

TANNIER C., BOURGEOIS M., FRÉMOND M. (2017), Simulation de scénarios fractals d'urbanisation et des mobilités quotidiennes résultantes, In : G. Dupuy (dir.) *Villes, réseaux et transport. Le défi fractal*, Economica, Paris, pp. 155-189.

Simulation de scénarios fractals d'urbanisation et des mobilités quotidiennes résultantes

Cécile Tannier, Marc Bourgeois, Maxime Frémond

De nombreux auteurs ont montré le caractère fondamental des interactions existant entre deux composants du système urbain, à savoir l'occupation du sol et les transports (comprenant les mobilités associées) (Wegener 2004 ; 2014). Ces interactions sont complexes et produisent des effets non linéaires. Ceci explique qu'il soit impossible de définir des règles simples associant une forme urbaine donnée à une quantité de trafic donnée (Cervero & Murakami, 2010 ; Conway, 2009 ; Geurs & van Wee, 2006 ; Schwanen et al, 2001), et qu'une extrapolation linéaire des tendances actuelles n'aide pas aux choix futurs d'aménagement. Qui plus est, les mêmes formes de développement urbain peuvent entraîner des évolutions de trafic routier très différentes notamment en raison de la configuration initiale de la zone d'étude. Comme nombre de systèmes complexes, les systèmes urbains se caractérisent par une forte dépendance aux conditions initiales (*path dependency*) (Andersson, 2008). Tous ces constats ont amené certains chercheurs à affirmer qu'il est impossible de définir des préconisations générales d'aménagement qui puissent être appliquées en tous lieux avec succès (Couch, Sykes & Börstinghaus, 2011). Comme il est très difficile d'identifier les possibles points de bifurcation de tendances non linéaires (Wilson, 2010), il est très difficile d'anticiper les configurations futures, tant des localisations des activités que des flux de mobilité, et donc d'estimer les évolutions de trafic qui vont résulter d'un scénario donné de développement urbain.

En raison de la complexité des interactions entre le système des localisations et celui des transports, peu de publications scientifiques présentent des simulations prospectives du développement urbain qui associent les changements d'occupation du sol aux évolutions de trafic. Et un nombre encore moins grand de publications présentent de tels résultats de simulation à résolution spatiale fine. Tel est le défi relevé dans le cadre de deux expérimentations, l'une concernant le Grand-Duché du Luxembourg et l'autre, l'aire urbaine de Besançon située à l'est de la France. Ces deux expérimentations visaient à imaginer des formes de développement résidentiel originales et innovantes, et à étudier leur impact sur les mobilités individuelles quotidiennes.

Pour concevoir et simuler des formes du développement résidentiel originales, le principe adopté a été de combiner les règles d'un développement résidentiel fractal au niveau local avec d'autres règles d'aménagement à l'échelle globale (par exemple, la concentration de la croissance résidentielle dans la ville-centre). Différents scénarios de développement résidentiel ont été simulés suivant ce principe en mobilisant d'une part, l'application MUP-City et des traitements statistiques et géomatiques complémentaires et d'autre part, la plateforme de simulation MobiSim. Ces

scénarios de développement résidentiel ont été simulés à partir de la forme urbaine actuelle dans chacune des zones d'étude pour la période 2010-2030. La simulation a porté sur la création de nouveaux bâtiments résidentiels mais pas sur la construction de nouvelles routes qui leur est souvent associée (Mistova et al., 2011). Les nouveaux bâtiments construits se présentent sous la forme de cellules carrées de 20 mètres de côté, ce qui correspond approximativement à la taille d'une maison individuelle et de son jardin dans les zones d'étude considérées.

Disposer uniquement du développement résidentiel futur (possible ou imaginé) ne suffit pas pour la simulation prospective des mobilités quotidiennes. D'autres évolutions doivent être prises en compte : évolutions démographiques, sociales, économiques, technologiques, évolution des réseaux de transport... Les deux expérimentations présentées ici ont tenu compte des évolutions démographiques, de la hausse du prix du carburant et des changements de localisations résidentielles des ménages.

L'expérimentation concernant le Grand-Duché du Luxembourg a consisté en la simulation des mobilités quotidiennes à l'état initial en 2010 au moyen de la plateforme MobiSim, sur la base de l'occupation du sol et des localisations des activités et des individus existantes. Une autre simulation a été réalisée pour l'année 2030. A cet effet, une population artificielle d'individus et de ménages créée à partir de projections démographiques et l'allocation résidentielle des ménages réalisées dans le cadre du projet MOEBIUS (Gerber et al., 2013) ont été projetées sur différents développements résidentiels simulés au moyen de MUP-City.

L'expérimentation concernant l'aire urbaine de Besançon a consisté en différentes simulations dynamiques LUTI (*Land Use and Transport Integrated*) des évolutions annuelles 2010-2030 au moyen de la plateforme MobiSim. Les résultats de simulation issus de MUP-City ont été intégrés dans MobiSim en entrée de simulation.

1. Description des modèles utilisés

1.1 MUP-City : simulation fractale de nouveaux développements résidentiels

L'application MUP-City permet d'identifier des développements résidentiels potentiellement intéressants pour des villes européennes de 100 000 à 1 000 000 d'habitants environ, partant d'un tissu urbain existant. La localisation des cellules intéressantes à urbaniser est déterminée par un principe fractal d'urbanisation, sur la base d'une décomposition multi-échelle du tissu bâti existant (Figure 1). Outre le choix d'une dimension fractale pour les nouveaux développements résidentiels (correspondant à la variable N_{\max} dans la figure 1), le principe d'urbanisation fractal impose que les cellules non urbanisées au niveau de décomposition l_1 ne peuvent être urbanisées à un niveau de décomposition plus fin l_2 . Ainsi, la connectivité des espaces non bâtis est préservée.

Neuf règles additionnelles d'aménagement ajoutent des contraintes supplémentaires au développement résidentiel simulé :

1. Préservation du contact entre bâti et non bâti tout en minimisant la fragmentation des espaces non bâtis (règle morphologique)

2. Proximité au réseau routier existant
3. Bonne accessibilité aux commerces et services de fréquentation quotidienne
4. Bonne accessibilité aux commerces et services de fréquentation hebdomadaire
5. Bonne accessibilité aux commerces et services de fréquentation mensuelle ou plus rare
6. Bonne accessibilité au réseau de transport en commun
7. Bonne accessibilité aux espaces naturels et de loisir de fréquentation potentielle quotidienne
8. Bonne accessibilité aux espaces naturels et de loisir de fréquentation potentielle hebdomadaire
9. Bonne accessibilité aux espaces naturels et de loisir de fréquentation potentielle mensuelle ou plus rare

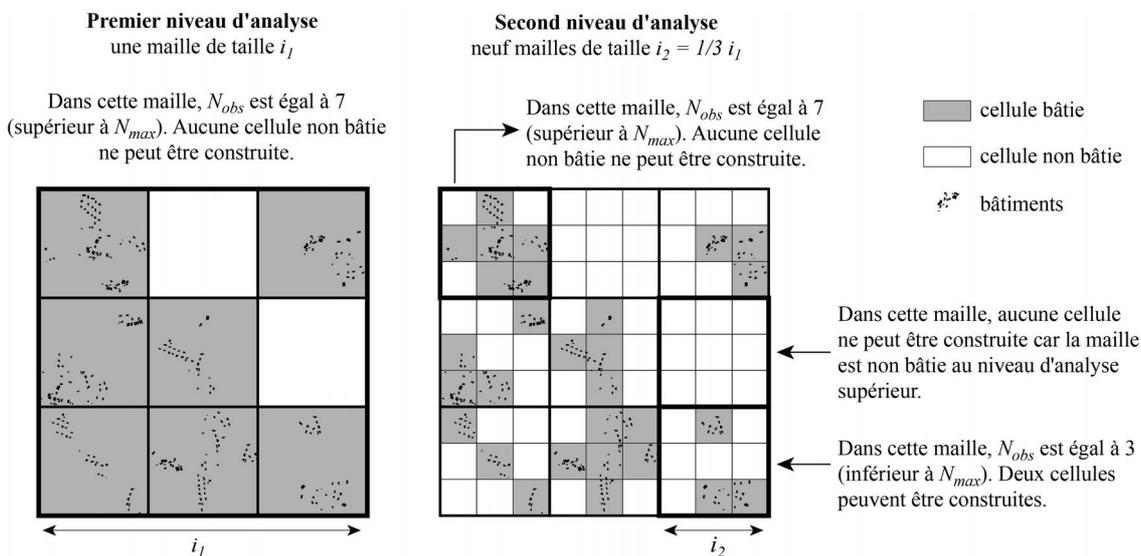


Figure 1. Exemple d'application de la règle fractale d'urbanisation pour N_{max} égal 5, soit une dimension fractale égale à 1,46. D'après (Tannier et al., 2012b).

Chaque règle additionnelle d'aménagement est représentée par une valeur d'évaluation comprise entre 0 et 1 pour chacune des cellules. Ces différentes valeurs d'évaluation sont ensuite agrégées en une valeur synthétique d'intérêt de chaque cellule à être urbanisée. Tout ou partie des règles peuvent être appliquées pour effectuer une simulation de développement résidentiel. Le poids de chacune des règles dans l'évaluation synthétique de l'intérêt des cellules à être urbanisées peut être différent d'une simulation à une autre, de manière à représenter différentes orientations d'aménagement. Pour agréger les évaluations issues des différentes règles en une valeur d'évaluation synthétique, deux possibilités sont proposées : la somme pondérée ou la méthode d'agrégation de Yager (1977) qui inclut la méthode de comparaison par paire de Saaty (1977). En utilisant la somme pondérée (avec la somme des poids des règles normalisée à 1), aucune évaluation ne diminue le total de l'agrégation. Au contraire, la méthode d'agrégation de Yager (1977) représente une application beaucoup plus stricte (ou exigeante) des différentes règles d'aménagement. De ceci résulte une différenciation plus importante des cellules au regard de leur intérêt à être urbanisées.

Dans MUP-City, la prise en compte de zones non urbanisables (zones naturelles protégées, zones de fortes pentes, zones inondables...) suit également une logique multi-échelle. Le développement résidentiel est possible dans une cellule uniquement quand celle-ci contient davantage de zones urbanisables que de zones non urbanisables.

Tableau 1. Modélisation multi-échelle dans MUP-City

Règle d'aménagement	Représentation dans MUP-City
Règle fractale d'urbanisation	Résolutions spatiales emboîtées
Prise en compte des zones non-urbanisables	Résolutions spatiales emboîtées
Règle morphologique	Résolutions spatiales emboîtées
Règle de proximité à la route	Taille du voisinage (en nombre de cellules) variable en fonction de la résolution spatiale considérée
Règles d'accessibilité	Portées spatiales (distances maximales acceptables) variables en fonction de la nature et de la fréquence de recours des commerces et services ou des infrastructures vertes et de loisir considérés Portées spatiales fixes à travers les résolutions spatiales

La version initiale 0.8 de MUP-City comportait les règles additionnelles d'aménagement n°1 à 4 et ne s'appliquait qu'aux zones périurbaines (Frankhauser et al. 2010 ; Tannier et al., 2010 ; Tannier et al., 2012a et b). La version actuelle 1.2 comporte davantage de règles (ajout des règles n°5 à 9) et les règles 3 et 4 ont été modifiées de manière à permettre l'application de MUP-City à l'ensemble d'une région urbaine (Bourgeois, 2015 ; Frémond, 2015 ; Tannier et al., 2016b)¹.

