

FIGURE 4.18 – Superposition de trois résolutions différentes (20, 50 et 100 mètres), sur la localité de Frisange

6. La simulation de formes urbaines réalistes

Ce n'est pas tant l'aspect multi-échelles des fractales qui nous intéresse ici qu'une autre propriété de ces formes, à savoir les ressemblances géométriques avec des structures urbaines existantes (Frankhauser, 2000 ; Badariotti, 2005a ; Batty, 1994). Pour M.-P. Corcuff, la géométrie fractale permet d'approfondir la notion de « processus de formes ». En effet, il faut voir l'utilisation des fractales comme possibilité de « construire des modèles explicatifs de la morphogenèse des tissus urbains » (Salat, 2011). En 1994 déjà, Frankhauser écrit que « tous les modèles réalistes servant à expliquer ou simuler l'évolution spatiale des villes, doivent décrire la croissance urbaine comme une croissance fractale ».

Le réalisme des formes simulées est au cœur des interrogations du projet GeOpenSim (Curie et al, 2011). Toutefois, il s'agit au sein de ce travail d'établir un modèle de densification, où l'approche multi-agents permet de tenir compte du voisinage des bâtiments. Les méthodes employées dans ce projet permettent de générer de la ville sur ou dans la ville, mais ne propose pas (encore) une méthode d'extension du tissu résidentiel. À l'inverse, les travaux menés dans le cadre du projet MUSCADE²⁰ (Masson et al, 2009) mettent en exergue une volonté de réalisme dans « les extensions

20. Modélisation Urbaine et Stratégies d'adaptation au Changement climatique pour Anticiper la Demande et la production Énergétique.

du tissu résidentiel ». Pour ce faire, le projet décrit le couplage entre un modèle macro-économique (NEDUM), et la simulation de formes urbaines dans des îlots à l'aide du modèle MUSE²¹. Toutefois, l'assemblage des deux modèles NEDUM et MUSE n'est pas encore effectif.

7. Mise en œuvre informatique

Le logiciel MUP-City, utilisé ici dans sa version 1.0 beta, est une plateforme développée en Java, elle s'appuie notamment sur les bibliothèques Geotools et Java Topology Suite. La plateforme comprend une interface graphique composée d'une fenêtre et de plusieurs menus contextuels, sans recours nécessaire à la programmation ou à une interface en lignes de commandes.

Les données en entrée, qui seront détaillées dans la section suivante, sont formées de *shapefiles* (.shp). En sortie, il est possible d'obtenir des graphiques (au format .svg), des informations géographiques (au format TIFF, géoréférencées), et des valeurs d'évaluations (au format .txt).

21. Modelisation of Urban Shape and Energy.

En sortie de MUP-City, on obtient deux types de données : les formes générées issues du modèle fractal et les valeurs pour chacune des cellules de la grille.

Afin de sélectionner les cellules potentiellement urbanisables en fonction des différents scénarios, il est nécessaire de réaliser plusieurs manipulations. D'abord, pour permettre le traitement des données fournies en *raster*, il convient de transformer chacun des types de couche en *vecteur*. Ensuite, pour faciliter les manipulations dues au grand volume de données, il est important de sélectionner les entités dont la valeur d'évaluation est supérieure à 0. Enfin, un croisement des deux couches d'information est indispensable afin que les formes issues du modèle fractal aient une valeur d'évaluation et d'écarter de l'analyse les formes fractales seulement issues du modèle de génération de formes qui respecte scrupuleusement la dimension fractale indiquée en entrée sans tenir compte du potentiel d'urbanisation à simuler. Les valeurs d'évaluations forment le critère de sélection des cellules potentiellement urbanisables. Si le nombre de cellules générées est supérieur au nombre de cellules nécessaire dans le scénario, les cellules les mieux évaluées sont sélectionnées en premier.

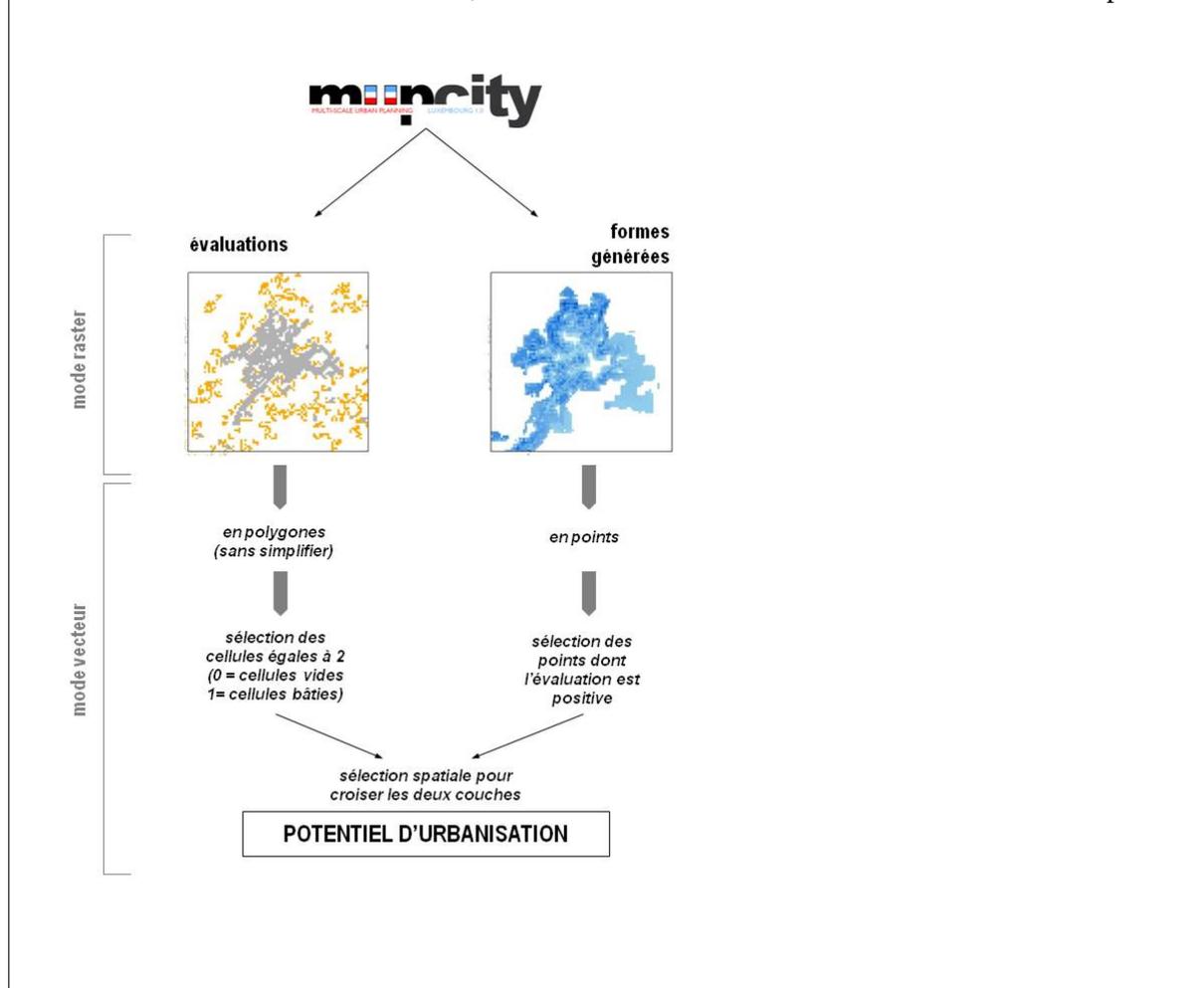


FIGURE 4.19 – Encart technique : Méthodologie de sélection du potentiel d'urbanisation en sortie de MUP-City

8. Conclusion du chapitre 4

Dans ce chapitre, nous venons de décrire le principe de fonctionnement du modèle de croissance résidentielle MUP-City, ainsi que les données d'entrées nécessaires à la simulation prospective. Les derniers points de ce quatrième chapitre ont été consacrés à la transcription des normes d'aménagement (qui sont à la base de nos scénarios pour 2030, voir le chapitre 3) en règles dans le modèle. La conception des règles permettent de traduire, du point de vue de l'utilisateur, la volonté de mettre en place des normes d'aménagement afin de satisfaire des objectifs précis de croissance résidentielle.

Lors de la revue de littérature, nous avons vu qu'il existait un nombre conséquent de modèles à même de simuler des changements d'occupation du sol. Le choix s'est porté sur MUP-City pour diverses raisons. Tout d'abord, c'est un modèle qui est à même de travailler à plusieurs échelles et jusqu'à une résolution très fine, ce qui montre une certaine cohérence avec notre question de recherche sur la génération de formes résidentielles. MUP-City est également l'un des seuls à pouvoir générer des tissus urbains fractals, tant du point de vue global que local et donc de traduire à la fois une volonté de renforcer les centralités existantes (global) tout en proposant des formes urbaines similaires aux tissus existants (local). D'un point de vue technique, son interface rend son utilisation aisée et la gestion des entrées et des sorties du modèle facilement compatibles avec l'utilisation d'un SIG classique, puisque conçu comme tel. Enfin, sur le plan pratique, il importe de souligner que c'est un logiciel libre et gratuit, ce qui forme un bon moyen de se procurer l'application. Il a été et continue d'être développé au laboratoire ThéMA de Besançon ce qui, du point de vue des mises à jour de développement, a simplifié considérablement les échanges avec ses concepteurs.

La définition des aménités données en entrée, leur collecte et leur catégorisation dans une typologie peuvent faire l'objet de discussions. Avant toute chose, jamais une telle base de données concernant les commerces, services, espaces verts et de loisirs n'avait été mise en place au Luxembourg. Ce n'est pas le cas en France, où la base de données SIRENE²², autant que la base de données des équipements de l'INSEE aurait servi à construire l'entrée nécessaire. L'utilisation des données d'annuaire peut poser quelques problèmes, dus à la forte volatilité de certains établissements dans le temps et qui, malgré une base numérique de données, peut se révéler difficile à mettre à jour. Le processus de géocodage des données à partir des adresses postales a pu, de façon sporadique, générer quelques approximations. Le bilinguisme des adresses dans le fichier source (luxembour-

22. La base de données SIRENE est un fichier qui rassemble toutes les activités économiques d'une même zone, avec leurs adresses

geois et français) n'a pas toujours été résolu avant la précision souhaitée. Quelques adresses ont été approximatives (au niveau communal pour moins de 5% des aménités), malgré des corrections manuelles. Toutefois, la plupart des données manquantes ou localisées approximativement appartiennent le plus souvent aux espaces les plus ruraux, où les enjeux liés à la croissance résidentielle sont limités. Nous le verrons dans les scénarios en fin de deuxième partie. La typologie retenue, en trois niveaux de recours potentiel et un certain nombre de catégories d'aménités peut également faire l'objet de remarques. Certains types d'établissements n'ont peut-être (à tort) pas été retenus, d'autres pourraient appartenir à un niveau de recours différent. En l'absence de données de validation exhaustives, des choix de modélisation ont dû être effectués, alors qu'il est très difficile de pouvoir mesurer les conséquences de ces choix sur les résultats obtenus.

La traduction des normes d'aménagement en règles compréhensibles par le modèle a été également source de choix. L'utilisation de tel opérateur mathématique a pu avoir une certaine influence, tandis qu'un autre aurait produit des résultats légèrement différents. Les paramètres ou les seuils de ces règles ont fait l'objet de tests, nous le verrons dans les premières applications de MUP-City au chapitre suivant, et les réactions du modèle semblent tout à fait appropriées et conformes à nos attentes. De même, la comparaison par paires peut sembler discutable. C'est bien l'objectif de cette méthode, qui contrairement à celle précédemment utilisée (une moyenne arithmétique), permet justement plus de flexibilité dans la démarche de scénarisation. Une fois encore, des tests permettront de saisir l'influence de cette partie de la simulation sur les résultats intermédiaires. Nous sommes dans le cas d'une transposition d'une démarche de modélisation, avec un changement d'échelle, depuis les applications dans le périurbain bisontin vers un pays dans son ensemble (première application du modèle hors de France). C'est la première application de ce genre avec une agglomération de cette taille et la superficie de traitement n'a jamais été aussi grande, avec les 2 500km² de la superficie luxembourgeoise. Comme nous l'avons vu en introduction de ce chapitre, le passage de la version 0.8 à 1.0 beta de MUP-City a induit quelques changements : i) création de la règle d'accessibilité aux commerces et services de fréquentation mensuelle ou plus rare ; ii) création de la règle d'accessibilité aux transports en commun ; iii) création des règles d'accessibilité aux aménités vertes et de loisirs de fréquentation quotidienne, hebdomadaire, mensuelle ou plus rare et iv) modification des règles d'accessibilité aux commerces et services de fréquentation quotidienne ou hebdomadaire.

Chapitre 5

Évaluation de la pertinence des règles d'aménagement au regard des objectifs visés

« Planners should attempt to collect all available data, generalize from particular observations to general theories, laws, and models, and test these by comparing them to reality. »

Klosterman, 1978

CE CINQUIÈME chapitre est une étape indispensable avant la simulation de scénarios de croissance résidentielle. Il s'agit d'abord d'évaluer la situation initiale, du Luxembourg en 2010 en matière d'accessibilité aux différentes aménités qui ont été retenues. Dans un deuxième temps, chacune des règles de MUP-City fera l'objet de tests, d'activations, de désactivations, ou de changements de seuils dans l'optique de saisir l'influence de chaque règle, et donc de chaque norme, sur les différents scénarios de développement résidentiel qui seront simulés ultérieurement.

1. Évaluation de la situation initiale (2010) : accessibilité des bâtiments résidentiels aux aménités urbaines et rurales

L'évaluation de la situation du Luxembourg en 2010 en matière d'accessibilité des bâtiments résidentiels aux aménités urbaines et rurales permet de déterminer les potentiels d'urbanisation futurs et d'établir un référentiel de comparaison pour les différents scénarios prospectifs qui seront ensuite simulés. Il convient d'analyser le résultat de ces évaluations appliquées à l'ensemble des cellules déjà urbanisées au Grand-Duché. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 5.1.

La règle de proximité à la route est l'une des moins discriminantes par rapport à toutes les autres règles. De fait, la densité de réseau routier au Luxembourg permet au bâti existant d'être très bien évalué (97% d'évaluations positives). Ce résultat permet de confirmer le souhait de limiter les constructions d'infrastructures. La proximité aux stations de transports en commun est également bien évaluée, du moins en ce qui concerne les actuelles constructions. Avec 80% des cellules bâties positivement évaluées, le Luxembourg semble bien desservi en raison du nombre élevé d'arrêts de bus que compte le pays (plus de 2000) et donc de leur forte dispersion spatiale. Cependant, ce résultat est à nuancer au regard des fréquences de passage. En effet, il y a de nombreux arrêts où peu de lignes et peu de bus passent et rendent les transports publics finalement peu concurrentiels, en matière de temps de déplacement, face aux moyens de transports individuels (Klein et Schmitz, 2011).

L'accessibilité aux commerces et services de fréquentation quotidienne n'est pas très bonne comparativement aux autres règles. Moins de 45% des bâtiments existants se situent à une distance inférieure à 600 mètres d'une boulangerie ou d'une épicerie par exemple. En effet, l'implantation des surfaces commerciales luxembourgeoises n'a pas toujours bénéficié d'une logique de proximité. En revanche, l'évaluation de l'accessibilité aux commerces et services de fréquentation hebdomadaire n'est pas vraiment discriminante d'un point de vue quantitatif : la majeure partie du tissu résidentiel grand-ducal est bien évaluée (89% de façon positive, et une moyenne approchant les 0,80).

La règle d'accessibilité aux commerces et services de fréquentation mensuelle ou plus rare est numériquement la moins contraignante du modèle. L'ensemble de la population luxembourgeoise peut atteindre en près de 15 minutes en voiture l'aménité centrale la plus proche. Les dimensions géographiques du Luxembourg (2500km²) expliquent en grande partie cette bonne accessibilité théorique en voiture. Le réseau routier luxembourgeois, du fait de sa densité, offre également une

	Nombre de cellules évaluées positivement	Evaluation moyenne pour l'ensemble des cellules bâties	Part des cellules bâties en 2010 ayant une évaluation supérieure à 0 (en %)
Proximité à la route	294 339	0.82	97
Commerces et services (quotidiens)	134 239	0.47	44
Commerces et services (hebdomadaires)	267 895	0.78	89
Commerces et services (mensuels ou plus rare)	294 789	0.93	98
Proximité aux transports en commun	250 494	0.54	83
Aménités vertes ou de loisirs (quotidiens)	24 213	0.40	8
Aménités vertes ou de loisirs (hebdomadaires)	265 583	0.59	88
Aménités vertes ou de loisirs (mensuels ou plus rare)	294 257	1.00	97
Evaluation synthétique	14 860	0.60	5
Nombre total de cellules bâties	301 941		100

Tableau 5.1 – Evaluation de l'accessibilité à chaque aménité pour les cellules bâties à l'état initial de 2010

bonne desserte en tous points du territoire.

L'évaluation de l'accessibilité aux parcs et jardins, qui constituent les aménités vertes et de loisirs de fréquentation quotidienne, est la plus contraignante. Seulement 8% des constructions actuelles ont accès à un espace vert de petite taille en moins de 300 mètres (5-10 minutes de marche à pied). Ce résultat s'explique par le faible nombre de parcs au Luxembourg et leur relative concentration dans les centres urbains principaux.

Néanmoins, les deux niveaux supérieurs d'aménités vertes sont très bien évalués. Près de 90% du bâti existant bénéficie d'un bon accès aux espaces boisés de taille moyenne et aux infrastructures sportives (terrains, gymnases, piscines). Le seuil de distance est moins contraignant puisque la règle impose une distance de deux kilomètres au maximum. Enfin, la quasi-totalité des bâtiments ont un très bon accès aux espaces boisés de surface plus importante, se situant presque toutes à moins de 5km d'un point d'accès forestier. Ces deux derniers résultats s'expliquent assez bien par le fort taux de boisement du pays, qui est de 35% de la superficie totale.

