implémentation <i>Fractal oriented development</i> (FOD)	57
2.3.4.1.	A Besançon	59
2.3.4.2.	A Lyon	63
	Conclusion	66
3	Evaluation et résultats	68
3.1	Critères de choix des indicateurs	69
3.1.1	Exploiter les simulations	69

3.1.2	Une vision couplée des interactions ville-mobilités	69
3.1.3	Vers un système d'indicateurs	72
3.2	Les indicateurs retenus	73
3.2.1	Sous-système « Localisations »	76
3.2.1.1.	Croissance résidentielle	77
3.2.1.2.	Croissance démographique	77
3.2.1.3.	Performance des réseaux	78
3.2.2	Sous-système « Déplacements »	78
3.2.2.1.	Accessibilité à 10 minutes	78
3.2.2.2.	Accessibilité à 0,5 litre	79
3.2.2.3.	Consommation énergétique	79
3.2.2.4.	Parts modales	80
3.2.3	Sous-système « Pratiques et relations sociales »	80
3.2.3.1.	Evolution des revenus	80
3.2.3.2.	Budgets temps	81
3.2.3.3.	Taux d'effort	82
3.3	Analyse des résultats	82
3.3.1	Contexte démographiques des simulations	83
3.3.2	Analyse des localisations	84
3.3.2.1.	Plans locaux d'urbanisme	84
3.3.2.2.	Localisation des ménages	86
3.3.2.3.	Influence du système de transport	91
3.3.3	Analyse des déplacements	96
3.3.3.1.	Accessibilité aux aménités et aux emplois	96
3.3.3.2.	Parts modales	99
3.3.3.3.	Distances et consommations énergétiques	105
3.3.4	Pratiques et relations sociales	107
3.3.4.1.	Revenus	107
3.3.4.2.	Temps de transport	112
3.3.4.3.	Taux d'effort	119
	Conclusion	124

TABLE DES MATIÈRES

138

Références bibliographiques

129