1.2 La plateforme de simulation MobiSim

MobiSim² est une plateforme de simulation LUTI qui permet d'identifier les conséquences possibles, sur l'organisation des flux de mobilité quotidienne et résidentielle, de scénarios d'aménagement (modification de l'offre de transport en commun, réduction de la vitesse de tronçons routiers, ouverture de nouvelles zones à l'urbanisation...) ou d'évolutions socio-économiques (hausse du prix du carburant, augmentation du nombre de familles monoparentales...). La modélisation, spatialement explicite, est désagrégée au niveau des individus, des ménages et des logements. La durée du pas de simulation est d'une année. A l'initialisation d'une simulation, MobiSim crée une population artificielle d'individus, de ménages et de logements reconstituée à partir des données de recensement de population de l'INSEE disponibles à l'échelle des IRIS ou des communes (Antoni, Lunardi & Vuidel, 2016) (Figure 2). La population (individus et ménages) évolue chaque année au moyen d'un modèle de microsimulation des événements démographiques (naissances, décès, mises en couple...) (Hirtzel, 2015). Chaque année simulée, certains ménages déménagent et une partie d'entre eux s'installent dans les nouveaux logements

¹ L'application, accompagnée de son descriptif, est disponible en ligne : <https://sourcesup.renater.fr/mupcity/>

² Site web : <http://thema.univ-fcomte.fr/mobisim/>

créés par simulation. De ces mouvements de population résulte une modification du trafic sur les réseaux de transport pour les déplacements quotidiens (travail, courses, loisirs...).

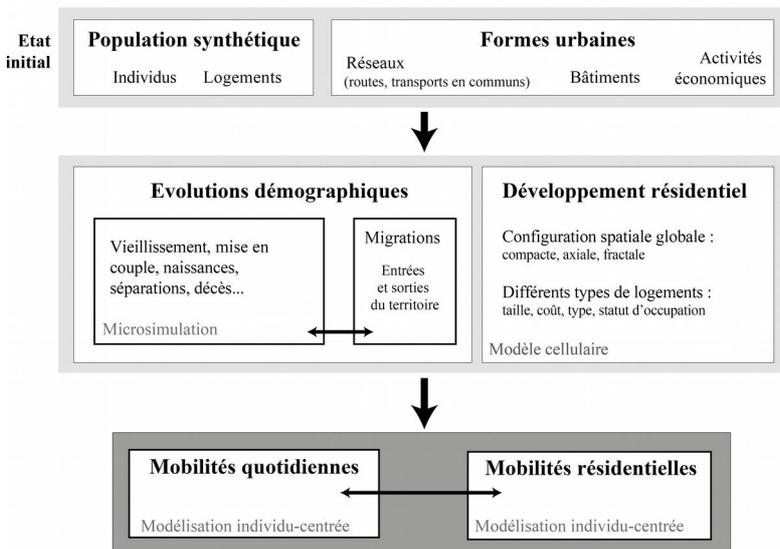


Figure 2. Architecture de la plateforme de simulation MobiSim.

Le module de simulation des mobilités quotidiennes individuelles de MobiSim fonctionne sur la base d'un modèle de trafic à quatre étapes (Antoni, Lunardi, Vuidel, 2016). Les déplacements inter-urbains ne sont pas simulés par MobiSim mais le trafic correspondant, estimé à partir des données de comptage routier, peut être ajouté au trafic intra-urbain pour chaque tronçon routier. Le modèle de simulation des migrations résidentielles considère, lui, les ménages et non les individus. La migration résidentielle résulte d'une interaction *push-pull* entre des éléments qui poussent le ménage à déménager (*push*) et des éléments qui l'amènent à choisir une localisation résidentielle plutôt qu'une autre (*pull*) (Tannier et al., 2016a).

1.3 Zoom sur le module de simulation du développement résidentiel de MobiSim

Dans MobiSim, le module de simulation du développement résidentiel permet de simuler la création de nouveaux bâtiments résidentiels et d'affecter des logements dans les bâtiments construits par simulation. Quatre statuts d'occupation des logements sont représentés : propriétaire-occupant, locataire privé, locataire social et propriétaire-occupant en logement en coût maîtrisé. La simulation du développement résidentiel avec MobiSim se déroule en trois temps.

En premier lieu, à l'échelle de l'ensemble de la région urbaine (échelle macro-géographique), on définit le nombre total de logements qui seront créés par année de simulation. On définit également leur répartition en fonction de leur type (maison individuelle ou appartement dans un immeuble collectif) et de leur taille exprimée en nombre de pièces.

Ensuite, à une échelle méso-géographique, on fixe un principe de répartition spatiale des logements créés. A l'échelle de l'ensemble de l'agglomération urbaine (macro-géographique), on applique un modèle de croissance soit, aux taches urbaines (agrégats bâtis) existants, soit aux communes ou

quartiers de l'agglomération. Différents modèles de croissance peuvent être appliqués, de manière à simuler différents scénarios de développement résidentiel, par exemple la croissance de chaque tache urbaine ou de chaque commune proportionnellement à sa population actuelle ; un développement résidentiel privilégiant les taches urbaines ou les communes les plus importantes ; un développement résidentiel différencié en vue d'accentuer le caractère polycentrique hiérarchisé de l'agglomération.

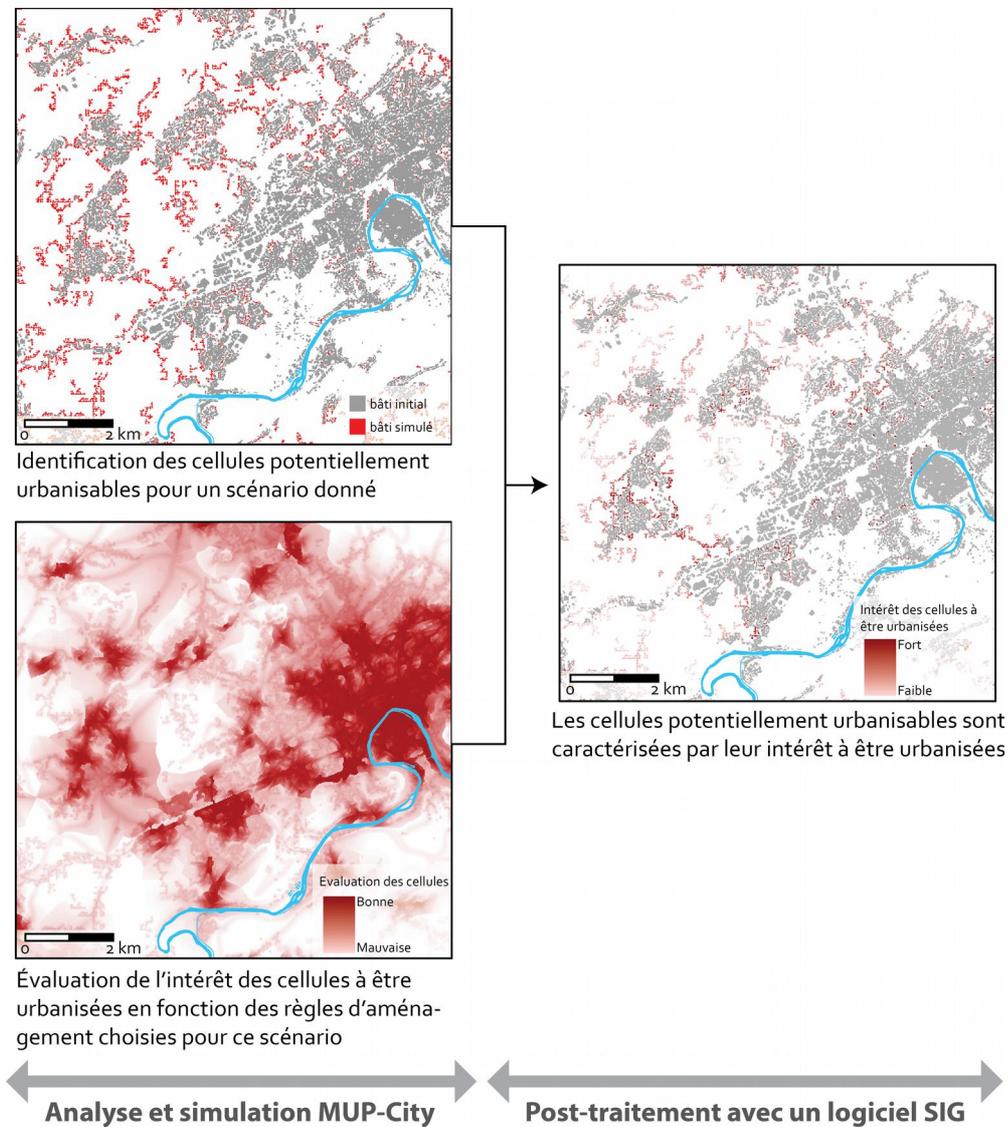


Figure 3. Préparation des données de simulation issues de MUP-City pour leur intégration dans MobiSim. D'après (Bourgeois, 2015).

A une échelle locale (micro-géographique), de nouveaux bâtiments sont construits par MobiSim de manière à accueillir tous les logements précédemment créés. Les bâtiments sont localisés dans les cellules les plus intéressantes à urbaniser définies au moyen de l'application MUP-City (Figure 3). 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. Sur cette base, MobiSim construit des bâtiments en les localisant à l'intérieur ou à proximité des agrégats bâtis existants, dans les cellules intéressantes à urbaniser d'après une carte issue de MUP-City. Les bâtiments sont d'abord placés au sein même des agrégats bâtis puis, quand il ne reste plus de cellules urbanisables

en leur sein, à des distances croissantes de ceux-ci jusqu'à ce que tous les logements générés au départ soient abrités dans un bâtiment.

La simulation d'un développement résidentiel fractal à une échelle locale avec la plateforme MobiSim passe donc par l'intégration, en entrée de simulation, de configurations fractales de développement résidentiel créées avec MUP-City. On obtient ainsi, pour chaque scénario, une carte des bâtiments nouvellement créés (Figure 4). Chaque bâtiment est caractérisé par son année de construction, son type (maison individuelle ou immeuble collectif) et le nombre de logements (différenciés en fonction de leur taille) qu'il contient.