2. Les tests des règles de MUP-City

Cette deuxième partie de chapitre est dédiée aux tests qui ont été effectués à partir de l'évaluation de la situation initiale au Luxembourg, préalablement à la simulation de scénarios réalistes de croissance résidentielle. L'objectif de ces tests est double. D'abord, il s'agit de comprendre les réactions de MUP-City aux paramètres qui sont à disposition de l'utilisateur. Il s'agit également de déterminer si les normes d'aménagement et leur transcription/formalisation sous la forme de règles dans MUP-City permettent d'atteindre les objectifs fixés en matière de croissance urbaine.

2.1. Influence de la dimension fractale sur les cellules potentiellement urbanisables

Sur le plan technique, la dimension fractale est la première variable dont MUP-City a besoin pour identifier les cellules potentiellement urbanisables. En effet, l'application de la règle fractale d'urbanisation conditionne la géométrie globale et locale des formes simulées et donc constitue le point de départ de la simulation. Quatre valeurs de dimension fractale ont été testées :

- test 1.1 : dimension fractale 1,46 ($N_{max} = 5$)
- test 1.2 : dimension fractale 1,63 ($N_{max} = 6$)
- test 1.3 : dimension fractale 1.77 ($N_{max} = 7$)

— test 1.4 : développement résidentiel non fractal

Les résultats obtenus sont cohérents avec l’observation de la situation initiale : un nombre très réduit de cellules sont identifiées comme potentiellement urbanisables en sortie du modèle. Les résultats sont présentés dans le tableau 5.2. Avec le test 1.1, seules 2 976 cellules ont une évaluation supérieure à 0. Converties en potentiel d’urbanisation, ces cellules représentent à peine plus d’une centaine d’hectares, soit moins de 2 000 logements en considérant une densité de 18 logements par hectare. Au rythme actuel de construction que connaît le Luxembourg, ces logements potentiels ne comblent même pas les besoins d’une année, puisque d’après les statistiques, 3 500 logements sont construits chaque année au Grand-Duché (voir chapitre 2).

L’augmentation de la dimension fractale du tissu résidentiel simulé permet de doubler le nombre de cellules potentiellement urbanisables comme le montre le test 1.2. Ce résultat confirme ceux déjà obtenus par Tannier et al entre 2007 et 2012, qui indiquent le rôle majeur d’une dimension fractale locale élevée dans la création de scénarios résidentiels cohérents avec des objectifs d’aménagements.

Enfin, l’application de formes locales non fractales est remise en question, comme le suggère le test 1.4 et la figure 5.1. Les formes ainsi générés, localement compactes voir très compactes, ne semblent pas compatibles avec les objectifs fixés par l’hypothèse du modèle de ville fractale. Elles ne permettent pas d’augmenter la longueur de la bordure urbanisée pour accéder aux espaces ouverts périphériques tout en maintenant une certaine densité bâtie au sein du tissu urbanisé. Cette variante est donc exclue pour la suite des simulations.

	Nombre de cellules évaluées positivement	Evaluation moyenne	Evaluation médiane	Evaluation maximale
test 1.1 - $N_{max} = 5$	2 976	0,189	0,183	0,600
test 1.2 - $N_{max} = 6$	4 495	0,187	0,178	0,559
test 1.3 - $N_{max} = 7$	6 276	0,183	0,176	0,589
test 1.4 - non fractal	6 276	0,199	0,200	0,500

Tableau 5.2 – Cellules nouvellement construites pour une simulation entre 2010 et 2030

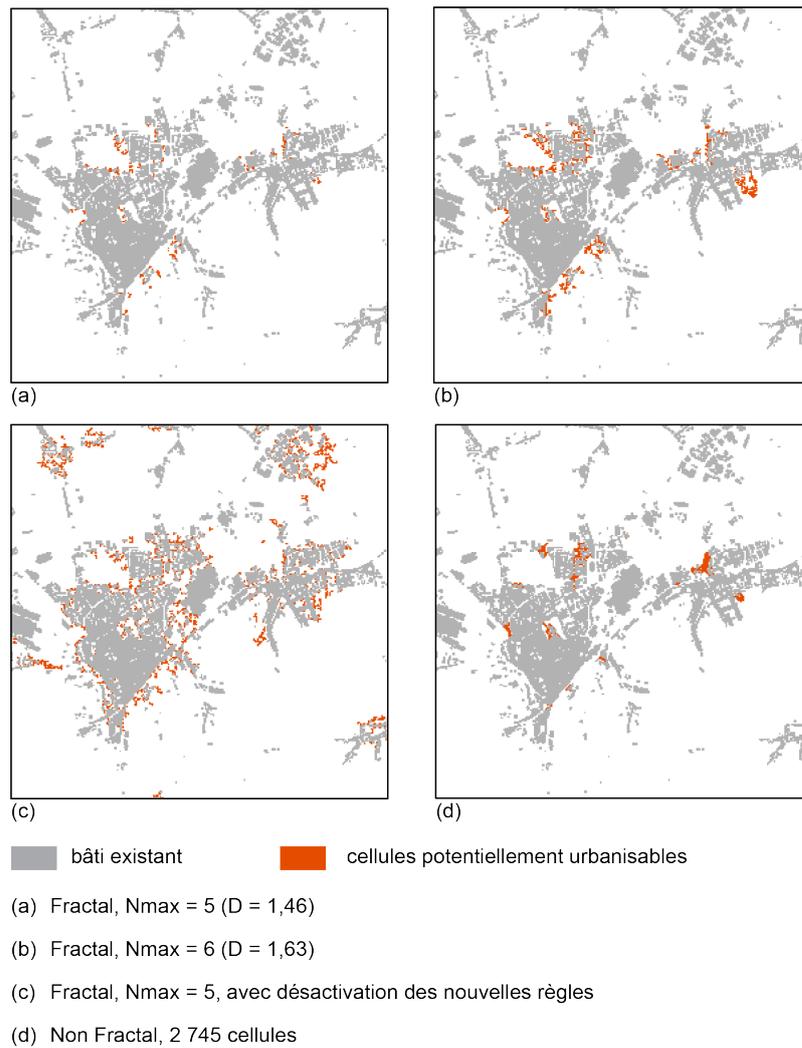


FIGURE 5.1 – Test de l'augmentation de la dimension fractale (extrait sur la municipalité d'Esch-sur-Alzette)

2.2. Influence des règles d'accessibilité sur les cellules identifiées comme potentiellement urbanisables

Pour comprendre l'influence des règles d'accessibilité sur les valeurs d'évaluation globale des cellules potentiellement urbanisables indentifiées par MUP-City, nous avons désactivé une à une toutes les règles. Ensuite, les règles d'accessibilité aux aménités de recours mensuel ou plus rare, aux aménités vertes et de loisirs, et la proximité aux infrastructures de transports en commun étant nouvellement introduites dans MUP-City, nous avons effectué le test d'un retour à la version précédente du logiciel, telle qu'appliquée sur l'agglomération de Besançon (Tannier *et al.*, 2012d).

	Nombre de cellules évaluées positivement	Evaluation moyenne	Evaluation médiane	Evaluation maximale
Simulation de référence : toutes les règles D = 1.77	6 276	0.183	0.176	0.589
Désactivation de la règle de proximité aux espaces non-bâties	6 509	0.254	0.218	0.904
Désactivation de la règle de proximité au réseau routier	6 531	0.183	0.176	0.618
Désactivation de la règle commerces et services quotidiens	11 636	0.251	0.212	0.697
Désactivation de la règle commerces et services hebdomadaires	6 355	0.182	0.176	0.618
Désactivation de la règle commerces et services mensuels ou plus rares	6 266	0.183	0.176	0.618
Désactivation de la règle transports en commun	6 783	0.188	0.180	0.600
Désactivation de la règle aménités vertes quotidiennes	58 998	0.185	0.197	0.704
Désactivation de la règle aménités vertes hebdomadaires	6 312	0.814	0.180	0.647
Désactivation de la règle aménités vertes mensuelles ou plus rares	6 271	0.184	0.178	0.588
Désactivation des 5 nouvelles règles - MUP-City 0.8	82 744	0.192	0.197	0.736

Tableau 5.3 – Influence de la désactivation successive des règles sur l'intérêt des cellules potentiellement urbanisables d'après MUP-City

Plus on introduit de règles, quelle que soit leur nature, plus on augmente le niveau de contrainte et moins le nombre de cellules bien évaluées est élevé. Il est un certain nombre de règles dont la désactivation n'a pas d'influence sur les résultats de simulation, tant du point de vue du nombre de cellules dont l'évaluation est supérieure à 0 que de la distribution de la série statistique des évaluations. C'est notamment le cas pour la règle d'accessibilité aux commerces, services et améni-

tés vertes de fréquentation hebdomadaire ou mensuelle. Au premier abord, ces règles représentent donc des leviers limités dans la définition du potentiel d'aménagement du Luxembourg. C'est également le cas pour l'évaluation de la proximité au réseau routier et l'évaluation de l'accessibilité aux transports en commun. La désactivation de la règle de proximité aux espaces non-bâties n'entraîne pas d'augmentation du nombre de cellules positivement évaluées mais conduit à une redistribution statistique des valeurs d'évaluation en augmentant les valeurs d'évaluation. La simple désactivation de la règle d'accessibilité aux commerces et services quotidiens double le nombre de cellules potentiellement urbanisables, avec plus de 11 000 cellules au lieu des 6 276 de référence. De même, les trois indicateurs statistiques retenus (moyenne, médiane et maximum des valeurs d'évaluation) augmentent également. Le faible nombre d'aménités vertes et de loisirs de fréquentation quotidienne et leur répartition spatiale contraignent fortement le potentiel d'urbanisation au Luxembourg. D'ailleurs, le test de la désactivation de cette règle sur l'évaluation synthétique est probant : le nombre de cellules potentiellement urbanisables augmente fortement pour atteindre près de 60 000 cellules (contre 6 276 pour la simulation de référence). Conjointement, la médiane de l'évaluation approche les 0,20 contre les 0,175 de la simulation de référence et le maximum augmente lui aussi légèrement avec 0,7 contre 0,6.

On constate aussi que l'application des cinq nouvelles règles d'accessibilité de MUP-City 1.0 beta en plus des quatre déjà existantes dans MUP-City 0.8 introduit une réelle contrainte supplémentaire au modèle. La nouvelle version de MUP-City simule en effet vingt fois moins de potentiel d'urbanisation. Évidemment, l'ajout de cinq nouvelles règles ne fait que durcir les critères d'évaluation des cellules.

Plutôt que de désactiver certaines règles, nous nous proposons de les tester avec des seuils de distance différents. Nous ne changeons ainsi pas les normes d'aménagement qui rentrent en compte dans la démarche de simulation, mais nous modifions les règles qui traduisent ces normes dans le modèle.

2.3. Influence de la règle de proximité aux espaces non-bâties sur l'évaluation des cellules potentiellement urbanisables

L'objectif principal de la règle est de maximiser les contacts entre espaces bâtis et espaces non bâtis sans pour autant que cela conduise à la fragmentation tant des espaces bâtis que non bâtis.

	Nombre de cellules évaluées positivement	Evaluation moyenne	Evaluation médiane	Evaluation maximale
Simulation de référence : toutes les règles D = 1.77	6276	0.183	0.176	0.589
Désactivation de la règle d'accessibilité aux espaces ouverts	6509	0.254	0.218	0.904

Tableau 5.4 – Extrait du tableau 5.3

Lors de la désactivation de cette règle, on peut constater une très légère augmentation (+3%) du nombre de cellules positivement évaluées ainsi qu'un accroissement non négligeable de la moyenne des évaluations synthétiques pour les cellules considérées. On observe par ailleurs l'apparition d'une distribution spatiale fractale de l'évaluation globale avec l'activation de la règle, ce qui n'est pas le cas avec sa désactivation. De fait, une désactivation de la règle revient à simuler une distribution spatiale non fractale des évaluations, concentrique, mais le potentiel d'urbanisation final en sortie du modèle est tout de même fractal en raison de la règle fractale d'urbanisation (voir figure 5.2).

La règle de proximité aux espaces non-bâtis possède donc une influence locale sur la définition du potentiel d'urbanisation : on observe de meilleures évaluations au centre des tâches urbaines sans la règle qu'avec. Par contre, la règle apporte davantage de diversité dans les évaluations en bordure urbaine. Sans la règle, les évaluations sont réparties spatialement de manière uniforme ou homogène plutôt au centre des tâches. La règle de proximité aux espaces non-bâtis permet d'introduire davantage de contrastes locaux dans les évaluations. Ainsi, nous conserverons cette règle au cours des tests suivants.

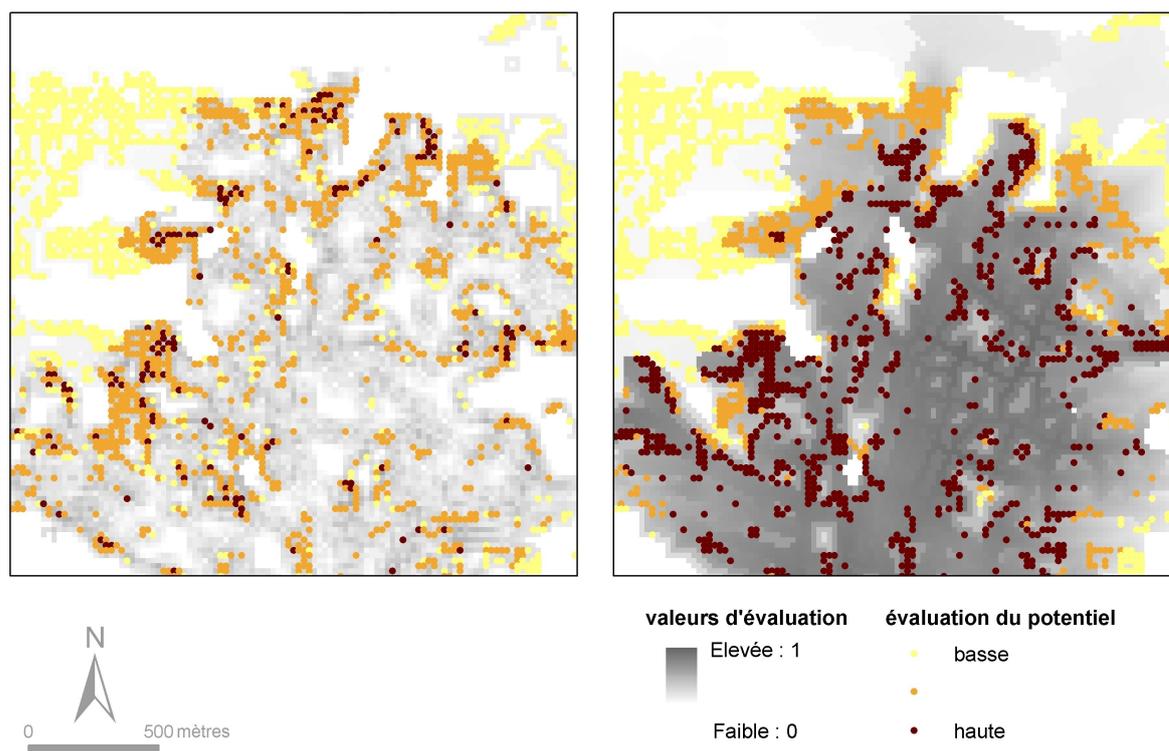


FIGURE 5.2 – Distribution spatiale des valeurs d'évaluation, avec (à gauche) et sans (à droite) la règle de proximité aux espaces non-bâties

2.4. Influence de la règle de proximité au réseau routier sur l'évaluation des cellules potentiellement urbanisables

L'intérêt de cette règle est majeur dans la construction de scénarios d'aménagement durable, où l'économie de la construction d'infrastructures routières est recherchée. La désactivation de la règle de proximité augmente très légèrement le potentiel d'urbanisation défini par la simulation. Cette règle n'introduit donc qu'une faible contrainte à la définition d'un potentiel d'urbanisation. L'horizon temporel de la démarche de construction des scénarios est suffisamment lointain¹, pour que le seuil de distance précédemment établi à 100 mètres puisse être étendu à 300 mètres. L'objectif principal de cette modification est de ne pas exclure du potentiel d'urbanisation des espaces par ailleurs bien évalués, mais légèrement trop éloignés du réseau routier existant en 2010.

Il est tout à fait logique que le nombre de cellules bien évaluées augmente avec le changement de seuil. La carte 5.3, représentant l'agglomération de Luxembourg-ville et le sud du pays, illustre les conséquences spatiales de ce changement de seuil. Pour déterminer l'influence de la proximité au réseau routier sur le potentiel d'urbanisation, deux tests ont été effectués. Nous, nous avons appliqué un nouveau seuil de distance, passant de 100 à 300 mètres, dans l'évaluation de cette règle.

1. Pour rappel, l'horizon de simulation est fixé à 2030.

	Nombre de cellules évaluées positivement	Evaluation moyenne	Evaluation médiane	Evaluation maximale
Simulation de référence : toutes les règles D = 1.77	6276	0.183	0.176	0.589
Désactivation de la règle de proximité au réseau routier	6531	0.183	0.176	0.618
Modification de la règle de proximité au réseau routier	11918	0.206	0.201	0.676

Tableau 5.5 – Extrait du tableau 5.3 et modification du seuil de la règle de proximité au réseau routier

Ce changement a entraîné un doublement du nombre de cellules potentiellement urbanisables.

À une échelle locale, et au regard du faible potentiel d'urbanisation simulé à ce stade de la recherche, la désactivation de la règle n'a pas de conséquences marquées. Pour autant, la modification de la règle de proximité à la route à 300 mètres permet d'obtenir davantage de cellules positivement évaluées, qui localement, apparaissent autour des cellules potentiellement urbanisables à 100 mètres, comme le montre la carte 5.4. Au regard de la densité du réseau routier du Luxembourg, un seuil de 300 mètres n'apporte pas de réelle contrainte au modèle, puisque la carte est presque entièrement couverte. Le seuil de 100 mètres est donc conservé mais il sera possible de nuancer ce résultat dans la pondération des règles, en limitant par exemple l'importance de la règle de proximité au réseau routier dans la suite des analyses.