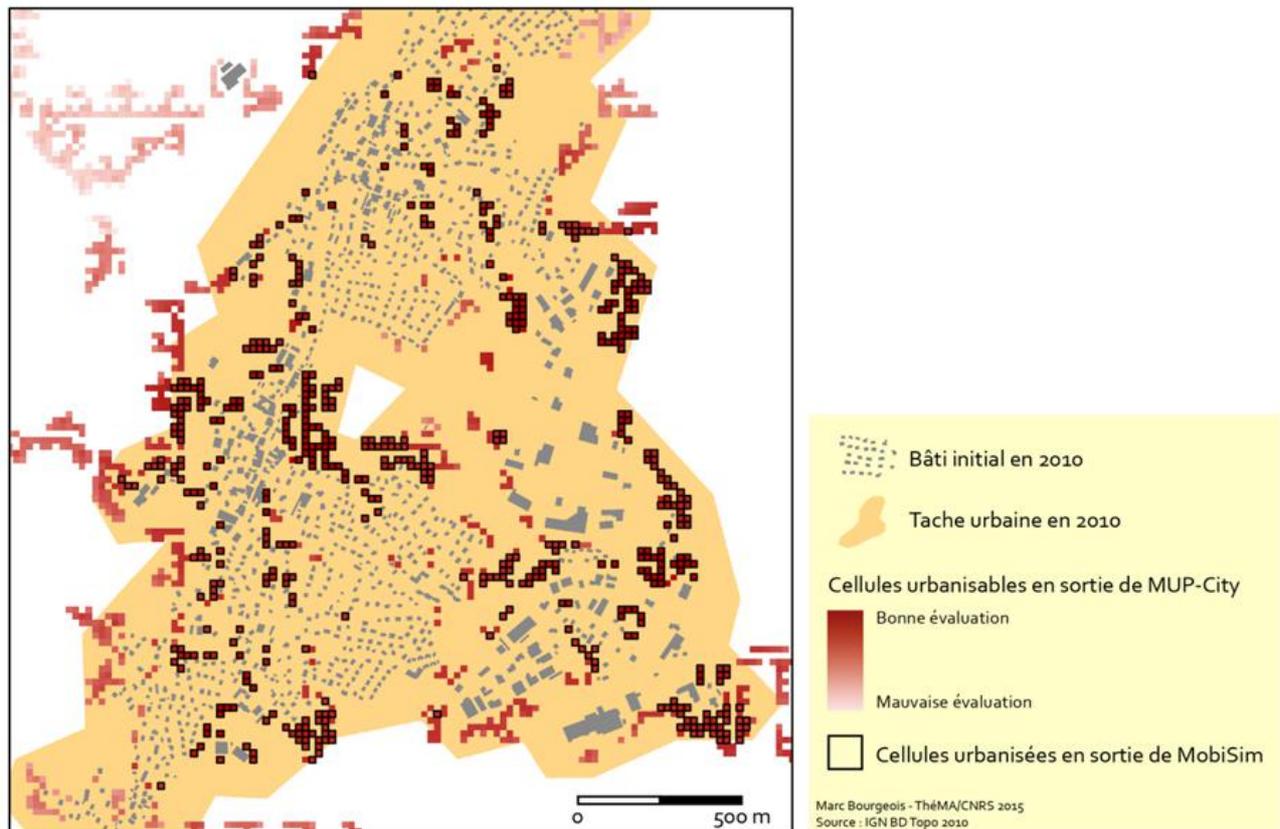


Figure 4. Comparaison des sorties de simulation de MUP-City et de MobiSim. Exemple pour les communes de Serre-les-Sapins et Franois (département du Doubs). Tiré de (Bourgeois, 2015).

2. Aperçu synthétique sur les deux expérimentations

Les deux expérimentations consistent en la simulation de plusieurs scénarios contrastés de développement résidentiel à l'horizon temporel 2030, et des mobilités quotidiennes individuelles résultantes. Les points communs des deux expérimentations concernent essentiellement les outils de simulation utilisés (MUP-City et MobiSim) ainsi que la démarche de scénarisation adoptée. Elles diffèrent de par leurs objectifs en matière d'étude prospective des mobilités quotidiennes. Pour le Grand-Duché du Luxembourg, l'objectif était d'étudier les parts modales, distances parcourues et temps de transport des individus pour chacun des scénarios de développement résidentiel. Pour l'aire urbaine de Besançon, ce sont les effets de barrière du trafic routier sur la connectivité des habitats de différentes espèces animales qui étaient visés par l'étude. Ce faisant, dans la suite du

chapitre, les résultats obtenus concernant les mobilités quotidiennes des individus seront davantage détaillés pour la première expérimentation que pour la seconde. Les démarches méthodologiques adoptées dans chacune des expérimentations sont aussi différentes. Pour le Luxembourg, plusieurs modèles ont été appliqués successivement pour simuler les configurations du bâti et des mobilités quotidiennes d'abord en 2010, puis en 2030. Pour l'aire urbaine de Besançon, les simulations ont été intégralement réalisées avec la plateforme MobiSim et la situation en 2030 résulte des dynamiques annuelles simulées entre 2010 et 2030.

Tableau 2. Informations et données mobilisées pour chacune des expérimentations

	Informations	Données utilisées	
		Aire urbaine de Besançon	Grand-Duché du Luxembourg
Pour la simulation du développement résidentiel	Zones non urbanisables : zones naturelles protégées et zones de captage des eaux, zones de fortes pentes, surfaces en eau, zones inondables	DREAL, 2009 BD Topo DEM® IGN, 2010 BD Topo® IGN, 2010 Cartorisque, MEDDE (http://cartorisque.prim.net/ , accès août 2012)	OBS, 1999 BD-L-TC, IGN, 2010
	Bâtiments (emprise au sol)	BD Topo® IGN, 2010	BD-L-TC, IGN, 2010
	Réseau des routes et chemins	BD Topo® IGN, 2010	BD-L-TC, IGN, 2010
	Commerces et services	BD SIRENE INSEE 2012	Editus, 2010, géolocalisée
	Infrastructures vertes et de loisirs	-	OBS, 1999 BD-L-TC, IGN, 2010
	Stations de transport en commun : tram et trains régionaux	Saisie manuelle à partir des plans fournis par la Communauté d'agglomération du Grand Besançon	BD-L-TC, IGN, 2010
Pour la simulation des mobilités quotidiennes individuelles	Données sociodémographiques sur les individus, les ménages et les logements	Recensement de la population INSEE, 2009	Recensement de la population ; STATEC, 2010
	Localisation des activités (commerces, services, autres entreprises...)	BD SIRENE INSEE 2012	Zones d'emplois, BD-L-TC, IGN, 2010
	Tables horaires des réseaux de transport public	Saisie manuelle à partir des documents de bus, tram et trains régionaux fournis par les autorités organisatrices des transports (Ginko, SNCF)	Communauté des Transports au Luxembourg (Verkéiersverbond)
	Caractéristiques fonctionnelles des tronçons routiers (capacité, vitesse réglementaire, sens de circulation, sinuosité, pente)	Saisie manuelle et calculs géomatiques	Saisie manuelle et calculs géomatiques
	Quantification du trafic de transit	Données de comptage routier : Direction interdépartementale des routes Centre-Est, 2013 ; Conseil Général du Doubs, 2009 à 2012 ; Conseil Général de Haute-Saône, 2008 à 2012	-

Chaque zone d'étude à l'état initial (en 2010) est représentée de manière très détaillée (Tableau 2). Les mêmes informations sont prises en compte dans les deux cas mais renseignées par des données issues de sources différentes.

Pour le Grand-Duché du Luxembourg, les évolutions démographiques consistent en une projection pour 2030 (hypothèse dite « baseline » des projections démographiques du STATEC, organisme statistique luxembourgeois). Selon cette projection, la population atteint 720 738 individus en 2030 contre 506 953 individus en 2010. Pour l'aire urbaine de Besançon, les évolutions démographiques ont été simulées annuellement au moyen du modèle de microsimulation de MobiSim. D'environ 234 340 individus en 2010, la population atteint 289 780 individus en 2030.

Dans le cas du Grand-Duché du Luxembourg, la projection démographique fixe l'objectif à atteindre en matière de quantité de logements à construire d'ici 2030, à savoir 129 759 logements. Des règles de densité (nombre de logements par hectare) permettent ensuite de convertir cet objectif en nombre de cellules bâties à créer avec MUP-City et des traitements géomatiques complémentaires. Pour l'aire urbaine de Besançon, la quantité de logements à construire a été fixée à 1 400 logements par an, en tenant compte à la fois de la faible croissance du nombre d'individus et de l'augmentation marquée du nombre de ménages. Cet objectif est en accord avec le SCoT (Schéma de cohérence territoriale, 2011), dont le périmètre est restreint vis-à-vis de celui de l'aire urbaine et qui préconise de construire 1 250 logements chaque année. Les logements nouvellement construits sont placés par MobiSim dans des cellules identifiées comme intéressantes à urbaniser par MUP-City.

Les scénarios de développement résidentiel simulés dans les deux expérimentations ont vocation à être réalistes, c'est-à-dire qu'ils représentent des futurs plausibles, sinon possibles, de la croissance résidentielle. Les formes locales des développements résidentiels simulés sont fractales. Pour Besançon, les scénarios font varier la dimension fractale du développement résidentiel entre 1,46 et 1,77. Pour le Luxembourg, la dimension fractale ne varie pas ; elle a été fixée à 1,77. Quand la dimension fractale est proche de 1,5, les tissus bâtis sont caractérisés par une grande diversité de tailles des agrégats bâtis et de distances entre ces agrégats. Inversement, une dimension fractale proche de 2 caractérise des tissus bâtis uniformes, dans lesquels les bâtiments peuvent être soit concentrés, soit dispersés (Thomas, Frankhauser & De Keersmaecker, 2007; Thomas, Frankhauser & Biernacki, 2008). A l'échelle globale, différents zonages sont adoptés pour concentrer le développement résidentiel en certains lieux de chaque zone d'étude. Pour Besançon, le zonage consiste en la délimitation des taches urbaines (agrégats bâtis) et leur classification par taille. Selon les scénarios, le développement résidentiel est concentré uniquement dans la tache urbaine principale (agglomération morphologique) ou bien réparti entre les différentes classes de taille de taches urbaines. Dans l'expérimentation du Luxembourg, les scénarios sont basés chacun sur une typologie de communes différente, le développement résidentiel étant plus ou moins concentré dans chaque commune selon sa classe d'appartenance.

La simulation du développement résidentiel au Luxembourg intègre davantage de contraintes d'aménagement qu'à Besançon (Tableau 3). L'importance des différentes règles d'aménagement varie selon que la priorité est donnée à la proximité aux commerces et services ou bien aux

transports en commun. Les normes d'accessibilité ont été choisies différemment pour Besançon et le Luxembourg mais sont identiques pour tous les scénarios d'une même aire étude (Tableau 4).

Tableau 3. Valeur d'importance accordée aux différentes règles d'aménagement

Intitulé de la règle	Grand-Duché du Luxembourg		Aire urbaine de Besançon	
	Favoriser l'accessibilité aux commerces et services	Favoriser l'accessibilité aux transports en commun	Favoriser l'accessibilité aux commerces et services	Favoriser l'accessibilité aux transports en commun
Règle morphologique	0,295	0,279	0.749	0.411
Proximité au réseau routier existant	0,383	0,279	0.233	0.201
Proximité aux stations de transport en commun	0,474	3,944	1.05	2.876
Accessibilité aux commerces de services de fréquentation quotidienne	3,396	0,700	2.406	1.053
Accessibilité aux commerces de services de fréquentation hebdomadaire	1,618	0,700	0.507	0.460
Accessibilité aux commerces de services de fréquentation mensuelle ou plus rare	0,835	0,700	<i>Non considérée</i>	<i>Non considérée</i>
Accessibilité aux espaces naturels et de loisir de fréquentation quotidienne	<i>Non considérée</i>	<i>Non considérée</i>	<i>Non considérée</i>	<i>Non considérée</i>
Accessibilité aux espaces naturels et de loisir de fréquentation hebdomadaire	0,564	0,700	<i>Non considérée</i>	<i>Non considérée</i>
Accessibilité aux espaces naturels et de loisir de fréquentation mensuelle ou plus rare	0,435	0,700	<i>Non considérée</i>	<i>Non considérée</i>

Tableau 4. Normes d'accessibilité choisies pour chacune des expérimentations

	Distance maximale acceptable	
	Grand-Duché du Luxembourg	Aire urbaine de Besançon
Commerces de services de fréquentation quotidienne	400 m.	400 m.
Commerces de services de fréquentation hebdomadaire	2 000 m.	2 000 m.
Commerces de services de fréquentation mensuelle ou plus rare	15 min.	<i>Non considérée</i>
Espaces naturels et de loisir de fréquentation quotidienne	400 m.	<i>Non considérée</i>
Espaces naturels et de loisir de fréquentation hebdomadaire	2 000 m.	<i>Non considérée</i>
Espaces naturels et de loisir de fréquentation mensuelle ou plus rare	5 000 m.	<i>Non considérée</i>
Stations de transport en commun : bus ou tramway	300 m.	400 m.
Stations de transport en commun : train	500 m.	3 000 m.

L'agrégation des évaluations résultant de l'application de chacune des règles en une valeur synthétique d'intérêt de chaque cellule à être urbanisée fait appel à l'opérateur de Yager (1977) dans le cas de l'expérimentation au Luxembourg, et de la moyenne arithmétique pondérée dans le cas de Besançon. En effet dans ce deuxième cas, le nombre de cellules identifiées comme intéressantes à urbaniser avec l'opérateur de Yager était trop réduit pour permettre au module de développement résidentiel de MobiSim de localiser la totalité de 1 400 logements à construire chaque année. La moyenne arithmétique, de par la compensation qu'elle effectue lors de l'agrégation des différentes valeurs d'évaluation, est moins exigeante. Ce faisant, davantage de cellules sont identifiées comme intéressantes à urbaniser.

Les scénarios conçus dans le cadre de chaque expérimentation impliquent une seule variable de contexte, à savoir la hausse du prix du carburant. Les règles de comportement des individus, en particulier la détermination de leur planning d'activités et les règles de choix des modes de transport utilisés pour chacun de leurs trajets, sont fixes : elles ne changent ni pour la période 2010-2030, ni d'un scénario à un autre. Le choix modal s'effectue entre trois modes uniquement : la marche à pied, les transports en commun et la voiture. Ainsi, les différences entre les scénarios résultent uniquement de la modification de variables spatiales intervenant dans la définition des formes locales et globales du développement résidentiel simulé. L'expérimentation sur l'aire urbaine de Besançon fait intervenir deux variations spatiales qui n'interviennent pas dans le cas du Luxembourg. La première est l'ajout de nouvelles haltes ferroviaires pour l'un des scénarios (cf. section 4.1). La deuxième est l'introduction d'une ligne de tramway à Besançon en 2015 tandis que la mise en place du tramway à Luxembourg-Ville, prévue pour 2018 au moment de la réalisation de l'expérimentation, n'est pas représentée.

3. L'expérimentation pour le Grand-Duché du Luxembourg

Avec ses 2 586 km², le Grand-Duché du Luxembourg est l'un des plus petits pays d'Europe. Il comptait 506 953 habitants en 2010. L'utilisation de l'automobile y est intense. D'après les données de la Banque mondiale diffusées en 2010, le Grand-Duché est le sixième pays émetteur de CO² par habitant, derrière Trinité-et-Tobago, le Qatar, le Koweït, Aruba et le Brunei. C'est également le huitième pays en matière de consommation énergétique (en kilogrammes de pétrole par habitant). Avec un développement économique important ces dernières décennies et malgré la crise économique de 2008, le nombre d'emplois au Luxembourg ne cesse d'augmenter, selon un rythme annuel de 3% entre 1985 et 2012 (Schuller & Sinner, 2013). Ces emplois sont occupés à 42 % par des travailleurs frontaliers venus des pays voisins (Allemagne, Belgique et France). En 2010, le Luxembourg attirait quotidiennement 150 000 frontaliers et ce nombre ne cesse d'augmenter. La croissance économique se double d'une forte croissance démographique, alimentée principalement par l'immigration. Les enjeux soulevés par ces dynamiques sont considérables en termes d'aménagement du territoire, d'infrastructures, de logements, de mobilités, et des conséquences environnementales qui y sont associées. Au regard de ceci, l'objectif de l'expérimentation a été de proposer des formes de développement résidentiel qui permettent de réduire l'utilisation de la voiture pour les déplacements quotidiens des individus.

3.1 Simulation de trois scénarios de développement résidentiel

Dans le premier scénario, dit IVL, 80 % des extensions résidentielles sont localisées au sein de 39 communes prioritaires, conformément aux législations et à la planification en vigueur au Luxembourg. La densité de construction est différenciée : une densité de 35 logements à l'hectare est définie pour les communes prioritaires tandis que les autres communes se voient attribuer une densité conforme aux dynamiques observées à l'heure actuelle, soit environ 18 logements à l'hectare. Avec ces densités de logements, le nombre de cellules potentiellement urbanisables d'ici 2030 pour ce scénario est de 120 027 cellules, qui permettent de localiser les 129 759 nouveaux logements d'ici 2030. Les communes prioritaires de l'IVL reçoivent 84 343 cellules nouvellement urbanisées. 35 684 autres cellules sont placées dans les communes complémentaires. Pour le calcul de l'intérêt des cellules à être urbanisées, la priorité est donnée à l'accessibilité aux commerces et services plutôt qu'aux transports en commun.

Le scénario FOD (*Fractal Oriented Development*) consiste en la traduction d'une politique d'aménagement davantage volontariste. L'objectif est de concentrer le développement résidentiel à proximité immédiate des infrastructures de transports en commun, en l'occurrence les gares ferroviaires. La contrainte de proximité aux infrastructures ferroviaires a été introduites de la façon suivante : l'accessibilité piétonne a été calculée pour toutes les gares du Grand-Duché, sur une distance de 1 000 mètres. Une zone de desserte a ainsi été définie afin de limiter les futures constructions à ce seul périmètre. Les cellules identifiées comme intéressantes à urbaniser par MUP-City et localisées dans ces zones de dessertes sont au nombre de 27 085. Logiquement, pour le calcul de l'intérêt des cellules à être urbanisées, une importance supérieure a été accordée à la proximité aux stations de transports en commun. La conversion du nombre de cellules sélectionnées en une densité de logements, via le calcul du ratio entre le nombre de logements et la surface totale des 27 085 cellules urbanisables, aboutit à une densité de construction d'environ 80 logements par hectare.

Le troisième scénario, dit des 23 communes, vise à renforcer la hiérarchie urbaine existante et axer le développement urbain sur les trois zones les plus urbanisées du pays : l'agglomération de Luxembourg-ville, la région Sud et l'agglomération de la Nordstad. Pour le calcul de l'intérêt des cellules à être urbanisées, la priorité a été donnée à l'accessibilité aux commerces et services. Dans les 3 pôles urbains, 78 105 cellules ont été identifiées par MUP-City comme étant intéressantes à urbaniser. Ceci revient à appliquer une norme de 42 logements par hectare, ce qui est légèrement supérieur à la norme de densité appliquée dans le scénario IVL.

3.2 Création d'une population artificielle et allocation résidentielle des ménages pour l'année 2030

La construction d'une population artificielle d'individus et de ménages pour l'année 2030 a consisté en la construction d'une population artificielle pour l'année de référence 2010 puis en l'évolution de cette population, année par année, jusqu'à l'horizon de simulation 2030 (Cornélis & Barthélémy, 2015). Les fréquences des événements démographiques (naissances, décès, mises en couple...)

observées en 2010 ont permis de déterminer les probabilités que ces événements arrivent aux ménages ou aux individus entre 2010 et 2030.

Ensuite, le modèle d'allocation résidentielle développé par Geoffrey Caruso et Cyrille Médard de Chardon à l'Université de Luxembourg (Caruso, 2005 ; Caruso & Médard de Chardon, 2012) a été utilisé pour localiser les ménages de la population artificielle dans les cellules des développements résidentiels simulés. Ce modèle repose sur un processus micro-économique d'enchères entre les ménages sous contrainte d'une maximisation de leur utilité. Les choix de localisation résidentielle sont basés uniquement sur les caractéristiques de l'environnement résidentiel et non celles des logements.

3.3 Résultats de simulation des mobilités quotidiennes individuelles avec MobiSim-MQ

En 2030, le nombre de déplacements simulés est presque identique pour chaque scénario : environ 2,88 millions de déplacements. La différence maximale entre les scénarios est négligeable : 1 944 déplacements entre le scénario FOD et le scénario des 23 communes. Sachant que la population a augmenté de 43 % depuis 2010 et que le nombre de déplacements a augmenté de 72%, cela représente 4 déplacements par jour par individu, contre 3,33 en 2010 (Figure 5). Un fait intéressant est que le nombre de déplacements en voiture croît moins fortement que celui des deux autres modes de transports. Pour le scénario FOD, le nombre moyen de déplacements effectués en voiture par chaque individu est le même en 2030 qu'en 2010. Pour les scénarios IVL et 23 communes, le nombre de déplacements effectués en marche à pied est plus important que le nombre de déplacements effectués en transports en commun. L'objectif de 25% en marche à pied visé par le gouvernement luxembourgeois n'est toutefois pas atteint, quand bien même les règles de construction des scénarios étaient relativement strictes sur cet aspect.

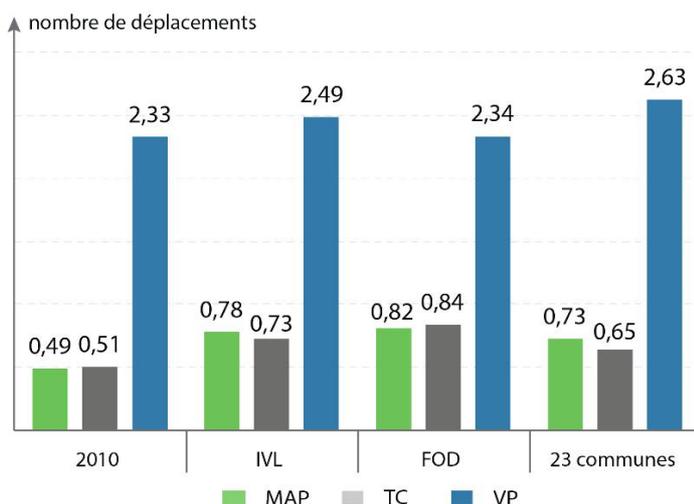


Figure 5. Comparaison du nombre de déplacements quotidiens par individu et par mode entre la situation de référence en 2010 et les scénarios en 2030. Tiré de (Frémond, 2015).

Pour l'ensemble des scénarios, on constate un recul de la part modale de la voiture et une augmentation de la part des déplacements en transports en commun et en modes doux (Figure 6). Le

scénario FOD montre les changements les plus conséquents, avec une diminution de 16,4 % de la part des déplacements en voiture, passant de 70 % en 2010 à 58,5 % en 2030. Parallèlement, la part des transports en commun augmente de 38 % tandis que la part de la marche à pied augmente de 39 %. Le scénario IVL arrive en deuxième position en matière de partage modal. Le scénario des 23 communes, pourtant plus compact d'un point de vue global, voit la part des déplacements liés à la voiture se réduire le moins (de 70 % à 65,6 %).