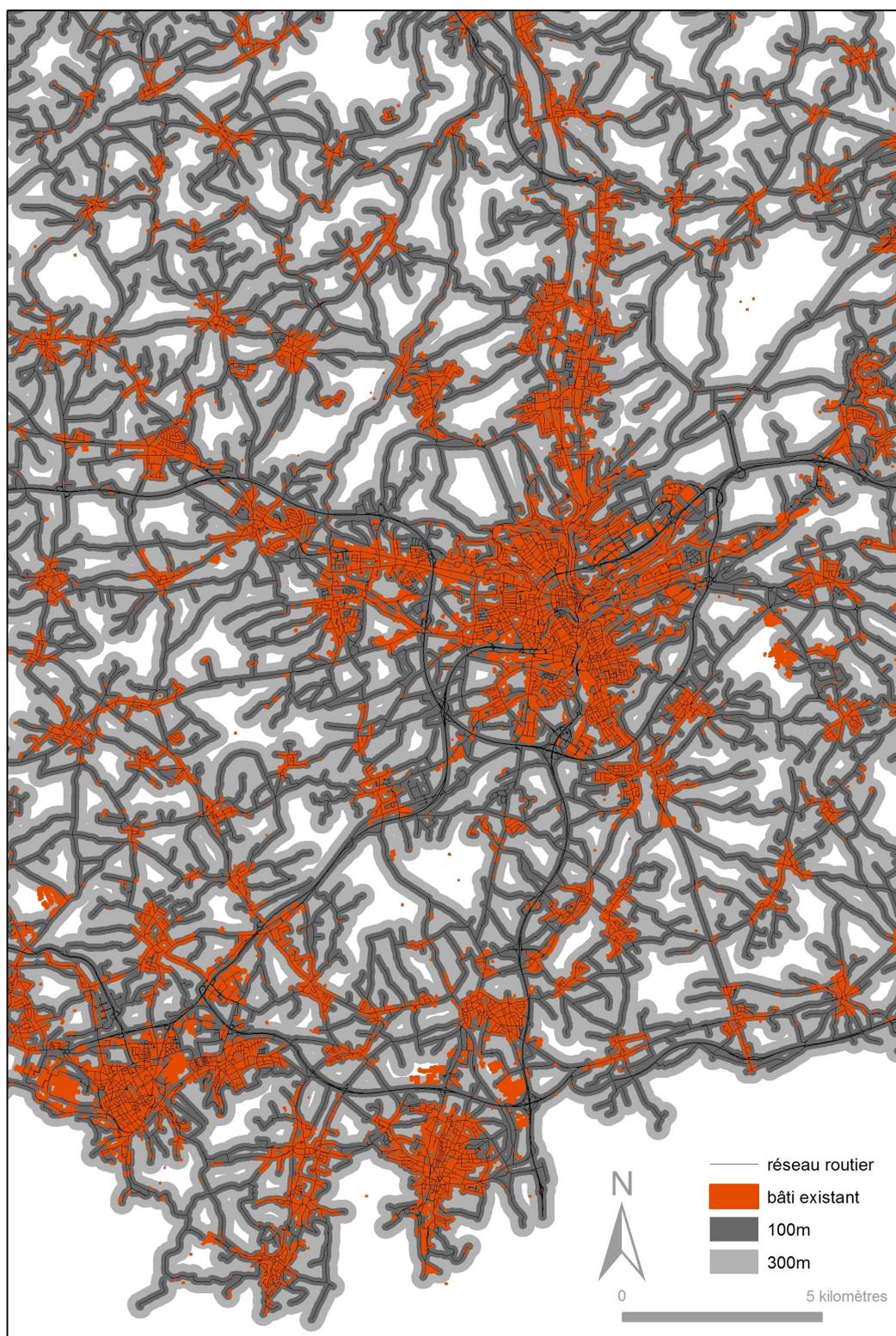


FIGURE 5.3 – Influence de la règle de proximité au réseau routier à 100 et 300 mètres

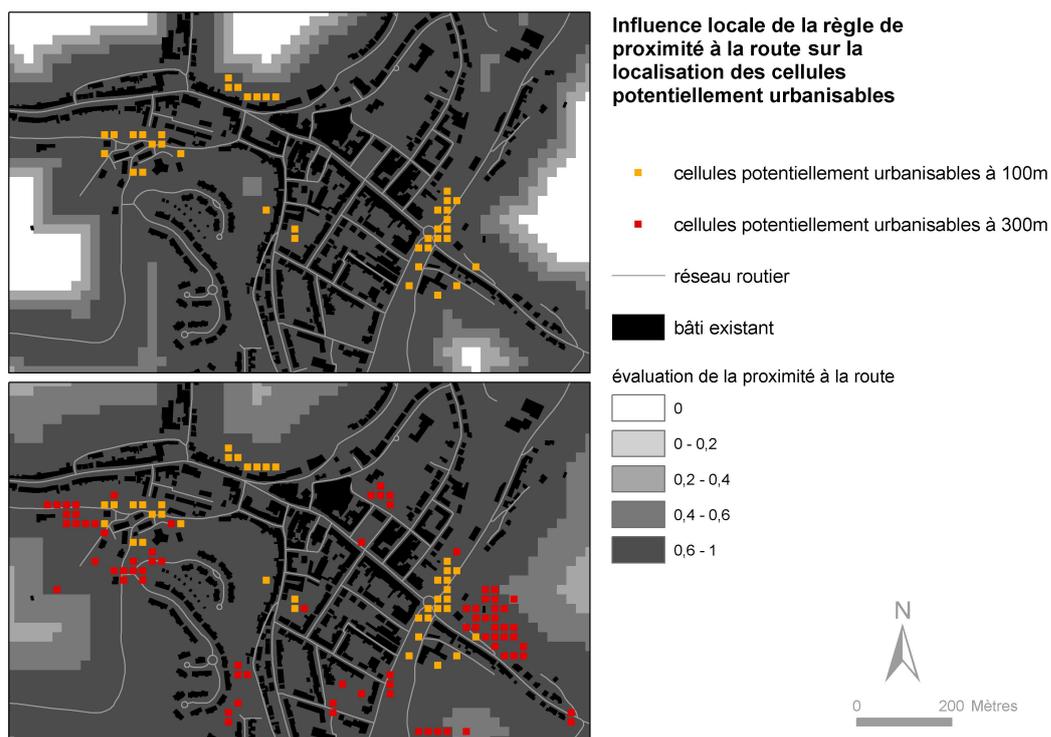


FIGURE 5.4 – Influence locale de la règle de proximité au réseau routier

2.5. Influence des règles d'accessibilité aux commerces et services sur l'évaluation des cellules potentiellement urbanisables

2.5.1. Les commerces et services de fréquentation quotidienne

Comme constaté lors des premiers tests, la règle d'évaluation de la proximité aux commerces et services de fréquentation quotidienne est l'une des plus contraignantes du modèle. Sa simple désactivation engendre un doublement du nombre de cellules potentiellement urbanisables (de 6 000 à plus de 11 000 cellules). Sans désactiver la règle, il convient d'essayer de la modifier pour être davantage en phase avec les réalités auxquelles est confronté le cas luxembourgeois.

Un test a donc été effectué avec l'application d'une nouvelle règle d'accessibilité aux commerces et services de fréquentation quotidienne : le seuil de distance a été modifié de 600 mètres initialement, à 1 000m. Parallèlement, les seuils de constitution des agrégats ont également été revus à la hausse puisque les commerces et services peuvent désormais s'agréger jusqu'à 500m (contre 200m initialement) et ce, dans une limite de 1 500m (contre 1000m initialement). De fait, la modification de la règle permet de dégager un potentiel d'urbanisation nettement supérieur. Cependant, si le maximum d'évaluation augmente fortement, la forme de la distribution ne change pas, avec une moyenne et une médiane relativement similaire. Les modifications des seuils et leurs conséquences sur l'évaluation particulière de l'accessibilité aux commerces et services de fréquentation

quotidienne sont représentées sur les cartes 5.5. Suite à ces observations, le seuil de 1 000 a été sélectionné pour la suite des analyses.

	Nombre de cellules évaluées positivement	Evaluation moyenne	Evaluation médiane	Evaluation maximale
Simulation de référence : toutes les règles D = 1.77	6276	0.183	0.176	0.589
Désactivation de la règle d'accessibilité aux commerces et services de fréquentation quotidienne	11636	0.251	0.212	0.697
Modification de la règle d'accessibilité aux commerces et services de fréquentation quotidienne	10465	0.205	0.203	0.750

Tableau 5.6 – Influence de la règle d'accessibilité aux commerces et services de fréquentation quotidienne sur l'évaluation des cellules potentiellement urbanisables

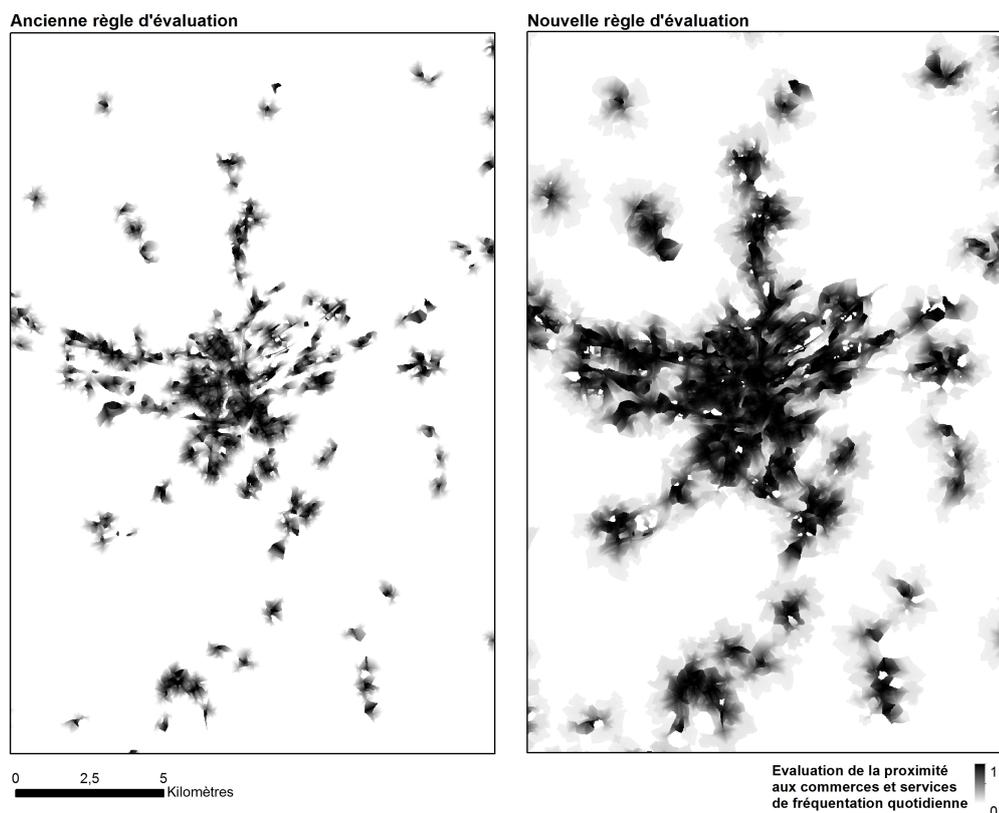


FIGURE 5.5 – Distribution spatiale des valeurs d'évaluation avant (600m) et après (1 000m) modification de la règle d'accessibilité aux commerces et services de fréquentation quotidienne (zoom sur Luxembourg-Ville et ses environs)

2.5.2. Les commerces et services de fréquentation hebdomadaire

La désactivation de la règle d'accessibilité aux commerces et services de fréquentation hebdomadaire n'a que très peu d'impact sur le nombre de cellules potentiellement urbanisables au Luxembourg. Nous avons testé une modification de la règle d'accessibilité en doublant le seuil de distance acceptable (de 1 000 à 2 000 mètres) sans de grands changements dans les résultats obtenus. Le nombre de cellules potentiellement urbanisables est légèrement plus faible, les médianes et moyennes identiques ; seule la valeur maximum d'évaluation est à peine plus élevée. Il semble donc que cette règle ne constitue un levier suffisant pour accroître le potentiel d'urbanisation.

	Nombre de cellules évaluées positivement	Evaluation moyenne	Evaluation médiane	Evaluation maximale
Simulation de référence : toutes les règles D = 1.77	6276	0.183	0.176	0.589
Désactivation de la règle d'accessibilité aux commerces et services de fréquentation hebdomadaire	6355	0.182	0.176	0.618
Modification de la règle d'accessibilité aux commerces et services de fréquentation hebdomadaire	6342	0.182	0.176	0.647

Tableau 5.7 – Influence de la règle d'accessibilité aux commerces et services de fréquentation hebdomadaire sur l'évaluation des cellules potentiellement urbanisables

Les modifications des seuils et leurs conséquences sur l'évaluation de l'accessibilité aux commerces et services de fréquentation hebdomadaire sont représentées sur les cartes 5.6. Le résultat cartographique illustre les résultats statistiques précédemment obtenus. Après augmentation du seuil de distance maximale acceptable pour ces aménités, les valeurs d'évaluations n'augmentent pas de façon importante. Au mieux, certaines cellules dont l'évaluation était proche de 0 avec le seuil de 1 000 sont légèrement grisées sur la carte de droite avec un seuil de 2 000 mètres, ce qui ne change pas vraiment le résultat général du test.

2.5.3. Les commerces et services de fréquentation mensuelle ou plus rare

Telle que formulée actuellement dans le modèle, la règle d'accessibilité aux commerces et services de fréquentation mensuelle ou plus rare ne constitue pas une réelle contrainte dans la définition du potentiel d'urbanisation du Luxembourg. D'ailleurs, la désactivation de la règle n'a pas eu d'effet en ce qui concerne l'augmentation du nombre de cellules potentiellement urbanisables. En

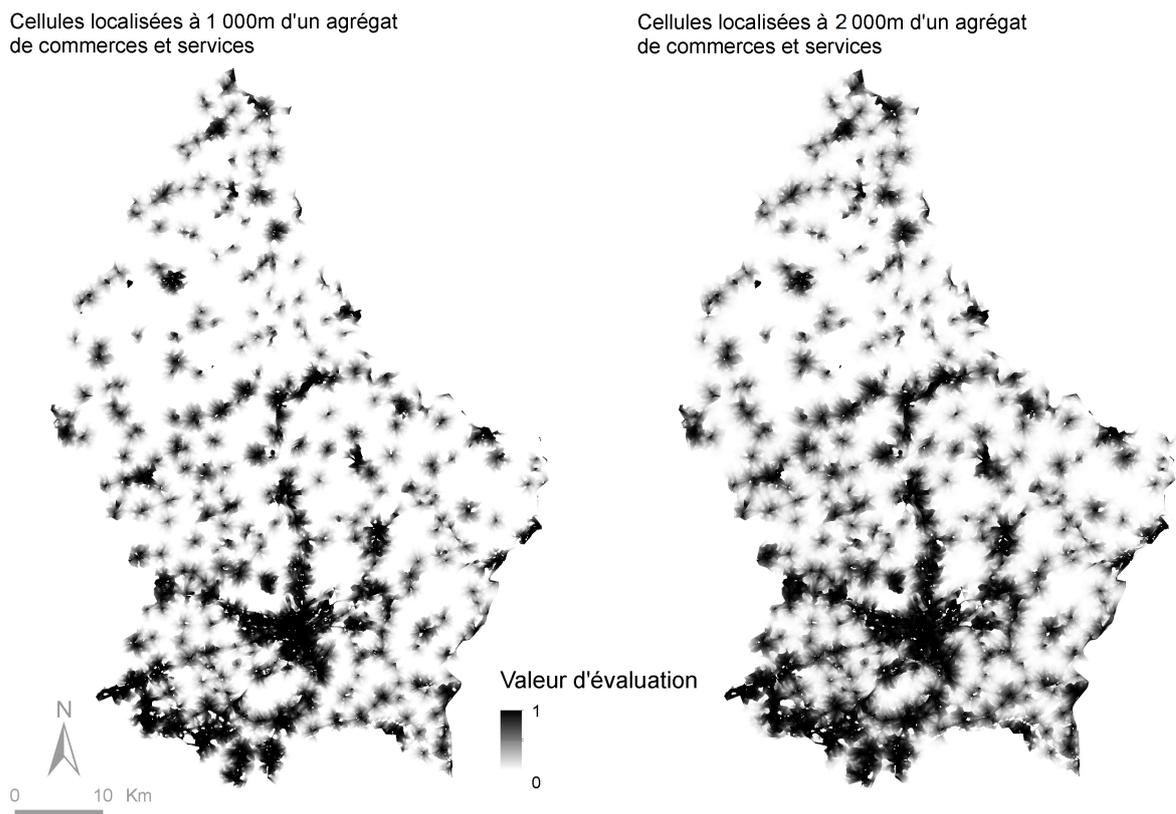


FIGURE 5.6 – Distribution spatiale des valeurs d'évaluation avant (à gauche) et après (à droite) modification de la règle d'accessibilité aux commerces et services de fréquentation hebdomadaire

l'absence de cette contrainte, la valeur d'évaluation a très légèrement augmenté, mais la distribution statistique des valeurs n'a pas changé.

Une modification du seuil de distance de cette règle n'est pas envisagée, puisque l'ensemble des cellules potentiellement urbanisables sont bien évaluées, comme l'illustre la carte 5.7².

2. Les zones blanches indiquent des erreurs de connexions dans la géométrie du réseau. Leur nombre est relativement conséquent, mais en raison de leur éloignement au tissu urbain existant, il n'a pas semblé utile de les corriger.