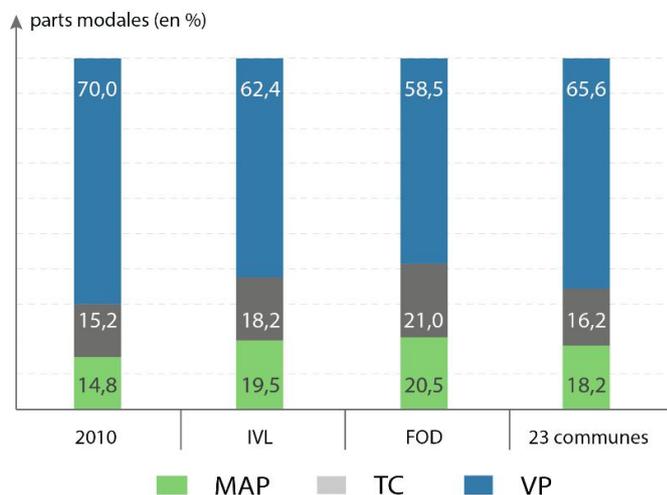


Figure 6. Comparaison des parts modales entre la situation de référence en 2010 et les scénarios en 2030. Tiré de (Frémond, 2015).

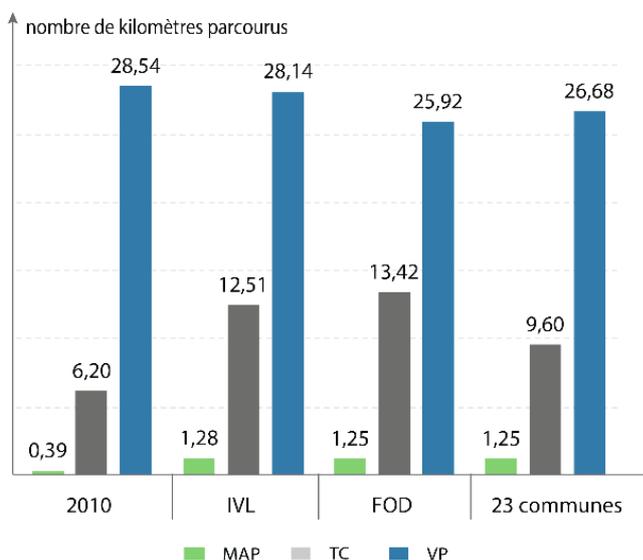


Figure 7. Comparaison des distances moyennes parcourues par mode et par individu, entre la situation de initiale en 2010 et les scénarios en 2030 (en kilomètres). Tiré de (Frémond, 2015).

Entre la situation initiale et les scénarios, les individus parcourent de plus longues distances (Figure 7). Cependant, les distances en voiture diminuent, tandis que les distances en transports en commun et en marche à pied augmentent fortement. Plusieurs explications sont possibles : 1) le report modal a aussi été effectué par des individus se déplaçant sur de longues distances (du nord du pays vers la capitale par exemple) ; 2) malgré une offre en commerces et services de proximité conséquente, les individus choisissent de fréquenter des lieux éloignés de leur domicile, à proximité

de leur lieu de travail, du fait des pérégrinations et des chaînes d'activités. Quoiqu'il en soit, chaque scénario engendre des changements dans les distances moyennes parcourues, ce qui montre l'intérêt des règles de développement résidentiel appliquées dans la construction des scénarios. Ces résultats confirment la relation positive entre la proximité des espaces résidentiels et des réseaux de transports publics, et leur utilisation (Kitamura et al., 1997 ; Cervero, 2002).

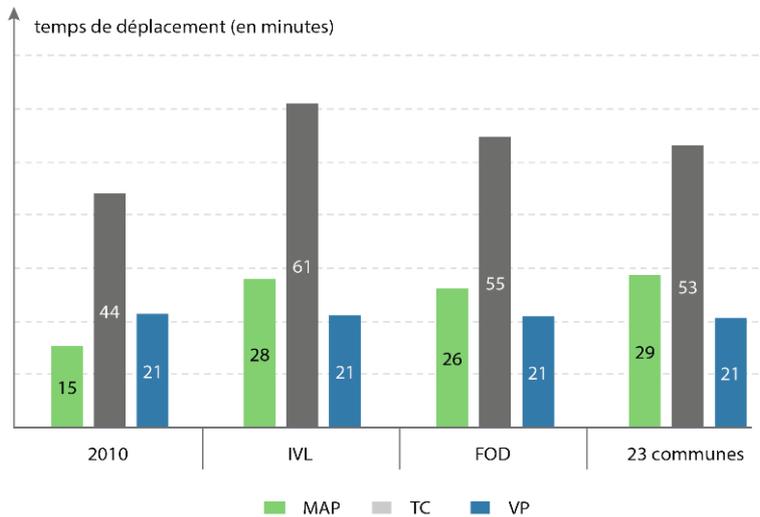


Figure 8. Comparaison des budgets-temps moyens par déplacement, par motif et par mode entre la situation de référence en 2010 et les scénarios en 2030 (en minutes). Tiré de (Frémond, 2015).

L'analyse des budgets-temps de déplacement (Figure 8) et des vitesses sur le réseau routier (Figure 9) permet d'étudier la relation entre la saturation des réseaux de transports (ici routiers) et le report modal. Les transports en commun et la marche à pied étant beaucoup plus utilisés dans les scénarios que dans la situation initiale, il est logique que les temps de déplacements qui leur sont accordés augmentent. L'analyse des baisses de vitesse de circulation apporte une information supplémentaire, avec la répartition spatiale de la congestion due aux nouvelles extensions résidentielles : la concentration du développement résidentiel induit la congestion sur les routes voisines, avec des ralentissements plus conséquents à proximité des espaces accueillant le plus de nouveaux ménages. Ainsi, les baisses de vitesses observées dans le cadre du scénario des 23 communes touchent moins de tronçons que dans le cadre du scénario IVL et pourtant, c'est le scénario qui subit le plus de congestion. Le scénario FOD, qui connaît le report modal le plus favorable vers les alternatives à la voiture semble le moins concerné par les questions de congestion, ce qui conforte l'idée de la rétroaction sans toutefois répondre à la question : est-ce à cause de la congestion que les agents circulent davantage à pied, en bus ou en train, ou l'inverse ?

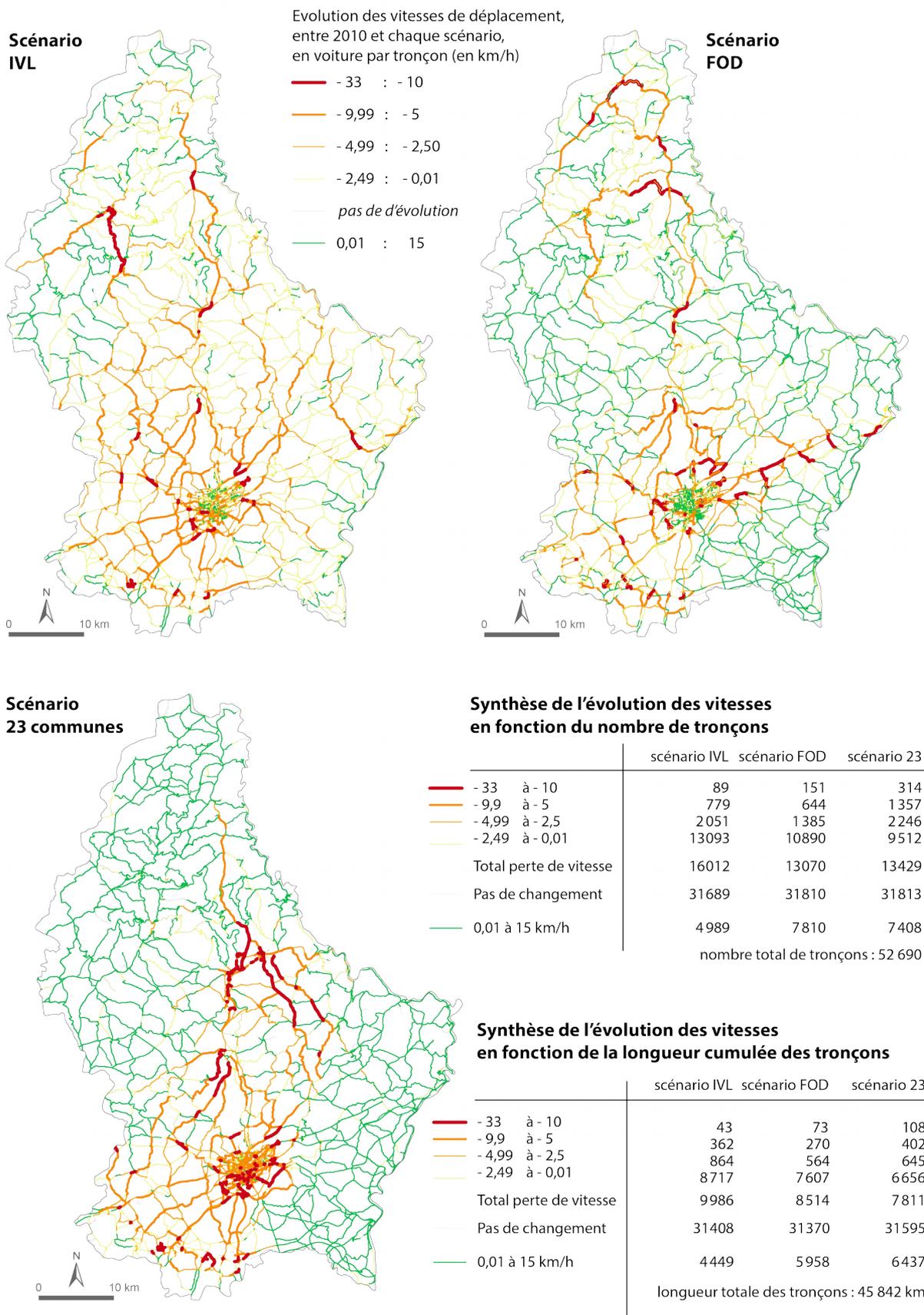


Figure 9. Comparaison des vitesses de circulation en voiture par tronçon, de 8h à 9h, entre la situation de référence en 2010 et les scénarios en 2030 (en km/h). Tiré de (Frémond, 2015).

4. L'expérimentation pour l'aire urbaine de Besançon

La zone d'étude comprend la ville de Besançon (117 000 habitants) et son aire urbaine (317 000 habitants au total). Excepté le centre de Besançon, la densité de population est peu élevée, 57 habitants/km². Les milieux naturels et agricoles sont fortement représentés avec 48 % de forêts, 25 % de prairies et 16 % de cultures. Bien que la commune de Besançon perde des habitants, le nombre d'habitants et de ménages croît dans l'aire urbaine. Les emplois sont majoritairement localisés dans la ville-centre, ce qui entraîne une augmentation de l'usage de la voiture pour les déplacements domicile-travail, tant en fréquences qu'en distances parcourues. Pour tenter de contrer ce phénomène, une ligne de tramway a été construite à Besançon. Sa mise en service date de 2015.

En préalable de la simulation du développement résidentiel, les différents agrégats bâtis composant l'aire urbaine ont été identifiés au moyen de l'application MorphoLim, intégrée à cet effet dans MobiSim. MorphoLim permet la délimitation morphologique d'agrégats bâtis selon une approche fractale (Tannier et al., 2011). Trois types d'agrégats bâtis ont été identifiés en fonction de leur taille (Figure 10) : l'agrégat bâti principal (d'une surface supérieure à 10 km²) comprenant la ville centre et quelques communes périphériques, les agrégats bâtis de taille moyenne (de 1 à 10 km²) correspondant aux villes secondaires et enfin, les petits agrégats bâtis (de 0,2 km² à 1 km²) correspondant aux villages. Pour éviter un éparpillement trop important des nouveaux développements résidentiels, les scénarios simulés ne prévoient aucune urbanisation dans les agrégats bâtis de taille inférieure à 0.2 km² (hameaux et maisons isolées).

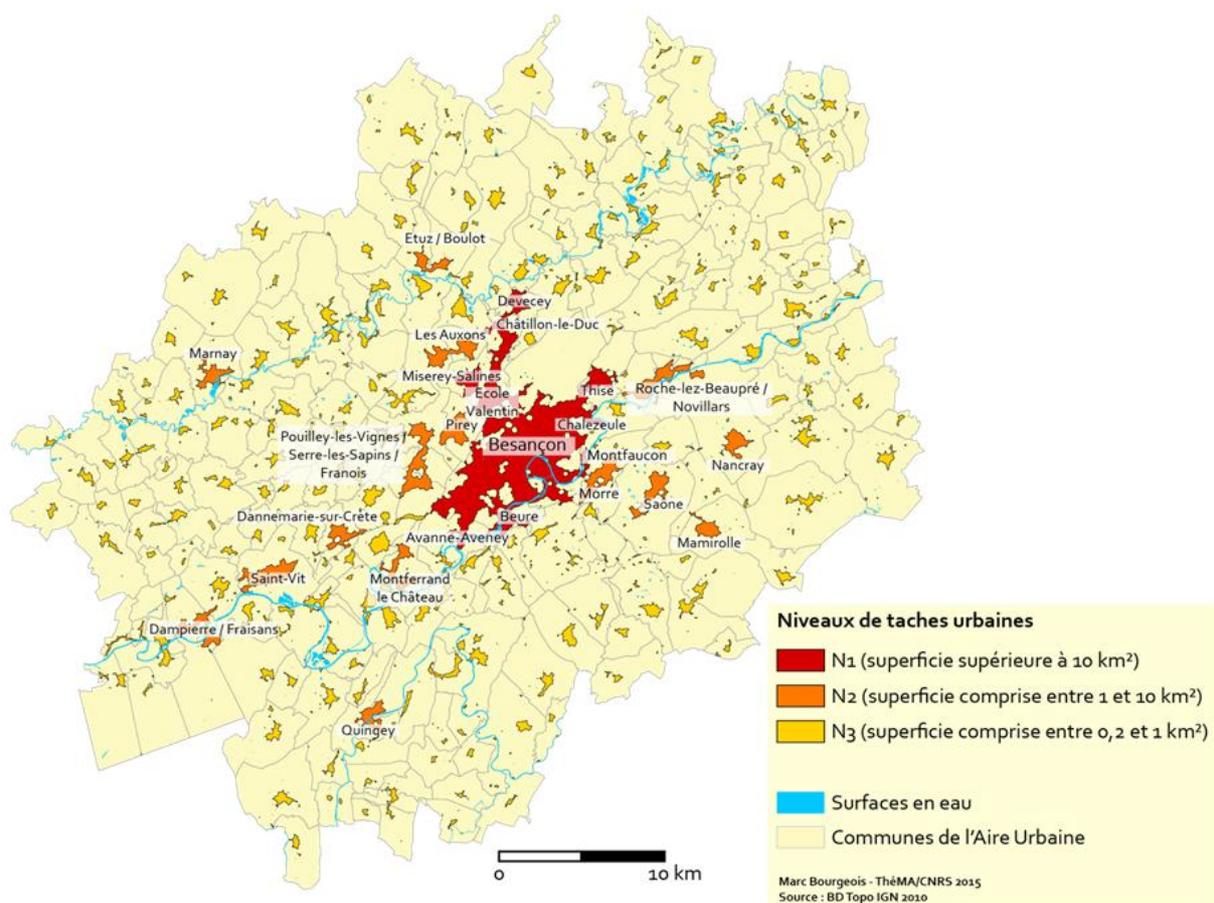


Figure 10. Aire urbaine de Besançon – Agrégats bâtis identifiés avec MorphoLim, par classe de taille. Tiré de (Bourgeois, 2015).

4.1 Cinq scénarios de développement résidentiel pour 2030

Cinq scénarios théoriques 2010-2030 ont été simulés (Tableau 5) : urbanisation compacte (S1), urbanisation modérément compacte (S2), périurbanisation contrôlée (S3), étalement urbain (S4), et urbanisation à proximité des haltes ferroviaires et des stations de tramway (développement résidentiel *Transit-Oriented*) (S5) (Cervero et al. 2002).

- Le scénario « *développement résidentiel compact* » (S1) prévoit un développement résidentiel compact à un niveau global et dense à un niveau local. La majeure partie du développement résidentiel de la zone d'étude se produit dans l'agrégat bâti principal suivant une logique monocentrique.
- Le scénario « *développement résidentiel modérément compact* » (S2) prévoit un développement compact de l'urbanisation à un niveau global et modérément dense à un niveau local, suivant l'idée que l'acceptation sociale d'un développement résidentiel modérément dense sera meilleure que celle d'un développement très dense (Camagni et al. 2002). Comme dans le scénario S1, la majeure partie du développement résidentiel se produit dans l'agrégat bâti principal.
- Le scénario « *développement contrôlé des zones périurbaines* » (S3) prévoit un développement diffus de l'urbanisation à un niveau global et dense à un niveau local. La majeure partie du développement résidentiel de la zone d'étude se produit dans les agrégats bâtis de petite ou moyenne taille. Le principe de ce scénario est de répondre à la demande des ménages pour une maison individuelle à la campagne tout en limitant la consommation d'espace dans les communes périurbaines.
- Le scénario « *étalement urbain* » (S4) prévoit un développement résidentiel diffus à un niveau global, dense dans l'agrégat bâti principal et modérément dense dans les autres agrégats bâtis. La majeure partie du développement résidentiel de la zone d'étude se produit dans les agrégats bâtis de petite ou moyenne taille. Ce scénario représente les tendances actuelles du développement résidentiel dans la zone d'étude.
- Pour le scénario « *développement résidentiel Transit-Oriented* » (S5), douze nouvelles haltes ferroviaires sont ajoutées et la fréquence de passage des trains est augmentée de manière à améliorer la desserte ferroviaire de la zone d'étude. Le développement résidentiel se produit à proximité des stations de transports publics, dans un périmètre variant selon le type de transport en commun considéré : 500 mètres autour des stations de tramway (toutes localisées dans l'agrégat bâti principal), 1 000 mètres autour des stations de train principales (toutes situées dans les agrégats bâtis de taille moyenne) et 500 mètres autour des stations de train secondaires (toutes situées dans les petits agrégats bâtis) (El-Geneidy et al. 2014). Aucun développement résidentiel ne se produit dans les agrégats bâtis ne possédant pas de stations de tramway ou de train. Les arrêts de bus, aisément déplaçables, ne sont pas considérés.

Dans tous les scénarios, le nombre de logements dans chaque bâtiment nouvellement construit, et donc potentiellement la densité de population, est plus élevé dans l'agrégat bâti principal (70 % de logements en immeuble collectif) que dans les agrégats bâtis de taille moyenne (30 % à 50% de logements en immeuble collectif), et plus faible encore dans les petits agrégats bâtis (absence d'immeubles collectifs). L'importance respective accordée aux différentes règles d'aménagement

dans MUP-City varie selon les scénarios. Dans le cas des scénarios S1 à S4, davantage d'importance est accordée à la proximité aux commerces et services de fréquentation quotidienne (boulangeries, épiceries, écoles...) et aux stations de transport public (tram, train). Une importance moindre est accordée à la proximité au réseau routier existant et aux commerces et services de fréquentation hebdomadaire (supermarchés, médecins...). La proximité aux espaces ouverts revêt une importance intermédiaire. Dans le scénario S5, la proximité aux stations de transport public est prépondérante par rapport aux autres critères. La proximité aux commerces de 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.

	Distribution de la croissance résidentielle (% du nombre total de logements construits chaque année)			Dimension fractale du développement résidentiel	Proportion de logements en maisons individuelles et en appartement (%)						
	Besançon	Communes périurbaines moyennes	Petits villages périurbains			Appart.	Maison individuelle	Appart.	Maison individuelle	Appart.	Maison individuelle
						Besançon		Communes périurbaines moyennes		Petits villages périurbains	
Compact	80	15	5	1.8	70	30	30	70	0	100	
Modérément compact	80	15	5	1.5	70	30	30	70	0	100	
Périurbain régulé	40	30	30	1.8	70	30	50	50	0	100	
Étalement urbain	40	30	30	1.8 Besançon 1.5 communes périurbaines	70	30	30	70	0	100	
Transit-Oriented Development	Stations de tram (buffer 500m)	Stations de TER principales (buffer 1000m)	Stations de TER secondaires (buffer 500m)		Stations de tram (buffer 500m)		Stations de TER principales (buffer 1000m)		Stations de TER secondaires (buffer 500m)		
					Appart.	Maison individuelle	Appart.	Maison individuelle	Appart.	Maison individuelle	
	40	30	30	1.8 Besançon 1.5 communes périurbaines	70	30	50	50	0	100	

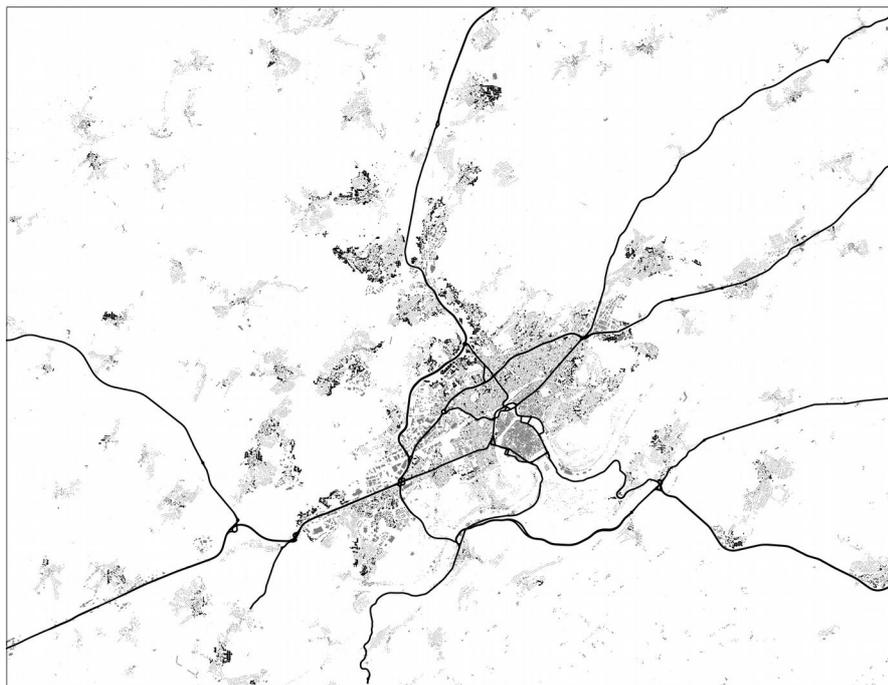
Tableau 5. Paramètres du développement résidentiel des cinq scénarios simulés.