	Nombre de cellules évaluées positivement	Evaluation moyenne	Evaluation médiane	Evaluation maximale
Simulation de référence : toutes les règles D = 1.77	6276	0.183	0.176	0.589
Désactivation de la règle d'accessibilité aux commerces et services de fréquentation mensuelle ou plus rare	6266	0.183	0.176	0.618

Tableau 5.8 – Influence de la règle d'accessibilité aux commerces et services de fréquentation mensuelle ou plus rare sur l'évaluation des cellules potentiellement urbanisables

2.6. Influence de la règle d'accessibilité aux transports en commun sur l'évaluation des cellules potentiellement urbanisables

La désactivation de la règle d'évaluation de la proximité aux transports en commun a provoqué une croissance de 7% du nombre de cellules potentiellement urbanisables. Dans le même temps, la distribution statistique des valeurs d'évaluation a légèrement changé, avec une médiane et une moyenne qui ont augmenté. Ce premier constat montre le rôle de la règle en tant que contrainte au modèle. Une modification de la règle a donc été testée afin d'en explorer les conséquences sur les résultats de simulation. La distance maximale acceptable pour accéder à un arrêt de bus est passée de 400 à 500 mètres tandis que le nombre d'arrêts de bus dans un rayon de 1 000 mètres a diminué de 4 à 3. La distance maximale acceptable pour accéder à la gare la plus proche a été triplée, passant de 1 000 à 3 000 mètres.

Conformément aux résultats attendus, le nombre de cellules potentiellement urbanisables a augmenté, avec 4% de cellules supplémentaires par rapport à la simulation de référence. Même si d'autres règles peuvent avoir le même effet, nos hypothèses de recherche, dont le report modal à destination des transports en commun fait partie, nous conduisent à opter pour un seuil moins strict dans le but d'obtenir un potentiel suffisant pour satisfaire la croissance résidentielle luxembourgeoise.

La carte 5.8 présente les résultats de l'évaluation de la règle de proximité aux transports en commun. À première vue, les conséquences spatiales des changements de seuils de distance acceptable pour accéder à une station de transport en commun sont de deux types. On constate soit un élargissement des zones desservies par les gares ferroviaires, dont beaucoup de cellules sont déjà urbanisées puisqu'elles recouvrent les agglomérations existantes, soit un accroissement de l'influence des arrêts de bus dans les zones peu denses, où pour l'instant, le potentiel d'urbanisation reste limité.

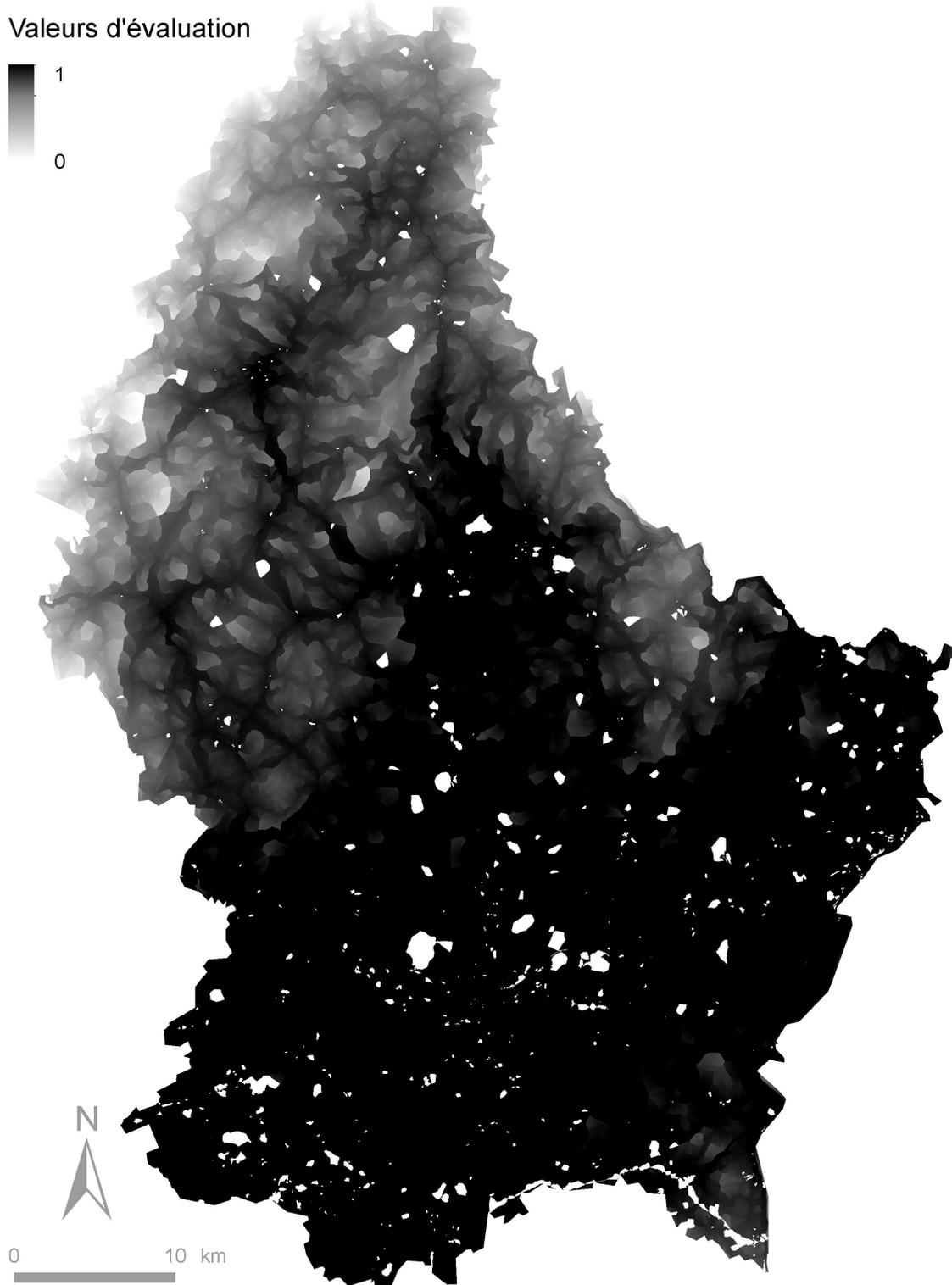


FIGURE 5.7 – Distribution spatiale des valeurs d'évaluation de la règle d'accessibilité aux commerces et services de fréquentation mensuelle ou plus rare

La question de l'évaluation aux arrêts de bus soulève quelques interrogations. Dans la version actuelle du modèle, ils ne sont pas hiérarchisés. Or, un arrêt de bus en zone peu urbanisée, avec un

	Nombre de cellules évaluées positivement	Evaluation moyenne	Evaluation médiane	Evaluation maximale
Simulation de référence : toutes les règles D = 1.77	6276	0.183	0.176	0.589
Désactivation de la règle d'accessibilité aux transports en commun	6783	0.188	0.180	0.600
Modification de la règle d'accessibilité aux transports en commun	6550	0.187	0.179	0.618

Tableau 5.9 – Influence de la règle d'accessibilité aux transports en commun sur l'évaluation des cellules potentiellement urbanisables

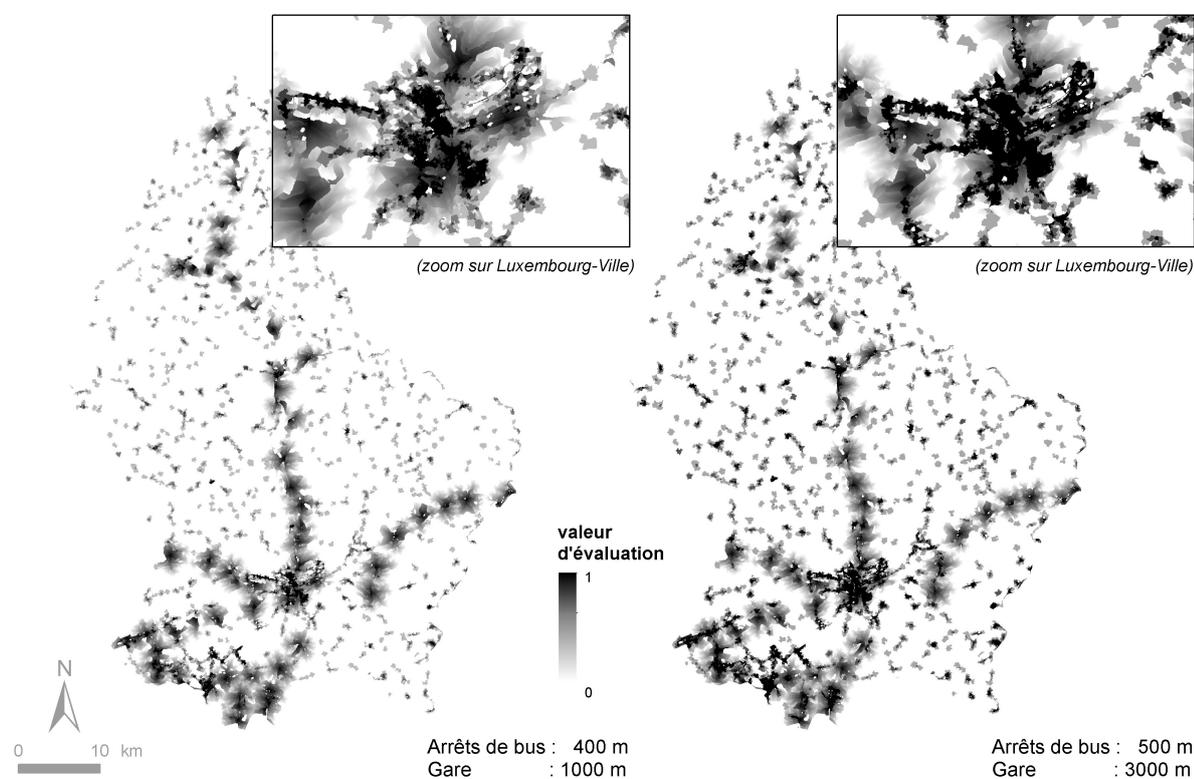


FIGURE 5.8 – Distribution spatiale des valeurs d'évaluation, avant et après modification de la règle d'accessibilité aux transports en commun

nombre restreint de lignes et une fréquence de passage limitée, n'a pas le même impact qu'un arrêt dit structurant, où passent un grand nombre de lignes avec une fréquence élevée. Au regard de la carte 5.8, l'essentiel des bonnes évaluations en matière de proximité à une station de transports en commun sont dues à la proximité aux gares ferroviaires. Les arrêts de bus isolés ont une influence très restreinte et sont à proximité des zones bâties déjà existantes. Il ne nous a donc pas semblé utile de modifier le modèle pour différencier les arrêts de bus en fonction de leur importance dans le réseau.

2.7. Influence de la règle d'accessibilité aux aménités vertes et de loisirs sur l'évaluation des cellules potentiellement urbanisables

2.7.1. Les aménités vertes et de loisirs de fréquentation quotidienne

Concernant l'influence de la règle d'accessibilité aux aménités vertes de fréquentation quotidienne, le test de la désactivation de la règle a confirmé l'hypothèse envisagée selon laquelle cette évaluation particulière est la plus contraignante du modèle (voir carte 5.9). De fait, sans la règle, le nombre de cellules potentiellement urbanisables est décuplé, et atteint près de 60 000 cellules. Parallèlement, la valeur maximale d'évaluation augmente sans pour autant que les autres indicateurs de la distribution évoluent de façon significative. Pour conserver cette règle dans le modèle de construction des scénarios, il faudrait faire passer le seuil de distance maximale acceptable d'accessibilité à ces aménités de 100 à 1 000 mètres pour atteindre le nombre de 10 000 cellules potentiellement urbanisables³. La carte 5.9 illustre les conséquences d'une modification de ce seuil. Comme les parcs et jardins sont relativement peu nombreux au Grand-Duché, l'extension du seuil de distance acceptable ne fait que valoriser très fortement l'accessibilité aux aménités déjà présentes en milieu urbain, là où le potentiel d'urbanisation est le plus limité.

Même si ces résultats sont relativement encourageants au regard de la situation initiale et que cela révèle une fois de plus l'importance des seuils choisis dans la formalisation des règles d'accessibilité de MUP-City, cette règle semble trop contraignante dans le cas luxembourgeois. Nous discuterons à la fin des tests et en conclusion du chapitre de la pertinence de conserver cette règle ou non dans la construction des scénarios.

	Nombre de cellules évaluées positivement	Evaluation moyenne	Evaluation médiane	Evaluation maximale
Simulation de référence : toutes les règles D = 1.77	6276	0.183	0.176	0.589
Désactivation de la règle d'accessibilité aux aménités vertes de fréquentation quotidienne	58998	0.185	0.187	0.704
Modification de la règle d'accessibilité aux aménités vertes de fréquentation quotidienne	10383	0.205	0.204	0.750

Tableau 5.10 – Influence de la règle d'accessibilité aux aménités vertes et de loisirs de fréquentation quotidienne sur l'évaluation des cellules potentiellement urbanisables

3. Des tests avec d'autres valeurs comprises entre 200 et 800 mètres ont été effectués, sans résultats convaincants.

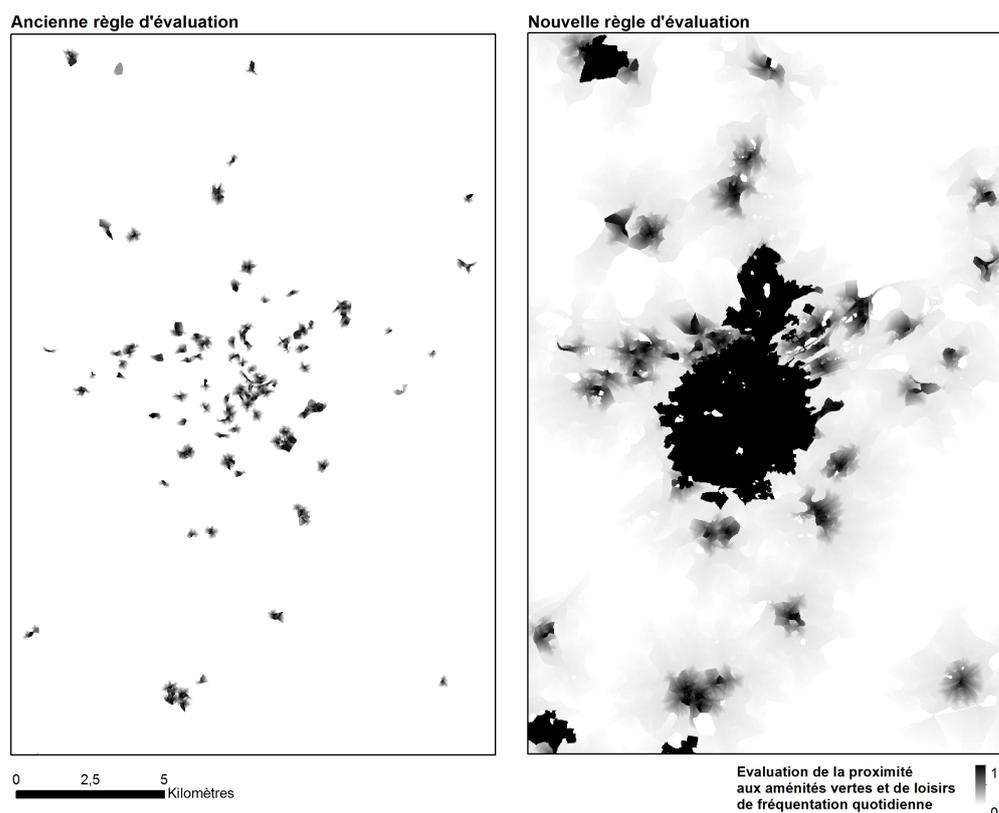


FIGURE 5.9 – Distribution spatiale des valeurs d'évaluation avant et après modification de la règle d'accessibilité aux aménités vertes de fréquentation quotidienne (zoom sur Luxembourg-ville et ses environs)

2.7.2. Les aménités vertes et de loisirs de fréquentation hebdomadaire

La règle d'évaluation aux aménités vertes et de loisirs de fréquentation hebdomadaire est l'une des seules pour laquelle la désactivation et la définition d'un nouveau seuil de distance ont produit des résultats presque similaires. Le résultat obtenu avec la désactivation de la règle peut s'expliquer par le faible potentiel de la simulation de référence qui a été utilisée. Il est donc assez difficile de mesurer le caractère restrictif de cette règle. On voit que l'apport principal du changement de seuil concerne les zones très légèrement grisées sur la carte 5.10. Cependant, comme ces espaces sont souvent assez mal évalués concernant les autres règles, parce qu'on n'y trouve ni commerce ou service, ni infrastructures de transport en commun, une évaluation même peu élevée de l'accessibilité aux aménités vertes et de loisirs de fréquentation hebdomadaire ne permet pas d'améliorer significativement l'évaluation globale des cellules. Pour ne pas trop pénaliser les valeurs d'évaluation, le seuil de 2 000 mètres est conservé, tout en prolongeant la valeur minimale et éliminatoire à 5 000 mètres

	Nombre de cellules évaluées positivement	Evaluation moyenne	Evaluation médiane	Evaluation maximale
Simulation de référence : toutes les règles D = 1.77	6276	0.183	0.176	0.589
Désactivation de la règle d'accessibilité aux aménités vertes de fréquentation hebdomadaire	6312	0.184	0.180	0.647
Modification de la règle d'accessibilité aux aménités vertes de fréquentation hebdomadaire	6342	0.182	0.176	0.647

Tableau 5.11 – Influence de la règle d'accessibilité aux aménités vertes et de loisirs de fréquentation hebdomadaire sur l'évaluation des cellules potentiellement urbanisables

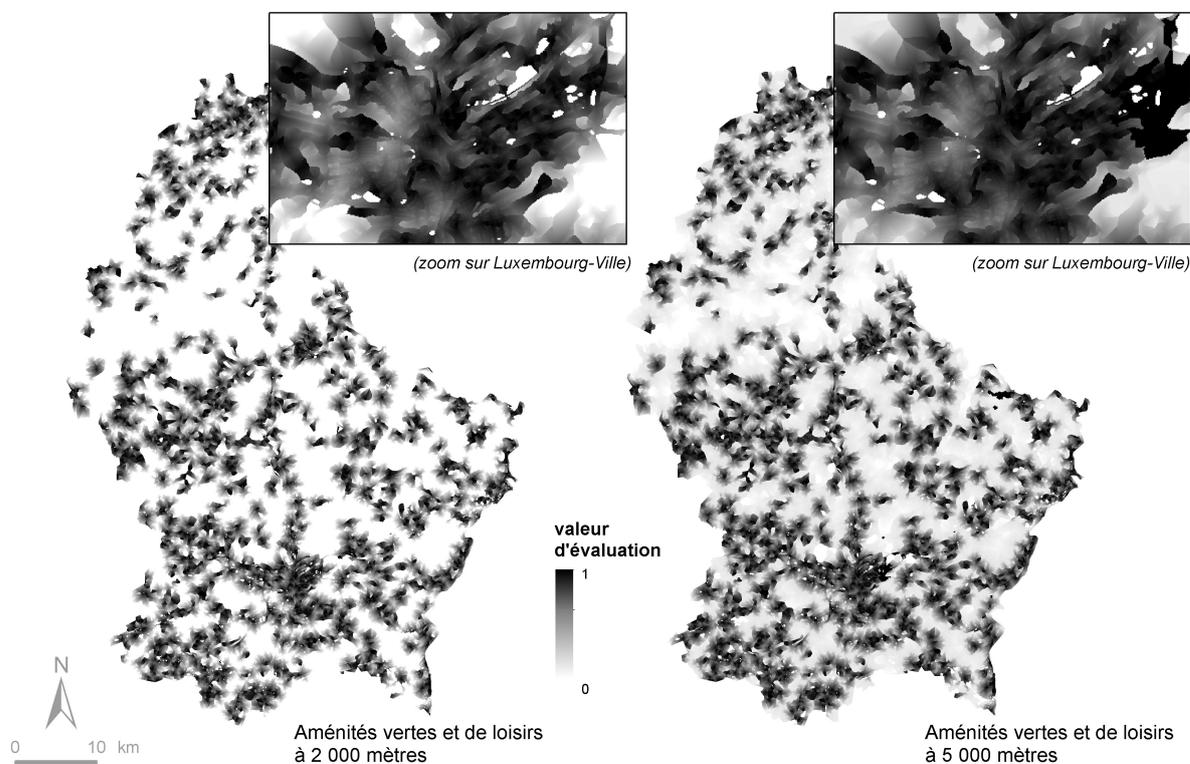


FIGURE 5.10 – Distribution spatiale des valeurs d'évaluation avant et après modification de la règle d'accessibilité aux aménités vertes de fréquentation hebdomadaire

2.7.3. Les aménités vertes et de loisirs de fréquentation mensuelle ou plus rare

Comme constaté lors de l'évaluation initiale, l'ensemble du Luxembourg, bâti existant et potentiel d'urbanisation, est bien évalué en ce qui concerne l'accessibilité aux aménités vertes et de loisirs de recours mensuel ou plus rare. Ceci s'explique par le fort taux de boisement luxembourgeois.

	Nombre de cellules évaluées positivement	Evaluation moyenne	Evaluation médiane	Evaluation maximale
Simulation de référence : toutes les règles D = 1.77	6276	0.183	0.176	0.589
Désactivation de la règle d'accessibilité aux aménités vertes de fréquentation mensuelle ou plus rare	6266	0.183	0.176	0.618

Tableau 5.12 – Influence de la règle d'accessibilité aux aménités vertes et de loisirs de fréquentation mensuelle ou plus rare sur l'évaluation des cellules potentiellement urbanisables

La désactivation de la règle ne produit donc aucun résultat significatif en ce qui concerne le potentiel d'urbanisation ; le nombre de cellules potentiellement urbanisables demeure identique. De même, la forme de la distribution statistique des valeurs d'évaluation ne change pas au regard des trois variables descriptives retenues.



FIGURE 5.11 – Distribution spatiale des valeurs d'évaluation de la règle d'accessibilité aux aménités vertes de fréquentation mensuelle ou plus rare

3. Synthèse de l'Influence de la modification des seuils de distance acceptable sur l'évaluation des cellules potentiellement urbanisables

Le tableau 6.1 présente les résultats issus de l'application des seuils de distance testés précédemment. On voit tout de suite que l'application des seuils moins stricts permet d'identifier davantage de potentiel d'urbanisation. Avec plus de 130 000 cellules évaluées positivement, on se rapproche des valeurs indicatives du nombre de cellules à urbaniser au Luxembourg à l'horizon 2030 (voir chapitre 3). Cependant, si la valeur d'évaluation maximale a largement été rehaussée, la médiane a vu sa valeur divisée par deux, ce qui est une information sur la forme de la distribution des valeurs obtenues. La moyenne confirme également le résultat de la valeur médiane. De fait, nous avons obtenu davantage de cellules potentiellement urbanisables en jouant sur les seuils de distance acceptable, mais les cellules ne sont pas toujours très bien évaluées.

	Nombre de cellules évaluées positivement	Evaluation moyenne	Evaluation médiane	Evaluation maximale
Simulation de référence : toutes les règles D = 1.77	6276	0.183	0.176	0.589
Simulation de référence, avec des seuils moins stricts	131154	0.141	0.094	0.794
Simulation de référence, sans la règle d'accessibilité aux aménités vertes de fréquentation quotidienne	196412	0.191	0.176	0.794

Tableau 5.13 – Synthèse de l'évaluation de la situation initiale avec la modification des seuils des règles d'accessibilité

La méthode employée pour agréger les valeurs des règles d'accessibilité explique en grande partie ces résultats. L'opérateur *MIN* employé pour l'agrégation est dit pessimiste : pour une règle, si une évaluation devient proche du minimum 0,01, l'ensemble de l'évaluation synthétique est affectée. C'est également pour cette raison que les tests de différents seuils ou de désactivation des règles ont parfois eu des résultats semblables aux résultats déjà obtenus avec la simulation de référence. La combinaison de l'ensemble de ces tests d'évaluation apporte une hausse significative du nombre total de cellules potentiellement urbanisables.

Au final, la désactivation de la règle d'évaluation de l'accessibilité aux aménités vertes et de loisirs de fréquentation quotidienne combinée à l'application de seuils de distance moins stricts est tout à fait concluant. Non seulement près de 200 000 cellules potentiellement urbanisables sont obtenues en sortie du modèle mais de plus, la distribution statistique des valeurs d'évaluation est nettement améliorée. Si la valeur maximum n'a pas changé, la moyenne et la médiane ont considérablement augmenté. Le tableau 5.14 présente les nouvelles règles, moins strictes, telles qu'elles ont été adoptées pour la suite de nos calculs. Pour des questions de clarté, seules les règles ayant été modifiées et les seuils reconsidérés sont mentionnés sur le schéma. Au final, seules 5 règles et une dizaine de paramètres (parmi les dizaines que comprend le modèle) ont fait l'objet d'une modification.

3. Synthèse de l'Influence de la modification des seuils de distance acceptable sur l'évaluation des cellules potentiellement urbanisables

RÈGLE	SEUILS STRICTS		SEUILS MOINS STRICTS	
commerces et services de fréquentation quotidienne				
Distance maximale de constitution des agrégats	1 000		1 500	
Distance maximale entre les aménités	200		500	
Fonction d'évaluation de la distance	0	1	0	1
	200	0,5	500	0,5
	600	0,01	1 000	0,1
	-	-	3 000	0,01
commerces et services de fréquentation hebdomadaire				
Distance maximale de constitution des agrégats	3 000		3 000	
Distance maximale entre les aménités	200		500	
Fonction d'évaluation de la distance	0	1	0	1
	2 000	0,01	2 000	0,1
	-	-	3 000	0,01
proximité aux infrastructures de transports en commun				
Distance maximale à la gare ferroviaire	1 000		3 000	
Distance maximale à un arrêt de bus	400		500	
Fonction de comptage des arrêts de bus	4	1	3	1
	0,01	0,01	0,01	0,01
aménités vertes et de loisirs de fréquentation quotidienne				
Fonction d'évaluation de la distance	0	1	0	1
	300	0,01	500	0,5
	-	-	1 000	0,1
	-	-	3 000	0,01
aménités vertes et de loisirs de fréquentation hebdomadaire				
Fonction d'évaluation de la distance	0	1	0	1
	2 000	0,01	2 000	0,1
	-	-	5 000	0,01

Tableau 5.14 – Seuils stricts et moins stricts des règles d'accessibilité qui ont fait l'objet d'une modification pour la simulation de scénarios prospectifs au Luxembourg

4. Sensibilité des résultats de simulation à différentes priorités dans les règles d'accessibilité

Dans les simulations de scénarios réalisées avec MUP-City précédemment, toutes les règles revêtaient la même importance. Il s'agit maintenant d'étudier en quoi une modification de l'importance respective de chaque règle permet ou non de mieux répondre aux objectifs d'aménagement. Comme expliqué précédemment, la règle de proximité aux espaces non-bâties et celle de proximité à la route doivent être prises en compte sans pour autant qu'elles n'excluent du potentiel d'urbanisation des cellules qui seraient bien évaluées par les autres règles. De fait, dans tous les cas, elles auront un poids plus faible que les autres.

L'idée est de présenter ici deux points de vue, l'un visant à favoriser une bonne évaluation de l'accessibilité aux commerces et services, l'autre à favoriser une bonne accessibilité aux infrastructures de transports en commun. Dans le premier cas, l'idée générale est que l'importance de la règle soit croissante parallèlement à la fréquence de recours potentielle de l'aménité considérée. Plus cette dernière est susceptible d'être fréquentée souvent, plus la priorité de croissance résidentielle doit se faire à proximité de celle-ci. Dans le deuxième cas, et afin d'établir une comparaison très contrastée avec la première, toute l'importance a été donnée à la règle d'évaluation de la proximité aux stations de transports en commun. Les importances des règles de proximité aux espaces non-bâties et de proximité à la route sont identiques dans les deux cas pour faciliter la comparaison.

4.1. Favoriser l'accessibilité aux commerces et services

À première vue, avec près de 200 000 cellules positivement évaluées, la pondération des règles favorisant les commerces et services (voir tableau 5.15⁴) n'a pas de conséquence défavorable sur l'évaluation globale des cellules potentiellement urbanisables du Luxembourg.

La moyenne des évaluations (0,16) reste acceptable par rapport à l'ensemble des tests précédemment effectués mais le nombre de cellules très faiblement évaluées est très important. Seules 75 000 cellules (1/3 du potentiel) ont une valeur d'évaluation supérieure à 0,10. Ainsi, le potentiel d'urbanisation obtenu en sortie est plus conséquent, mais les cellules ont une évaluation synthétique assez faible.

Favoriser l'accessibilité aux commerces et services	NB	R	F1	F2	F3	TC	L2	L3	coefficient
Règle de prox. esp. non-bâti (NB)	-	1	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	0,295
Règle « routes » (R)	1	-	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	0,383
Règle commerces et services quotidiens (F1)	3	3	-	7	7	7	7	7	3,396
Règle commerces et services hebdomadaires (F2)	3	3	1/7	-	5	5	5	5	1,618
Règle commerces et services mensuels ou plus rare (F3)	3	3	1/7	1/5	-	3	3	3	0,835
Règle « transports en commun » (TC)	3	3	1/7	1/5	1/3	-	1	1	0,474
Règle aménités vertes hebdomadaires (L2)	3	3	1/7	1/5	1/3	1	-	3	0,564
Règle aménités vertes mensuelles ou plus rares (L3)	3	3	1/7	1/5	1/3	1	1/3	-	0,435

Tableau 5.15 – Valeurs utilisées dans la comparaison par paires des différentes règles de MUP-City, en faveur de l'accessibilité aux commerces et services

4. Pour un gain de place et une meilleure lisibilité, les intitulés de colonnes sont indiqués par leurs initiales, reprises dans les intitulés de lignes.

4.2. Favoriser l'accessibilité aux transports en commun

Dans l'ensemble, et sur le plan statistique, la pondération des règles favorisant l'accessibilité aux stations de transports en commun (voir tableau 5.16) produit les mêmes résultats que celle destinée à privilégier l'accessibilité aux commerces et services.

Le nombre de cellules positivement évaluées est aussi important, avec près de 200 000 cellules positivement évaluées. La moyenne des évaluations de 0,16 est relativement cohérente avec le reste des résultats et la médiane traduit une distribution des valeurs vers les très faibles évaluations (inférieures à 0,1). Les résultats sont tout de même supérieurs à ceux obtenus lors du test précédent privilégiant les commerces et services : près de la moitié des cellules potentiellement urbanisables dans le cas d'un scénario en faveur de l'accessibilité aux transports en commun ont une évaluation supérieure à 0,10.

Favoriser la proximité aux transports en commun	NB	R	F1	F2	F3	TC	L2	L3	coefficient
Règle de prox. esp. non-bâties (NB)	-	1	1/3	1/3	1/3	1/7	1/3	1/3	0,279
Règle « routes » (R)	1	-	1/3	1/3	1/3	1/7	1/3	1/3	0,279
Règle commerces et services quotidiens (F1)	3	3	-	1	1	1/7	1	1	0,700
Règle commerces et services hebdomadaires (F2)	3	3	1	-	1	1/7	1	1	0,700
Règle commerces et services mensuels ou plus rare (F3)	3	3	1	1	-	1/7	1	1	0,700
Règle « transports en commun » (TC)	7	7	7	7	7	-	7	7	3,944
Règle aménités vertes hebdomadaires (L2)	3	3	1	1	1	1/7	-	1	0,700
Règle aménités vertes mensuelles ou plus rares (L3)	3	3	1	1	1	1/7	1	-	0,700

Tableau 5.16 – Valeurs utilisées dans la comparaison par paires des différentes règles de MUP-City, en faveur de la proximité aux transports en commun

4.3. Comparaison des deux séries de pondérations

Sur le plan statistique, les résultats d'évaluation synthétiques obtenus par l'application des deux séries de pondérations sont assez semblables (voir tableaux 5.15, 5.16 et 5.17). Le nombre de cellules potentiellement urbanisables et leurs distributions statistiques ont de nombreux points communs. Une différence envisagée se situe au niveau de la localisation géographique des potentiels d'urbanisation. C'est pourquoi une analyse plus détaillée de la distribution spatiale des évaluations, et donc des formes générées par les deux pondérations, nous semble à ce moment pertinente.

Simulation	Nombre de cellules évaluées positivement	Evaluation moyenne	Evaluation médiane	Evaluation maximale	Evaluation supérieure à 0.10
Pondération des règles en faveur de l'accessibilité aux commerces et services	197 325	0.163	0.029	0.879	75 392
Pondération des règles en faveur de la proximité aux transports en commun	196 510	0.167	0.065	0.907	91 306

Tableau 5.17 – Synthèse de l'analyse des deux séries de pondérations de la comparaison par paires

À première vue (cartes 5.12), il semble difficile de faire la différence « à l'œil nu » entre les deux scénarios malgré un zoom sur Luxembourg-Ville. De fait, un problème de représentation des données se pose, les objets graphiques étant trop nombreux et trop petits pour que notre œil puisse convenablement les distinguer. Il convient donc de cartographier différemment les résultats de simulation.

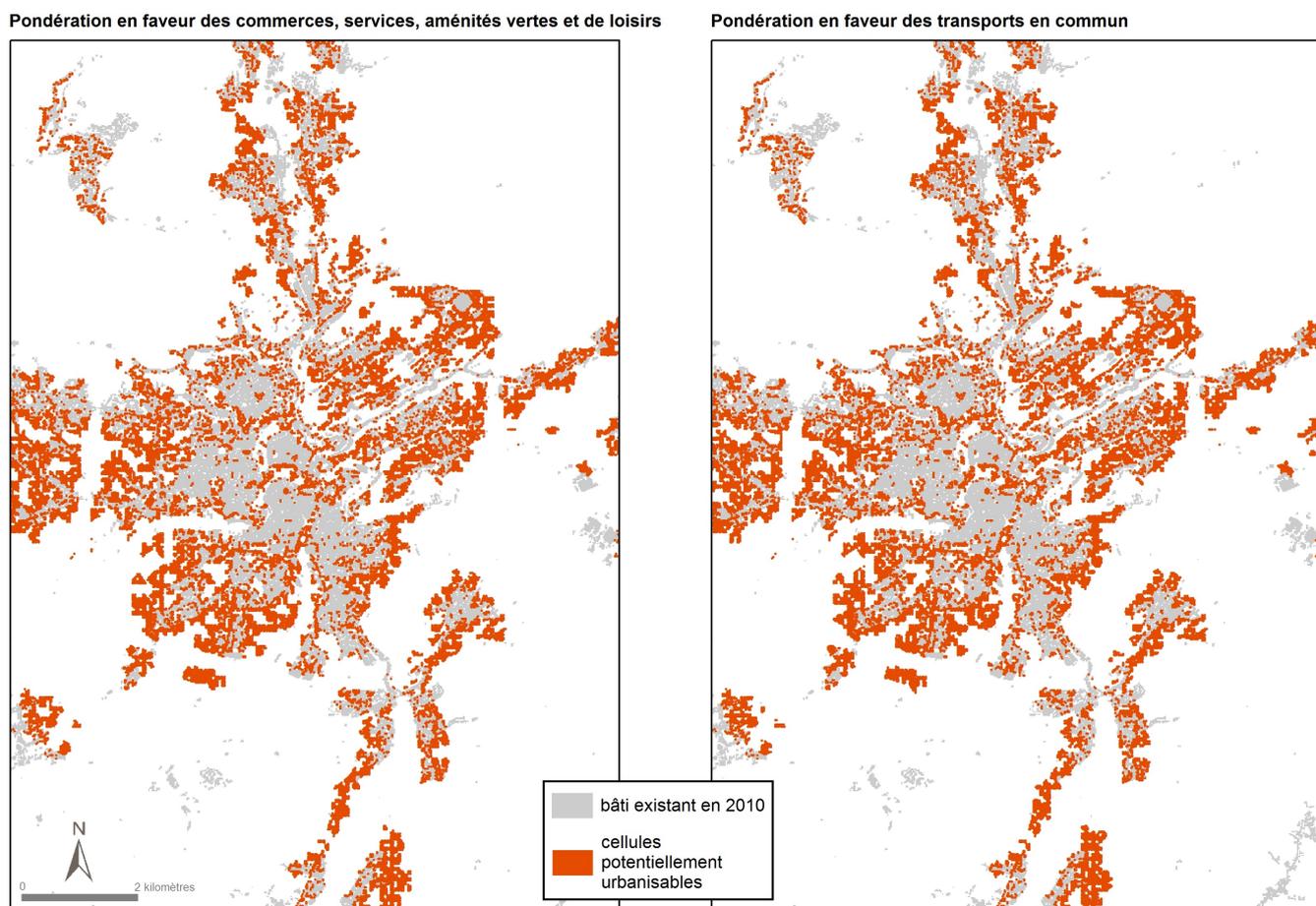


FIGURE 5.12 – Comparaison des deux pondérations des règles en faveur de l’accessibilité aux commerces et services ou en faveur de la proximité aux transports en commun (zoom sur Luxembourg-Ville et ses environs)

Nous avons tenté une interpolation des résultats par la méthode dite de densité des noyaux⁵. Comme toute interpolation, la méthode de calcul a d’abord été créée pour générer de l’information dans les localisations où elle n’existe pas. Elle est donc ici employée à contre-emploi, puisque le volume d’information est largement suffisant, mais difficile à lire graphiquement. En appliquant la méthode de densité des noyaux pour cartographier le potentiel d’urbanisation simulé, l’information ponctuelle est rendue surfacique et des zones de tendances apparaissent sur la carte 5.13.