Les déplacements inter-urbains ne sont pas simulés par MobiSim mais le trafic correspondant, estimé à partir des données de comptage routier, est ajouté au trafic intra-urbain pour chaque tronçon comptabilisant plus de 1 000 véhicules par jour. Ce trafic de transit est augmenté de 0.2% sur chaque tronçon à chaque année de simulation suivant un prolongement des tendances actuelles (Commissariat Général au Développement Durable, 2012). Dans la présente étude, nous n'avons pas tenu compte de l'augmentation possible du trafic ferroviaire.

4.2 Résultats obtenus

Les configurations spatiales du développement résidentiel simulé sont réalistes et nettement contrastées d'un scénario à un autre tant à un niveau local (Figure 11) que global (Figure 12).

Développement résidentiel compact

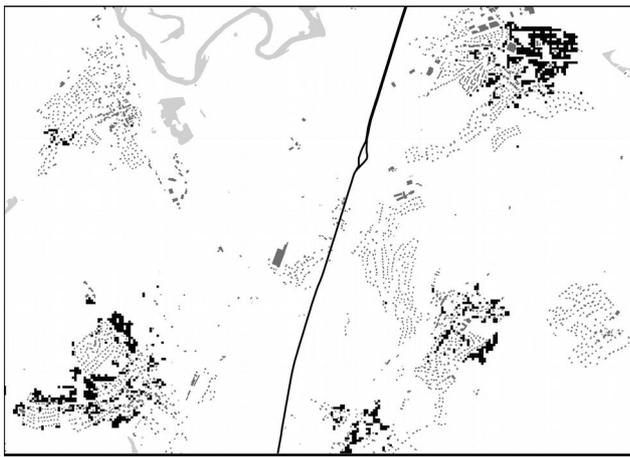


Développement résidentiel « Transit-Oriented »

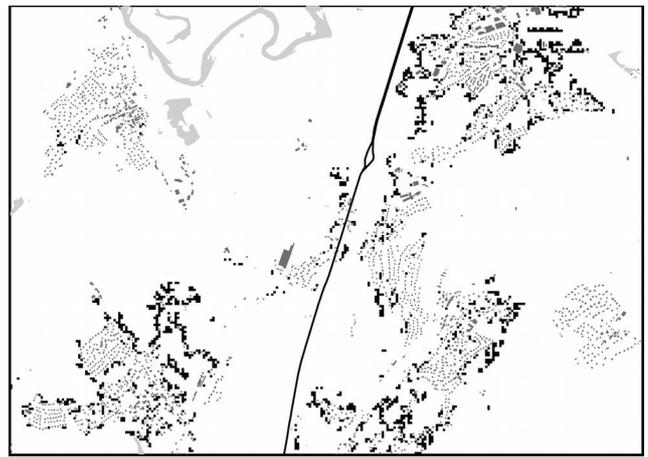


◆ bâti simulé ◆ bâti existant — route principale

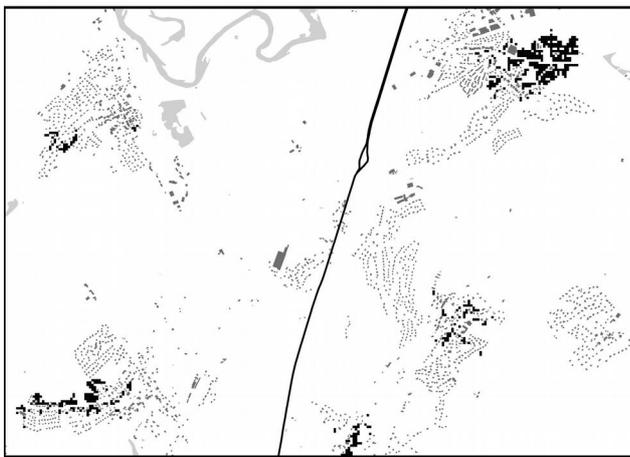
Figure 11. Deux exemples de développements résidentiels simulés pour l'aire urbaine de Besançon.



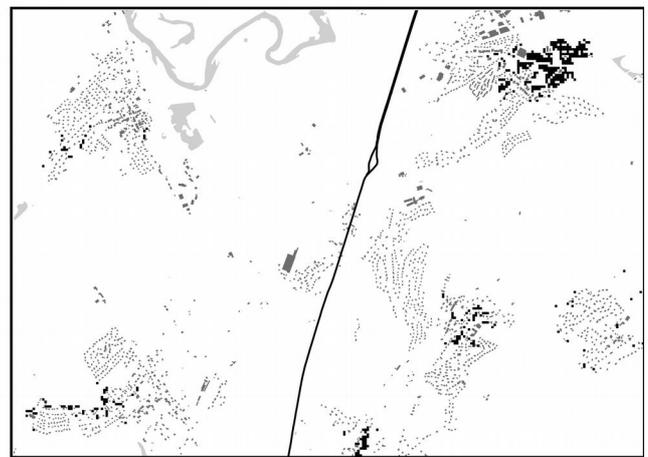
S1 - Développement résidentiel compact



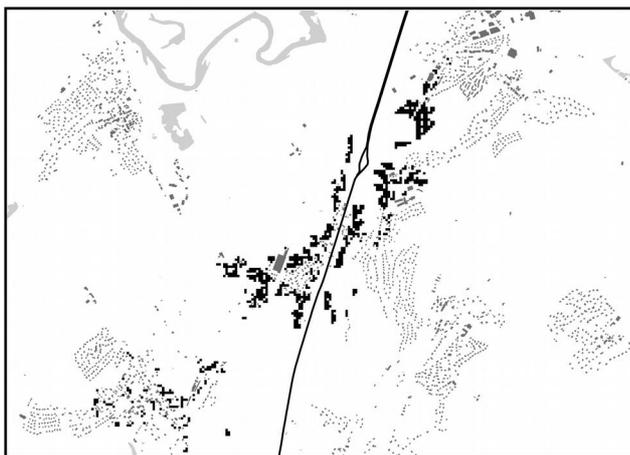
S2 - Développement résidentiel modérément compact



S3 - Développement contrôlé des zones périurbaines



S4 - Etalement urbain



S5 - Développement résidentiel « Transit Oriented »

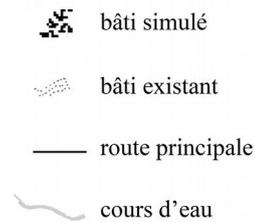


Figure 12. Formes locales des développements résidentiels simulés pour l'aire urbaine de Besançon (secteur nord de l'agglomération)

Le tableau 6 présente les évolutions de trafic routier simulées pour chaque scénario. D'un point de vue global, le scénario S3 engendre la plus faible augmentation de trafic tandis que le scénario S2 engendre la plus forte augmentation. Pour tous les scénarios, le cumul du nombre de véhicules/jour

sur l'ensemble des tronçons routiers est plus élevé sur les tronçons périurbains (56% du trafic en 2010 et 55 % en 2030) que les tronçons intra-urbains (44% du trafic en 2010 et 45% en 2030). Le scénario S5 (TOD) enregistre une augmentation assez importante du trafic sur les axes périurbains, qui contredit l'hypothèse de report modal vers les transports en commun à la base de ce scénario. Ce résultat s'explique par la localisation des emplois, à la fois concentrée dans la commune de Besançon et dispersée au sein de la commune. Ce faisant, avec le scénario TOD, les transports en commun desservent bien les zones résidentielles périurbaines mais non de nombreux lieux d'emplois au sein de Besançon. Dès lors, la voiture demeure le mode de transport préféré des résidents périurbains.

Tableau 6. Taux d'évolution 2010-2030 du cumul du trafic (nombre de véhicules/jour) sur les tronçons routiers en fonction des scénarios de développement urbain.

	S1	S2	S3	S4	S5
Total des tronçons routiers	8,4	9,8	7,6	8,4	7,8
Tronçons routiers intra-urbains	11,1	12,5	9,7	10,2	10,7
Tronçons routiers périurbains	6,3	7,8	5,9	6,9	7

Localement, les évolutions de trafic diffèrent selon les axes routiers (Figure 13 et Tableau 7). Pour un scénario donné, certains axes enregistrent une hausse importante de trafic et d'autres pas. Le trafic simulé sur certains axes est même parfois en baisse en raison d'un report modal de la voiture vers les transports en commun (exemple : axe périurbain n°8 dans le cas du scénario S5). Les axes enregistrant les plus fortes hausses de trafic varient selon les scénarios (exemple : axe J pour le scénario S5 et axe 2 pour le scénario S2).



Figure 13. Principales routes dans l'aire urbaine de Besançon

Tableau 7. Nombre de véhicules/jour sur les principaux axes routiers - Moyenne du nombre de véhicules/jour pour l'ensemble des tronçons composant chaque axe

	Code de l'axe	Situation initiale	S1	S2	S3	S4	S5
Axes intra-urbains	A	15467	16878	17004	17018	16978	16480
	B	35074	38839	39216	37119	37126	37266
	C	22075	25210	25184	23755	23677	23603
	D	19874	21699	22002	21685	21607	22070
	E	29978	32279	32591	31939	32214	32229
	F	17019	18333	18426	18284	18270	18311
	G	14524	15851	15762	15514	15992	15929
	H	15946	16541	16896	16666	16757	16998
	I	14318	15171	15529	15352	15412	15537
	J	19799	21789	21954	22069	22536	22816
Axes périurbains	1	8810	8969	8955	9377	9271	9176
	2	18192	20608	21844	19266	19189	19528
	3	12363	12899	13034	12956	13066	13331
	4	22473	23568	23578	23695	23933	23916
	5	9728	9772	9691	9601	9834	9969
	6	20202	21395	21496	21501	22028	22174
	7	6077	6389	6287	6867	6930	7716
	8	4062	4026	4118	4244	4086	3948
	9	3926	4114	4195	4175	4331	4155

L'objectif de la simulation des mobilités quotidiennes sur l'aire urbaine de Besançon était l'étude des effets de barrière du trafic routier sur la connectivité des habitats de différents mammifères forestiers. Les résultats de cette étude montrent que la diminution de la connectivité des habitats est davantage due à l'augmentation du trafic sur les routes qu'à la construction proprement dite de nouveaux bâtiments résidentiels.

Conclusion

Dans ce chapitre, les relations entre les formes du développement résidentiel et les mobilités quotidiennes des individus ont été étudiées à travers deux expériences de simulation menées l'une à Besançon (France) et l'autre au Luxembourg. Les différents scénarios simulés ont consisté à faire varier, à un niveau local, la dimension fractale du tissu bâti, l'accessibilité aux aménités de fréquentation quotidienne et hebdomadaire (commerces et services, espaces de récréation et de loisir), et la densité de logements. A un niveau d'analyse global, les variables choisies pour la scénarisation ont été la répartition de la croissance urbaine dans différentes zones (agrégats bâtis classés par taille ou typologies de communes) et l'accessibilité aux aménités de fréquentation mensuelle ou plus rare (commerces et services, espaces de récréation et de loisir).

Les résultats obtenus montrent l'intérêt d'une planification du développement résidentiel dans l'objectif de réduire l'usage de la voiture individuelle au profit des transports en commun et de la

marche à pied. Cependant, les règles appliquées pour contraindre la forme du développement résidentiel doivent être adaptées aux spécificités de chaque zone d'étude afin d'éviter certains échecs de schémas d'aménagement, à l'exemple du scénario TOD dans l'expérimentation concernant l'aire urbaine de Besançon. Dans le cas du Luxembourg, la forte dynamique démographique, de laquelle résulte le grand nombre de logements construits par simulation, fait que la dépendance aux conditions initiales est bien moindre que dans le cas de Besançon. Ceci explique en partie les résultats très positifs obtenus en termes de diminution de l'usage de la voiture au profit des transports en commun et de la marche à pied. Dans les scénarios concernant Besançon, la dynamique démographique est faible et relativement peu de logements sont construits. Néanmoins, les formes des développements résidentiels simulés sont très contrastées d'un scénario à l'autre et les évolutions du trafic routier sur chaque axe sont également contrastées.