5. Sous SIG, cette fonction est disponible sous le nom de *kernel density*.

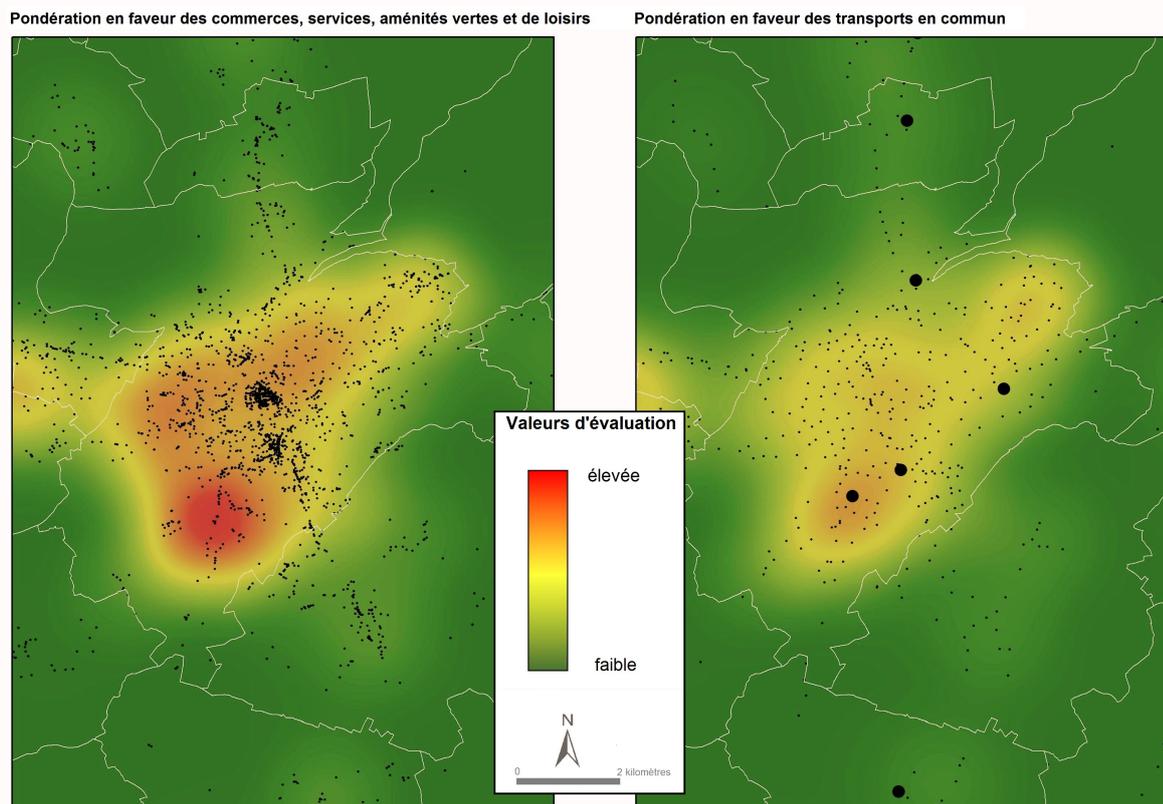


FIGURE 5.13 – Comparaison des deux séries de pondérations, en faveur de l'accessibilité aux commerces et services (à gauche, les points noirs désignent les commerces et services) ou en faveur de la proximité aux transports en commun (à droite, les petits points noirs désignent les arrêts de bus, les gros les gares ferroviaires), représentation par la méthode de densité des noyaux (extrait sur Luxembourg-ville)

À la simple lecture de ces cartes, le modèle semble bien réagir aux deux orientations d'aménagement envisagées. Les zones « chaudes » (ou *hot spots*) ont l'air de suivre la distribution des différentes aménités en fonction des choix de pondérations effectués dans la comparaison par paires. Toutefois, il faut garder en tête que le potentiel représenté ci-dessus n'est pas uniquement défini par les aménités (commerces et services, ou infrastructures de transports en commun) ; d'autres règles (accessibilité aux espaces ouverts, proximité à la routes, accessibilité aux espaces verts et de loisirs), participent également au calcul de l'évaluation synthétique.

5. Conclusion du chapitre 5

Ce cinquième chapitre de la thèse a été l'occasion de présenter la démarche permettant de simuler le développement résidentiel dans MUP-City. Cette méthode est à la base des scénarios qui seront décrits dans le chapitre 6. C'est pourquoi il était nécessaire de présenter en détail les différentes orientations disponibles à l'utilisateur pour générer des potentiels de croissance résidentielle à l'aide de la plateforme de simulation. Comme nous nous inscrivons dans le cadre d'une transition d'un modèle existant, il était également intéressant de comprendre le paramétrage de ce modèle.

La transcription en règles dans le modèle de simulation est une étape fondamentale de notre travail, sachant que modifier un paramètre dans MUP-City, par exemple, modifier une fonction d'évaluation, ne remet en cause ni les objectifs de croissance résidentielle, ni les normes d'aménagement. Les seuils des règles d'accessibilité discutés ici sont une partie du paramétrage du modèle, qui comprend également la règle fractale d'urbanisation.

Notre hypothèse générale étant basée sur l'application d'une norme fractale du développement résidentiel, il est logique que la règle fractale d'urbanisation tiennent une place prépondérante dans les résultats obtenus dans ce chapitre. Une augmentation significative de la dimension fractale, autrement dit de l'homogénéité du tissu résidentiel au niveau local, constitue une des clés dans la construction des scénarios. Le choix d'une dimension fractale élevée, avec $N_{max} = 7$, va dans le sens des résultats obtenus par Tannier et al, notamment en 2012. L'augmentation du niveau de fractalité du bâti ne semble pas incompatible avec une politique d'augmentation de la densité, les scénarios devraient confirmer cette hypothèse.

L'accessibilité aux commerces et services, et particulièrement ceux dont la fréquence de recours potentielle est quotidienne, joue un rôle majeur dans la définition du potentiel d'urbanisation. Si la distance maximale acceptable pour accéder aux commerces et services a été accrue pour correspondre au cas luxembourgeois, il demeure que la prise en compte de l'accessibilité à ces aménités est fondamentale pour favoriser l'utilisation des modes doux et encourager la marche à pied (McCormack, 2004 ; Boarnet, 2011). Il en va de même pour les aménités vertes, surtout les parcs et jardins, dont l'attractivité décroît fortement avec la distance (Kaplan, 1985). Ces derniers, doivent être bien équipés et de taille suffisante pour avoir une attractivité suffisante, comme c'est le cas pour les aménités vertes de fréquence de recours potentielle hebdomadaire, généralement localisées près d'équipements ou de terrains de sports (Giles-Corti *et al.*, 2005). Les très courtes distances (moins

de 500 mètres) pour accéder aux espaces verts constituent une référence dans l'acceptabilité des individus (Higgs *et al.*, 2012), la recherche de cette proximité doit former un objectif.

Les tests des seuils du modèle ont une nouvelle fois montré la difficile tâche du paramétrage d'un outil de simulation (Richiardi *et al.*, 2006 ; Hirtzel, 2015 ; Schmitt *et al.*, à paraître). En effet, ces étapes de simulation soulignent la nécessité d'adapter les règles du modèle au cas d'étude, sans pour autant modifier la démarche de modélisation initiale et sans dénaturer les hypothèses qui en sont à l'origine. Comme constaté précédemment, les derniers résultats d'évaluations synthétiques ont été la conséquence directe d'une modification des seuils de distance dans les règles d'évaluation. Il y a davantage de cellules positivement évaluées mais nombre d'entre elles ont des valeurs d'évaluation synthétiques faibles (inférieures à 0,10). L'étude de l'influence des différentes règles dans le processus d'évaluation confirme aussi le fait que la plupart des faibles valeurs d'évaluations sont dues à quelques règles bien identifiées.

En fin de chapitre, nous avons également relevé la question de la représentation et de l'analyse des résultats. Des réactions du modèle qui étaient difficilement observables au niveau local, peuvent assez bien s'observer d'une part, par la sélection d'informations (zoom, sélection de cellules, agrégation spatiale...) et d'autre part, par l'utilisation de méthodes d'interpolations. Ces dernières sont à manipuler avec précaution en raison des biais spatiaux qu'elles peuvent produire mais représentent une bonne option dans l'aide à la visualisation au niveau global.

Chapitre 6

Le Grand-Duché de Luxembourg à horizon 2030 : différents scénarios de croissance résidentielle

« La plus grande beauté d'une ville n'est pas dans les édifices, elle est dans l'espace libre entre les édifices. Les grands artisans de villes sont des sculpteurs d'espace. »

Chronique des Pasquier : VIII. Le Combat des ombres
(1933-1945), Georges Duhamel

CE SIXIÈME chapitre, le dernier de cette deuxième partie, présente les scénarios de développement résidentiel imaginés pour le Luxembourg en 2030. Ces scénarios sont dits réalistes car ils sont basés sur des objectifs de croissance résidentielle identifiés dans le chapitre 2, et intègrent des normes d'aménagement, transcrites sous la forme de règles dans le modèle de simulation. Les scénarios sont construits à la fois sur la base des potentialités décrites dans les chapitres précédents et d'opérations de sélections des cellules en fonction des différentes règles d'aménagement, conformément à notre démarche méthodologique. Chacun de ces scénarios sera présenté de manière identique. Leur présentation suivra la succession des variables telles que présentées dans la figure 3.1. Pour rappel, ces étapes ne sont pas présentées dans l'ordre technique de leur réalisation mais selon l'ordre des choix qui doivent être réalisés dans la démarche processuelle de construction des scénarios.

Les projections démographiques tirées des publications du STATEC fixent l'objectif à atteindre en matière de quantité de logements à construire. Des règles de densité (en logements par hectare) permettent de convertir cet objectif en nombre de cellules bâties à générer par simulation. La forme urbaine globale définit la répartition par commune de ces cellules et établit des différentiels de densités entre elles. La forme urbaine locale décide de la géométrie des cellules potentiellement urbanisables simulées, via le choix de la dimension fractale du tissu urbain simulé. Les normes d'accessibilité aux différentes aménités évaluent l'intérêt à être urbanisées des cellules potentiellement urbanisables et de les sélectionner en fonction de leur valeur d'évaluation synthétique. Le choix des importances respectives des règles affine ces évaluations en fixant certaines orientations thématiques, en favorisant l'accessibilité aux commerces et services ou aux stations de transports en commun. Enfin, les zones de restrictions sont définies afin d'apporter une contrainte supplémentaire.

Au total, huit scénarios ont été retenus afin d'être comparés. Le premier d'entre eux, l'un des moins contraignants, servira de référence pour les comparaisons, c'est le scénario dit IVL. Par la suite, nous explorerons l'application d'un scénario FOD, pour *Fractal-Oriented Development*. Deux autres scénarios s'intéresseront aux conséquences des projections démographiques sur la croissance résidentielle, avec le test d'une hypothèse basse et d'une hypothèse haute, en comparaison de la projection démographique de référence. Un scénario dit de la densité aura pour objectif de mesurer l'influence de cette dernière sur la quantité de terrain consommée. Deux autres scénarios permettront de tester les formes urbaines globales, autrement dit les hiérarchies communales ont des conséquences sur la répartition spatiale de la croissance résidentielle. Enfin, un dernier scénario proposera une urbanisation dans les terrains identifiés comme disponibles au Luxembourg, afin d'identifier les conséquences de la planification en vigueur au Grand-Duché.

Les résultats du calcul du nombre de cellules à urbaniser sera analysé, parallèlement à une ou plusieurs sorties cartographiques. Nous avons adopté la représentation par la méthode de la densité de noyaux pour en faciliter la lecture. Aussi, les cartes contiennent un extrait sur une zone intéressante pour la comparaison, située au sud de la capitale luxembourgeoise, sur la commune de Bettembourg.

À la fin de ce chapitre, les scénarios issus du projet MOEBIUS seront brièvement présentés. Ces scénarios sont comparables à ceux construits dans le cadre de la thèse. Il sera intéressant de voir les convergences et les divergences dans leur construction, tant du point de vue méthodologique, que des hypothèses d'aménagement qui en constituent le socle.

1. Les scénarios de croissance résidentielle simulés avec MUP-City

1.1. Le scénario IVL, dit scénario « de référence »

Ce scénario IVL permet d'établir une base de comparaison pour l'ensemble des autres scénarios d'aménagement. L'ensemble des choix ou orientations qui le composent peuvent être considérés comme des valeurs « par défaut » dans la construction des scénarios. Il s'appuie sur l'hypothèse dite « baseline » des projections démographiques du STATEC, c'est-à-dire celle qui est considérée par l'organisme statistique comme la plus à même d'être réalisée. Concernant la densité de construction, le prolongement de la tendance actuelle de construction est renforcée, conformément aux objectifs politiques affichés. Le seuil de densité est différencié en fonction du critère de forme globale. En conséquence, un seuil de 35 logements à l'hectare est défini pour les communes dites prioritaires dans l'IVL ; à l'inverse, les communes où l'urbanisation est moindre bénéficient d'un seuil de densité conforme aux dynamiques observées à l'heure actuelle, soit 18 logements à l'hectare en moyenne. Sur le plan des formes urbaines au niveau local, le scénario est fractal avec une dimension assez élevée ($D = 1.77$ ou $N_{max} = 7$). Au niveau global, ce scénario s'applique d'abord sur les 39 communes prioritaires de l'IVL, conformément aux législations et à la planification en vigueur au Luxembourg. De fait, 80% des extensions résidentielles calculées seront localisés au sein des 39 communes. Ce seuil traduit la volonté de prioriser de façon conséquente certaines communes luxembourgeoises. Concernant les règles d'accessibilité aux aménités, une importance particulière est accordée à l'accessibilité aux commerces et services. Enfin, une restriction est apportée par la prise en compte des zones non constructibles, afin de limiter la croissance résidentielle dans des espaces naturels à préserver, dans des zones techniquement difficiles d'accès, ou dans des terrains considérés comme dangereux.

Le nombre de cellules potentiellement urbanisables d'ici 2030 pour ce scénario de référence est de 120 027 cellules, ce qui permet de localiser les 129 759 nouveaux logements d'ici 2030. En ventilant 80 % de la croissance résidentielle dans les communes prioritaires de l'IVL, un potentiel de 84 343 cellules est obtenu. Dans le même temps, les 35 684 autres cellules se placent dans les communes complémentaires. La carte 6.1 présente une cartographie possible des résultats obtenus dans le cadre du scénario IVL. Conformément aux objectifs, une grande partie des cellules potentiellement urbanisables sont localisées au sein des communes prioritaires, et sont symbolisées par un rouge soutenu. L'agglomération de la capitale, le Sud du pays et la *Nordstad* sont les zones où le potentiel de croissance urbaine est le plus conséquent. Néanmoins, d'autres communes prioritaires

Projection démographique	Nombre de logements	Surface à urbaniser (Ha)	Consommation foncière (U.H.)	Densité brute (log/ha)	Nombre de cellules potentiellement urbanisables d'ici 2030
Référence (80% dans les communes prioritaires)	103 807	3 373,7	325	35	84 343
Référence (20% dans les communes complémentaires)	25 952	1 427,3	550	18	35 684
Total	129 759	4 801	-	-	120 027

Tableau 6.1 – Nombre de cellules potentiellement urbanisables dans le cadre du scénario IVL

ne faisant pas partie de ces 3 pôles ressortent, telles que les communes de Grevenmacher, Mertert, Redange, Steinfort, ou encore Wiltz. Ces dernières sont assez bien pourvues en aménités de toutes sortes et desservies par le réseau ferroviaire. Localement, le zoom nous indique une forme urbaine assez uniforme, due au choix d'une forte dimension fractale. Les extensions résidentielles sont bien localisées à proximité immédiate du bâti existant et des espaces non urbanisés demeurent entre les extensions résidentielles, afin de conserver une partie de l'accessibilité aux espaces ouverts.

Projection démographique : estimation de référence (129 759 logements)

Norme de densité : 35 log/ha (communes prioritaires de l'IVL) et 18 log/ha (communes complémentaires)

Forme urbaine locale : fractale, avec $D = 1.77$

Forme urbaine globale : urbanisation en priorité dans les 39 communes prioritaires de l'IVL

Distance aux aménités : pondération des règles pour favoriser l'accessibilité des commerces et services

Restrictions : zones non constructibles

Tableau 6.2 – Récapitulatif des caractéristiques du scénario de référence, dit IVL

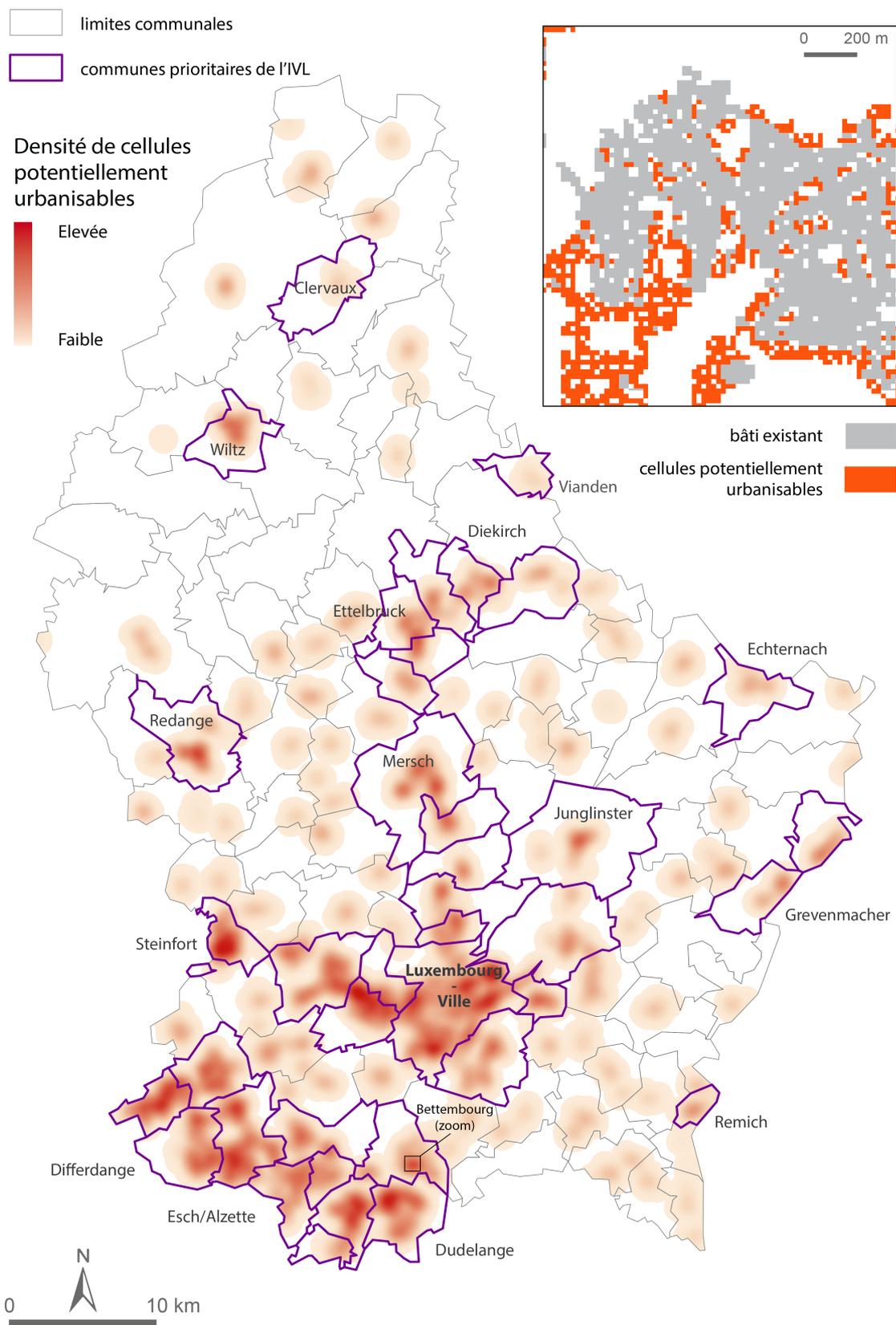


FIGURE 6.1 – Résultat du scénario IVL, représentation par la méthode des noyaux et zoom sur le potentiel d'urbanisation

1.2. Le scénario FOD - *Fractal Oriented Development*

Ce scénario consiste en la traduction d'une politique d'aménagement plus volontariste. L'objectif principal de ce scénario est de concentrer la localisation résidentielle à proximité immédiate des infrastructures de transports en commun. Dans ce scénario, c'est la proximité aux gares ferroviaires qui est recherchée. En effet, les infrastructures afférentes aux passages des lignes de bus sont moins ancrées spatialement et peuvent assez aisément être déplacées (notamment au regard de l'horizon de simulation).

Une nouvelle fois, ce scénario s'appuie sur la projection démographique de référence délivrée par le STATEC en ce qui concerne la projection de la croissance démographique. Du point de vue de la forme urbaine au niveau local, le choix s'est maintenu sur une forme fractale avec une forte dimension, conformément au scénario de référence. Cette option devrait permettre davantage de comparaisons et de limiter les critères de différenciation entre les différents scénarios. De plus, il nous a semblé intéressant de combiner une approche TOD avec l'approche fractale de la forme urbaine.

Logiquement, sur le plan de l'accessibilité aux aménités, une importance supérieure a été accordée à la règle d'évaluation de la proximité aux infrastructures de transports en commun. C'est au niveau de cette étape, une fois l'ensemble du potentiel d'urbanisation obtenu, qu'a été introduite la contrainte de proximité aux infrastructures ferroviaires. Pour ce faire, deux options étaient envisageables. Dans cette optique, l'accessibilité piétonne a été calculée pour toutes les gares du Grand-Duché, sur une distance de 1 000 mètres¹. Une zone de desserte a ainsi été définie afin de limiter les futures constructions à ce seul périmètre. Les cellules définies comme potentiellement urbanisables incluses dans ces zones de dessertes ont été sélectionnées, pour un total de 27 085 cellules.

Projection démographique	Nombre de logements	Surface à urbaniser (Ha)	Consommation foncière (U.H.)	Densité brute (logt/ha)	Nombre de cellules potentiellement urbanisables d'ici 2030
Référence	129 759	1 083,4	120	80	27 085

Tableau 6.3 – Nombre de cellules potentiellement urbanisables dans le cadre du scénario FOD

1. Calculs effectués sous ArcGis, à l'aide de l'extension *Network Analyst*.

Afin de convertir ce nombre de cellules en une densité (voir tableau 6.3), nous appliquons le calcul inverse de conversion des logements en cellules. Dans la démarche de scénarisation, la norme de densité en logements par hectare est imposée a priori (comme précédemment pour le scénario IVL) ou, comme dans le cas présent, a posteriori, en déduisant la densité en faisant le ratio du nombre de logement sur la surface totale des 27 085 cellules potentiellement urbanisables. On observe que la densité de construction qui permet de remplir le double objectif de population et de localisation de cette population à proximité immédiate des infrastructures ferroviaires est d'environ 80 logements par hectare. C'est un résultat intéressant puisque cette densité représente un ordre de grandeur réaliste. Bien sûr, les densités actuelles de construction au Luxembourg sont loin de ce seuil mais bâtir un tel nombre de logements par hectare ne relève pas d'une politique de densification excessive (cf figures 3.6 et 3.5, du chapitre 3 présentant des types de constructions par densité). Pour finir, il faut ajouter que les zones non constructibles ont été prises en compte dans la définition du potentiel d'urbanisation, ce qui renforce le caractère plausible de ce scénario.

Projection démographique : estimation de référence (129 759 logements)
Norme de densité : 80 log/ha autour des gares (calcul effectué a posteriori)
Forme urbaine locale : fractale, avec $D = 1.77$
Forme urbaine globale : zone de dessertes des gares ferroviaires
Distance aux aménités : pondération des règles pour favoriser l'accessibilité aux infrastructures de transports en commun
Restrictions : zones non constructibles

Tableau 6.4 – Récapitulatif des caractéristiques du scénario Fractal-Oriented Development (FOD)

Le résultat cartographique du scénario FOD est présenté sur la carte 6.2. L'armature du réseau ferroviaire luxembourgeois, radiale autour de la capitale grand-ducale, est confortée par la localisation du potentiel d'urbanisation à l'échelle globale. La densité de construction étant élevée à proximité des gares, les zones d'urbanisation apparaissent plus intensément sur la carte par rapport aux résultats issus de l'IVL. Parfois, il arrive que certaines gares soit distantes de moins de 2 000

mètres², lorsqu'elles appartiennent à des localités différentes d'une même commune, ou bien entre deux communes. On observe alors la définition d'un potentiel d'urbanisation sous la forme d'une petite agglomération, plus ou moins allongée. C'est notamment le cas à l'extrémité sud-ouest du pays, avec les communes de Pétange et Bascharage. C'est aussi observable aux environs des communes de Kayl / Rumelange, ou encore à l'extrémité est du pays, sur la commune de Mertert.

Par ailleurs, certaines communes, bien que pourvues d'une infrastructure ferroviaire, ne bénéficient pas ou peu de potentiel d'urbanisation. Pourtant située en périphérie de Luxembourg, la commune de Leudelage (2 000 habitants) n'est pas à l'origine d'une forte croissance urbaine. Il faut dire que la gare est excentrée du bourg centre, où les commerces à proximité restent rares ; de fait, lors des évaluations par MUP-City, peu de cellules ont été évaluées positivement. À l'est du pays, près de la frontière avec l'Allemagne, la commune de Manternach n'a pas été définie comme une zone à fort potentiel. Le bourg centre de la commune, de taille restreinte, n'offre pas un nombre d'aménités suffisamment conséquent pour voir un scénario de type FOD s'y développer. C'est également le cas de quelques communes du nord du Luxembourg.

2. Deux fois 1 000 mètres entre les deux gares

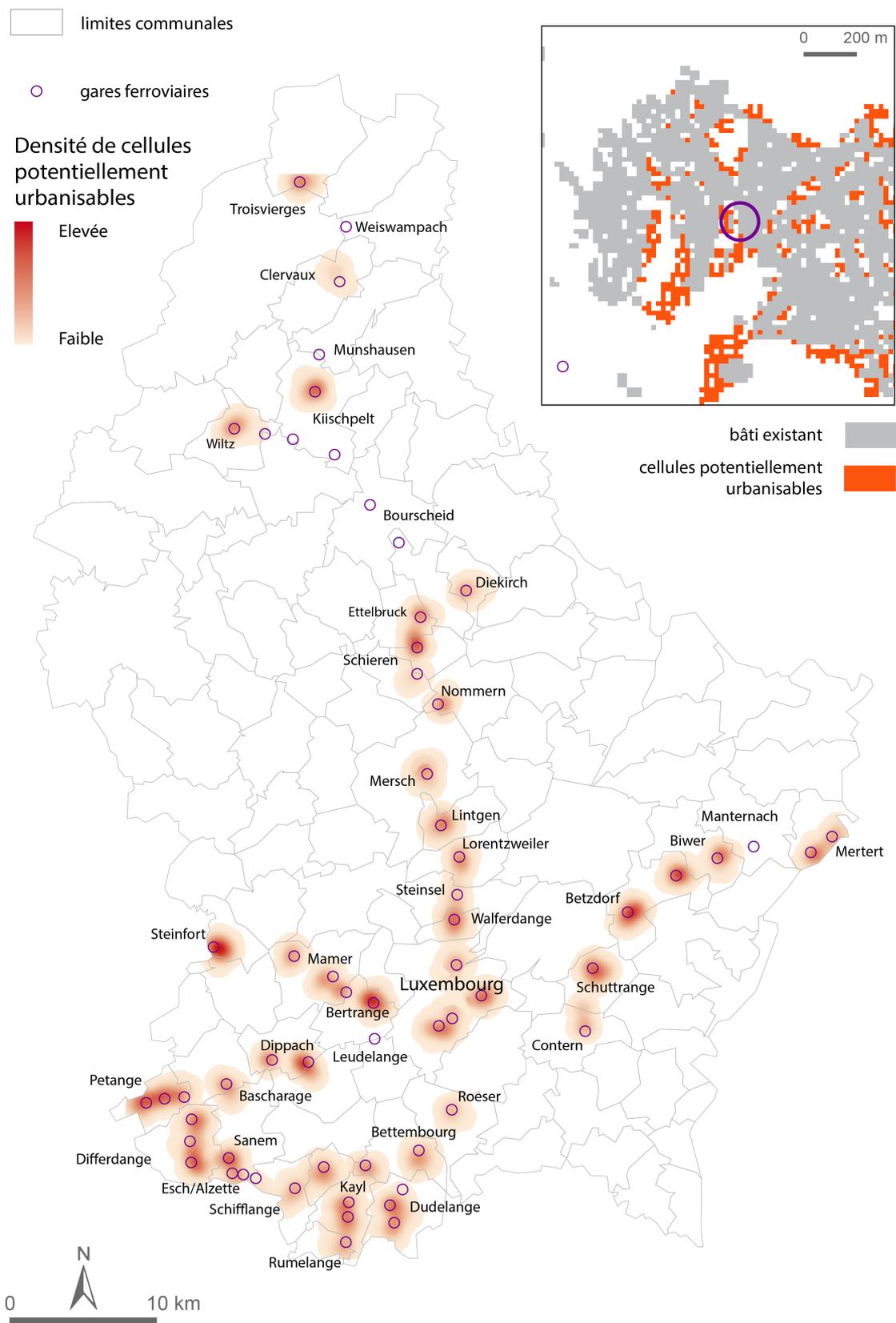


FIGURE 6.2 – Résultat du scénario FOD, représentation par la méthode des noyaux et zoom sur le potentiel d'urbanisation

1.3. Les scénarios de variation des projections démographiques

L'objectif principal de ce scénario est de mesurer les conséquences spatiales des scénarios de projections démographiques réalisées par le STATEC et de démontrer l'importance fondamentale de cette entrée dans la formulation des autres scénarios. Ainsi, retenir un scénario de projection démographique plutôt qu'un autre, c'est déjà faire un choix conséquent pour la suite de la démarche de scénarisation. Dans les autres scénarios, nous avons utilisé les projections *baseline* de population au Luxembourg en 2030. Mais il existe d'autres possibilités offertes dans les différents résultats obtenus par le STATEC. Le choix a donc été fait de réaliser deux variantes du scénario IVL de référence, en adoptant l'hypothèse basse de population et l'hypothèse haute. Nous pensons qu'une modification, même restreinte, de la projection démographique peut avoir des conséquences fortes sur la consommation d'espace par la croissance résidentielle. De fait, la planification de la croissance résidentielle nécessite des projections démographiques pertinentes afin de fixer les objectifs de croissance résidentielle.

Projection démographique : estimation haute ou basse
Norme de densité : 35 log/ha (communes prioritaires de l'IVL) et 18 log/ha (communes complémentaires)
Forme urbaine locale : fractale, avec $D = 1.77$
Forme urbaine globale : urbanisation en priorité dans les 39 communes prioritaires de l'IVL
Distance aux aménités : pondération des règles pour favoriser l'accessibilité des commerces et services
Restrictions : zones non constructibles

Tableau 6.5 – Récapitulatif des caractéristiques des scénarios de modification des projections démographiques

Les résultats du calcul du nombre de cellules pour chaque variante sont présentés dans le tableau 6.6. On observe que l'hypothèse haute de population conduit à 5 000 cellules de plus que les 120 027 cellules du scénario IVL, soit 5% de plus. L'écart avec les projections basses est plus conséquent puisque cette projection nécessite de simuler 30% de cellules en moins. L'enjeu en matière de consommation foncière est donc considérable puisque de l'ordre de 2 500 hectares, ce qui représente, pour donner un ordre de grandeur, la moitié de la surface réellement disponible pour

l'urbanisation au Luxembourg, telle que relevée par l'Observatoire de l'Habitat en 2010.

Projection démographique	Nombre de logements	Surface à urbaniser (Ha)	Consommation foncière (U.H.)	Densité brute (logt/ha)	Nombre de cellules potentiellement urbanisables d'ici 2030
Haute (communes prioritaires)	108 687	3 532,3	325	35	88 308
Haute (communes complémentaires)	27 172	1 494,4	550	18	37 361
Total	135 859				125 670
Basse (communes prioritaires)	73 486	2 388,3	325	35	59 708
Basse (communes complémentaires)	18 372	1 010,4	550	18	25 261
Total	91 858				84 969

Tableau 6.6 – Nombre de cellules potentiellement urbanisables dans le cadre des scénarios de variations des projections démographiques

D'un point de vue cartographique, des nuances se remarquent entre les deux scénarios et les résultats obtenus avec le scénario IVL. Dans le cas du scénario de variation de population selon une hypothèse de forte croissance démographique (carte 6.3), l'intensité d'urbanisation sera plus soutenue sur l'ensemble du territoire, et notamment au sein des communes prioritaires. Toutefois, on constate l'apparition de nouveaux espaces potentiellement urbanisables, comme la commune de Bertzdorf à l'est de l'agglomération de Luxembourg-ville, ou certaines communes du nord du pays. L'apparition de ces nouveaux points chauds est due aux étapes de génération et de sélection des cellules potentiellement urbanisables. Dans le cadre d'une population plus élevée, il y a davantage de cellules à sélectionner parmi le nombre fini de cellules identifiées comme potentiellement urbanisables par MUP-City.

À l'inverse, le nombre de cellules à sélectionner est moindre dans le cas d'une projection de population basse (carte 6.4), et le nombre de constructions potentielles par commune diminue en proportion.