Dans les modèles spatiaux classiques de simulation de la croissance urbaine (modèles d'automates cellulaires ou modèles de potentiel), les changements d'occupation du sol, en particulier la conversion de cellules non bâties en cellules bâties, sont représentés comme des processus de diffusion aux alentours des agrégats bâtis existants ou des routes. Ce faisant, la forme des extensions bâties simulées est localement peu réaliste. Au contraire, la simulation d'un développement résidentiel fractal permet d'obtenir des formes de développement résidentiel simulés qui sont réalistes et qui se conforment aux nombreuses publications ayant montré que le processus de croissance urbaine crée des tissus urbains fractals (Benguigui et al. 2000 ; Shen 2002 ; Feng & Chen 2010 ; Thomas, Frankhauser & Badarotti, 2012). Dans les deux expérimentations, même les scénarios les plus compacts, qui imposent une forte densification locale du bâti via une augmentation de la dimension fractale, préservent des espaces non bâtis au sein des tissus bâtis. Des recherches antérieures ont montré qu'un développement résidentiel fractal répond mieux aux attentes de la population en matière d'accès aux espaces verts et naturels qu'une forme urbaine uniformément dense (Tannier et al., 2012b). Peeters et al. (2015) ont aussi montré que favoriser l'accès des ménages aux aménités vertes et naturelles à proximité de leur lieu de résidence, via la préservation d'espaces naturels et agricoles au sein du tissu bâti résidentiel et le développement d'un réseau de routes et chemins permettant l'accès à ces espaces, permet d'éviter une urbanisation discontinue (émergence de noyaux de développement résidentiel déconnectés des taches urbaines existante). L'expérimentation sur l'aire urbaine de Besançon suggère en outre que l'augmentation de la dimension fractale du développement résidentiel aide à préserver la connectivité des habitats écologiques (Bourgeois, 2015). Concernant l'impact sur les mobilités quotidiennes, l'expérimentation menée sur le Luxembourg montre qu'avec un développement résidentiel fractal, il est possible de réduire les déplacements en voiture si des contraintes supplémentaires sont ajoutées pour localiser les nouvelles extensions résidentielles à proximité de stations de transports en communs et des commerces et services (Frémond, 2015). Ceci confirme les résultats antérieurement obtenus pour un secteur périurbain de l'agglomération de Besançon, montrant que deux scénarios fractals de développement résidentiel intégrant des contraintes spatiales supplémentaires de proximité aux commerces et services permettaient une amélioration de l'accessibilité locale des résidents, tant aux espaces verts et naturels qu'aux commerces et services (Frankhauser et al., 2010).

Remerciements

Les deux expérimentations décrites dans ce chapitre ont bénéficié du soutien financier du Fond Européen de Développement Régional et du Conseil Régional de Franche-Comté (projet ODIT MSHE CN Ledoux, Besançon, France), ainsi que du Fond National de la Recherche du Luxembourg. Le développement des applications MUP-City et MobiSim a bénéficié du soutien financier du Commissariat général au développement durable (CGDD) du Ministère français de l'écologie, du développement durable et de l'énergie (MEDDE), dans le cadre du programme PREDIT.

Références bibliographiques

Andersson C., Lindgren K., Rasmussen S., White R. (2002). Urban growth simulation from “first principles”. *Physical review E*, 66. 026204, pp. 1–9.

Antoni J.-P., Lunardi N., Vuidel G. (2016). Simuler les mobilités individuelles. Les enjeux de l'information géographique. *Revue internationale de géomatique*, 26(2), pp. 237-262.

Benguigui L., Czamanski D., Marinov M., Portugali Y. (2000). When and where is a city fractal? *Environment and Planning B: Planning and Design*, 27, 507–519.

Bourgeois M. (2015). *Impacts écologiques des formes d'urbanisation. Modélisations urbaines et paysagères*. Thèse de doctorat en géographie, Université de Franche-Comté.

Camagni R., Gibelli M., Rigamonti P. (2002). Urban mobility and urban form: the social and environmental costs of different patterns of urban expansion. *Ecological Economics*, 40, pp. 199–216.

Caruso G. (2005). Un modèle cellulaire et dynamique de dispersion et ségrégation spatiale périurbaine. Chapitre 4. In : Buisson M-A., Mignot D. (eds), *Concentration économique et ségrégation spatiale*, Bruxelles, De Boeck Universités, collection Économie, Société, Région, pp. 67-85.

Caruso G., Médard de Chardon C. (2012). An iterative economic residential choice ABM of urban growth in Luxembourg. In : *Proceedings of the Symposium on Cellular Automata Models of Urban and Spatial Systems*, Porto, pp. 2-3.

Cervero R. (2002). Built environments and mode choice: toward a normative framework. *Transportation Research Part D : Transport and Environment*, 7(4), pp. 265–284.

Cervero R., Ferrell C., Murphy S. (2002). Transit-oriented development and joint development in the United States: a literature review. *TCRP Research Results Digest*, 52.

Cervero R., Murakami J. (2010). Effects of built environment on vehicle miles traveled: evidence from 370 US urbanized areas. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 42, pp. 400–418.

Conway T. (2009). Local environmental impacts of alternative forms of residential development. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 36, pp. 927–943.

Cornélis E., Barthélémy J. (2015). A synthetic population for Luxembourg and its demographic evolution. *Report naXys-09-2015 augustus 2015*, Namur Center for Complex Systems.

Couch C., Sykes O., Börstinghaus W. (2011). Thirty years of urban regeneration in Britain, Germany and France : The importance of context and path dependency. *Progress in Planning*, 75, pp. 1–52.

El-Geneidy A., Grimsrud M., Rania W., Tétreault P., Surprenant-Legault J. (2014). New evidence on walking distances to transit stops: identifying redundancies and gaps using variable service areas. *Transportation*, 4, pp. 193–210.

Frankhauser P., Tannier C., Vuidel G., Houot H. (2010), Une approche multi-échelle pour le développement résidentiel des nouveaux espaces urbains. In : J.-P. Antoni (dir.) *Modéliser la ville. Forme urbaine et politiques de transport*, Economica, Collection Méthodes et approches, pp. 306-332.

Feng, J., Chen, Y. (2010). Spatiotemporal evolution of urban form and land-use structure in Hangzhou, China: evidence from fractals. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 37 (5), 838–856.

Frémont M. (2015). *Une approche normative de l'aménagement au Luxembourg. Évaluation par la simulation*. Thèse de doctorat en géographie, Université de Franche-Comté.

Gerber P., Caruso G., Cornélis E., Enaux C., Khadraoui D. (2013). Interactions between residential and daily mobility: Luxembourg case study in the MOEBIUS project. In : Hesse M., Caruso G., Gerber P. and Viti F. (eds.) *Proceedings of the BIVÉC-GIBET Transport Research Days 2013*, Zaneta University Press, pp. 397-399.

Geurs K.T., van Wee B. (2006). Ex-post evaluation of thirty years of compact urban development in the Netherlands. *Urban Studies*, 43, pp. 139–160.

Hirtzel J. (2015). *Exploration prospective des mobilités résidentielles dans une agglomération urbaine au moyen d'un modèle de simulation multi-agents (MobiSim)*. Thèse de doctorat en géographie, Université de Franche-Comté.

Kitamura R., Mokhtarian P. L., Laidet L. (1997). A micro-analysis of land use and travel in five neighborhoods in the San Francisco Bay Area. *Transportation*, 24(2), pp. 125–158.

Mitsova D., Shuster W., Wang X. (2011). A cellular automata model of land cover change to integrate urban growth with open space conservation. *Landscape and Urban Planning*, 99, pp. 141–153.

Peeters D., Caruso G., Cavailhès J., Thomas I., Frankhauser P., Vuidel G. (2015). Emergence of leapfrogging from residential choice with endogenous green space: analytical results, *Journal of Regional Science*, 55(3), pp. 491-512.

Saaty T.L. (1977). A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of Mathematical Psychology*, 15, pp. 234–281.

Schuller G., Sinner V. (2013). Regards sur la création nette d'emploi depuis la crise. STATEC, Institut national de la statistique et des études économiques, Luxembourg.

Shen G., 2002. Fractal dimension and fractal growth of urbanized areas. *International Journal of Geographical Information Science*, 16(5), pp. 437–519.

- Schwanen T., Dieleman F. M., Dijst M. (2001). Travel behaviour in Dutch monocentric and polycentric urban systems. *Journal of transport geography*, 9, pp. 173-186.
- Tannier C., Vuidel G., Frankhauser P., Houot H. (2010). Simulation fractale d'urbanisation. *Revue Internationale de Géomatique*, 20(3), pp. 303–329.
- Tannier C., Thomas I., Vuidel G., Frankhauser P. (2011). A fractal approach to identifying urban boundaries. *Geographical Analysis*, 43, pp. 211–227.
- Tannier C., Foltête J.-C., Girardet X. (2012a). Assessing the capacity of different urban forms to preserve the connectivity of ecological habitats. *Landscape and Urban Planning*, 105, pp. 128–139.
- Tannier C., Vuidel G., Houot H., Frankhauser P. (2012b). Spatial accessibility to amenities in fractal and nonfractal urban patterns. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 39, pp. 801–819.
- Tannier C., Hirtzel J., Stephenson R., Couillet A., Vuidel G., Youssoufi S. (2016a), Conception and use of an individual-based model of residential choice in a planning decision process. Feedback from an experimental trial in the city of Besançon, France, *Progress in Planning*, vol. 108, pp. 1-38.
- Tannier C., Bourgeois M., Houot H., Foltête J.-C. (2016b). Impact of urban developments on the functional connectivity of forested habitats: a joint contribution of advanced urban models and landscape graphs, *Land Use Policy*, 52, pp. 76-91.
- Thomas I., Frankhauser P., De Keersmaecker M.-L. (2007). Fractal dimension versus density of the built-upsurfaces in the periphery of Brussels. *Papers in Regional Science*, 86, pp. 287–307.
- Thomas I., Frankhauser P., Biernacki C. (2008). The fractal morphology of the built-up landscape. *Landscape and Urban Planning*, 84, 99–115.
- Thomas I., Frankhauser P., Badariotti D. (2012). Comparing the fractality of European urban neighbourhoods: do national contexts matter? *Journal of Geographical Systems*, 14, pp. 189–208
- Wegener M. (2004). Overview of land-use transport models. In : Hensher D.A., Button K. (Eds.), *Handbook in Transport. Transport Geography and Spatial Systems*, vol. 9. Pergamon-Elsevier, pp. 127–146.
- Wegener M. (2014). Land-use transport interaction models. In : Fischer M.M., Nijkamp P. (Eds.), *Handbook of Regional Science*, Springer, pp. 742–758.
- Wilson A. (2010). The general urban model: Retrospect and prospect. *Papers in Regional Science*, 89(1), pp. 27–42.
- Yager R. (1977). Multiple objective decision-making using fuzzy sets. *International Journal of Man-Machine Studies*, 9, pp. 375–382.