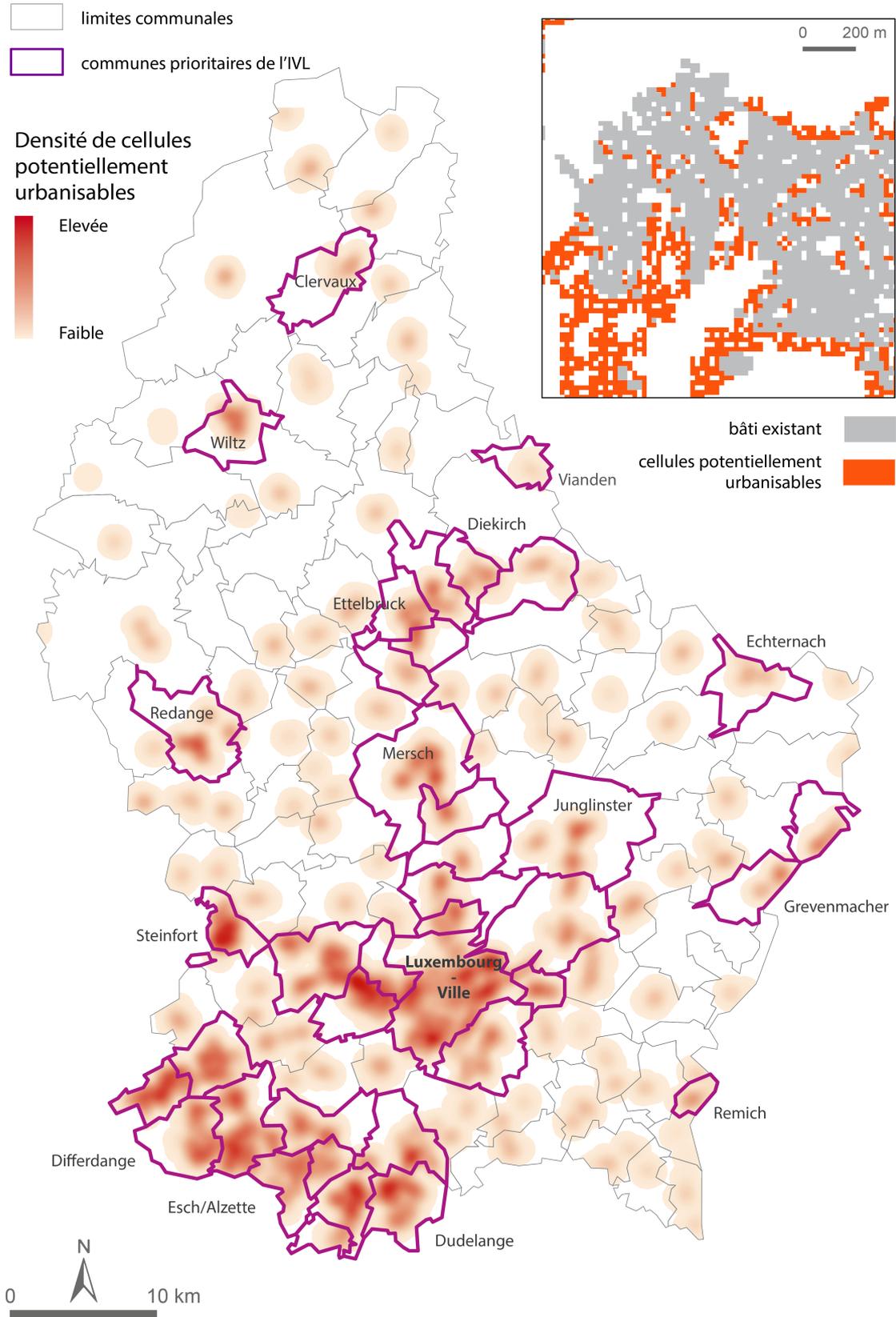


FIGURE 6.3 – Résultat du scénario de modification des projections démographiques (hypothèse haute), représentation par la méthode des noyaux et zoom sur le potentiel d'urbanisation

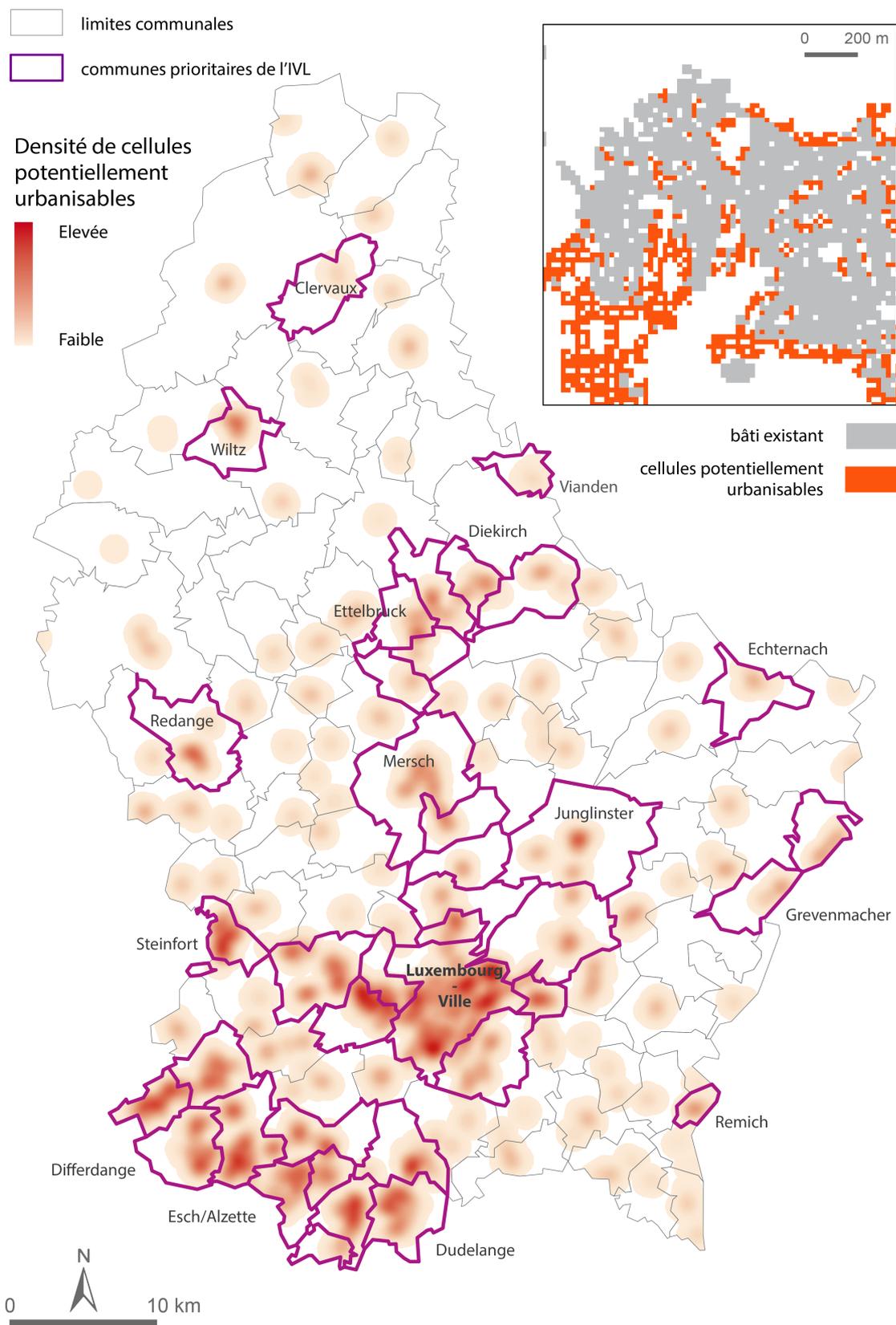


FIGURE 6.4 – Résultat du scénario de modification des projections démographiques (hypothèse basse), représentation par la méthode des noyaux et zoom sur le potentiel d'urbanisation

1.4. Le scénario de la densité

L'idée principale de ce scénario réside en la variation du critère de densité (en nombre de logements à l'hectare) dans le calcul du nombre de cellules à urbaniser. Il semble nécessaire de souligner l'importance du critère de densité, un des volets de la forme urbaine, dans le calcul du potentiel d'urbanisation. De fait, le choix du critère de densité est fondamental dans le calcul de l'urbanisation potentielle et constitue un levier majeur de la maîtrise de l'étalement urbain. Toujours dans l'optique de proposer des scénarios réalistes, il a été décidé de doubler ou presque les critères de densité appliqués dans le cadre du scénario IVL de référence. Ainsi, au lieu des 35 logements par hectare des communes prioritaires, un critère de 60 logements à l'hectare est appliqué. Si 35 logements par hectare sont généralement synonymes de maisons de villes et de petits bâtiments collectif en milieu urbain, une densité de 60 logements par hectare ressemble davantage à de petits immeubles collectifs détachés tels que présentés dans la figure 3.6 dans le troisième chapitre. Parallèlement, les communes non prioritaires de l'IVL, dotées d'un critère de 18 logements à l'hectare (maisons jumelées ou en bandes), verront leur densité doublée pour atteindre les 35 logements à l'hectare.

Projection démographique : estimation de référence (129 759 logements)

Norme de densité : 60 log/ha (communes prioritaires de l'IVL) et 35 log/ha (communes complémentaires)

Forme urbaine locale : fractale, avec $D = 1.77$

Forme urbaine globale : urbanisation en priorité dans les 39 communes prioritaires de l'IVL

Distance aux aménités : pondération des règles pour favoriser l'accessibilité des commerces et services

Restrictions : zones non constructibles

Tableau 6.7 – Récapitulatif des caractéristiques du scénario d'augmentation de la densité

Les résultats issus du calcul du nombre de cellules à sélectionner parmi le potentiel d'urbanisation en sortie de MUP-City est équivoque. Si le scénario de référence projetait l'urbanisation sur 120 000 cellules, il n'en faudrait plus que 64 000 avec de tels critères de densité. Sur le plan de l'analyse cartographique, le potentiel d'urbanisation se localise surtout dans les communes prioritaires

Projection démographique	Nombre de logements	Surface à urbaniser (Ha)	Consommation foncière (U.H.)	Densité brute (logt/ha)	Nombre de cellules potentiellement urbanisables d'ici 2030
Référence (communes prioritaires)	103 807	1 723,2	166	60	43 080
Référence (communes complémentaires)	25 952	843,4	325	35	21 086
Total	129 759				64 166

Tableau 6.8 – Nombre de cellules potentiellement urbanisables dans le cadre du scénario d'augmentation de la densité

de l'IVL, même si les 20% de potentiel de croissance résidentielle dans les autres communes apparaissent assez nettement. Pour l'heure, multiplier par deux le critère de densité revient en effet à diviser par deux le nombre de cellules à urbaniser. D'un autre côté, si les cellules à sélectionner sont moins nombreuses, leurs valeurs d'intérêt à être urbanisées sont bien meilleures, ce qui forme un effet attendu.

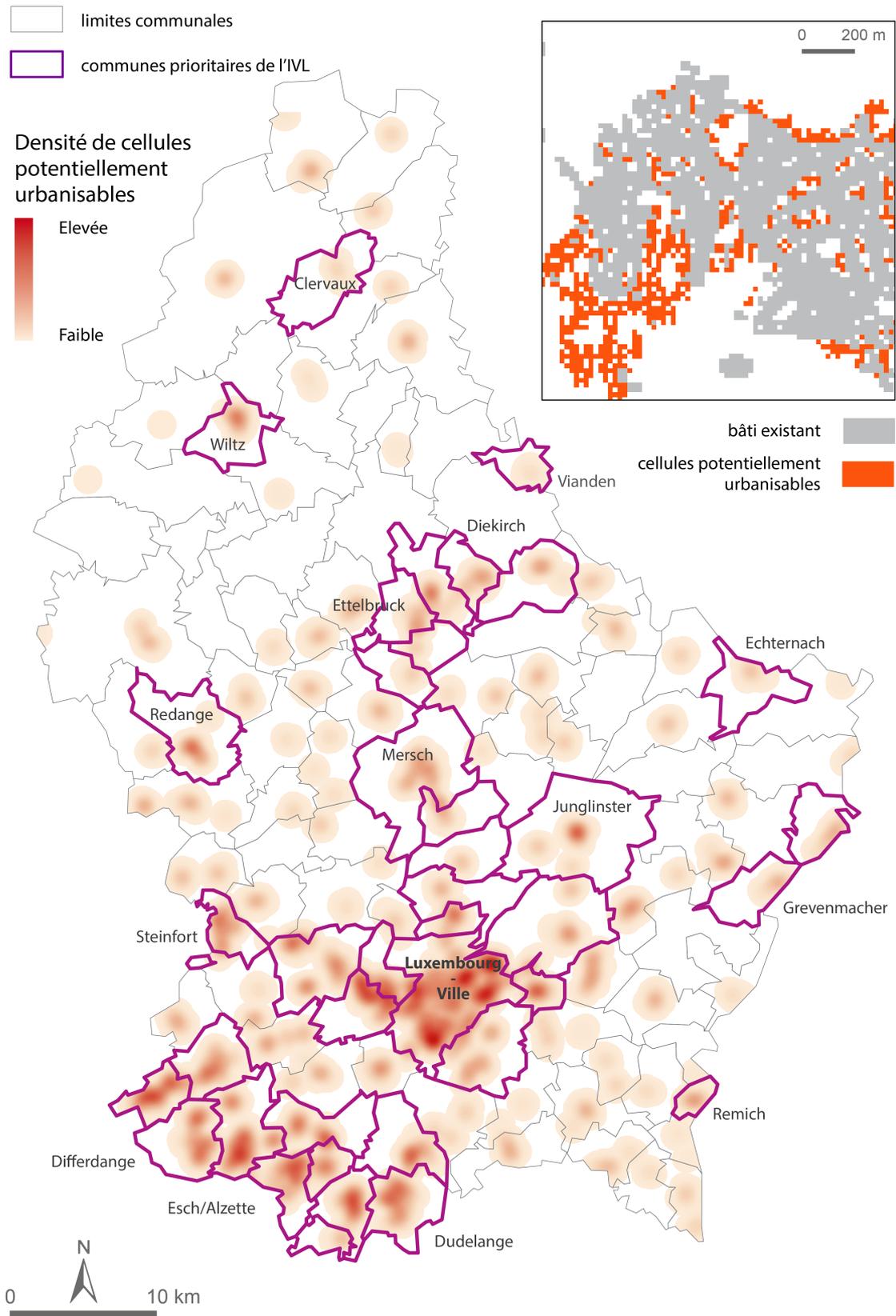


FIGURE 6.5 – Résultat du scénario d'augmentation de la densité, représentation par la méthode des noyaux et zoom sur le potentiel d'urbanisation

1.5. Les scénarios de modification de la répartition par commune de la croissance résidentielle

La variable de forme globale permet de faire varier la génération de la forme urbaine, par l'application de différentes hiérarchies communales. Dans le scénario IVL de référence, nous utilisons la liste des 39 communes prioritaires contenues dans le document de planification. L'objectif des deux autres scénarios de modification de la répartition par commune de la croissance résidentielle est de démontrer l'importance de la prise en compte des hiérarchies urbaines dans la définition de la trame urbaine. Nous allons donc explorer deux variantes opposées, l'une sans aucune typologie communale, l'autre en renforçant la hiérarchie existante et en axant le développement urbain sur les 3 pôles luxembourgeois. Ces 3 zones les plus urbanisées du pays sont l'agglomération de Luxembourg-ville, la région Sud, et l'agglomération de la *Nordstad*. Le Programme Directeur les identifie comme des espaces à forts enjeux de développement urbain. Nous pensons que la hiérarchie urbaine est à la fois conséquence de la fonctionnalité et de la centralité, mais surtout résultat d'une politique de planification. En renforçant ou non cette centralité, il est possible d'influencer fortement la localisation de la croissance résidentielle.

Pour la variante qui définit la croissance résidentielle au sein des 23 communes du Programme Directeur, la densité a été calculée a posteriori, comme dans le cas du scénario FOD, le critère le plus important étant la forme urbaine globale. Les deux tableaux 6.10 et 6.11 présentent les résultats des calculs du nombre de cellules à sélectionner. Dans le cadre du scénario où l'urbanisation s'effectue sur l'ensemble des communes, les 178 419 meilleures cellules ont été conservées, puisque la même densité de logement par hectare est appliquée partout. À l'inverse, uniquement les 78 105 cellules des 3 pôles urbains ont été identifiées par MUP-City comme étant potentiellement urbanisables. La norme de densité a été établie sur cette base. D'après nos calculs, la localisation de la croissance résidentielle conduirait à appliquer une norme de 42 logements par hectare, ce qui est légèrement supérieur à la norme du scénario de référence.

Les conséquences géographiques de ces deux variantes sont représentées par les cartes 6.10 et 6.11. Conformément à nos hypothèses, la forme urbaine globale conditionne en grande partie le développement résidentiel. En l'absence de typologie communale, donc en l'absence de hiérarchie, la croissance résidentielle est répartie de façon uniforme sur la totalité du territoire luxembourgeois. L'ensemble des communes ou presque possédant quelques aménités ont des cellules bien évaluées, donc propices à l'urbanisation. Même des communes n'apparaissant jusqu'alors dans aucun scénario voient leur potentiel de développement résidentiel augmenter de façon significative. C'est notamment le cas dans le nord du Grand-Duché et aussi dans la pointe à l'extrémité sud-est, avec

Projection démographique : estimation de référence (129 759 logements)

Norme de densité : 60 log/ha (communes prioritaires de l'IVL) et 35 log/ha (communes complémentaires)

Forme urbaine locale : fractale, avec $D = 1.77$

Forme urbaine globale : urbanisation en priorité dans les 39 communes prioritaires de l'IVL

Distance aux aménités : pondération des règles pour favoriser l'accessibilité des commerces et services

Restrictions : zones non constructibles

Tableau 6.9 – Récapitulatif des caractéristiques des scénarios de modification de la répartition par commune de la croissance résidentielle

Projection démographique	Nombre de logements	Surface à urbaniser (Ha)	Consommation foncière (U.H.)	Densité brute (logt/ha)	Nombre de cellules potentiellement urbanisables d'ici 2030
Référence	129 759	7 136,7	550	18	178 419

Tableau 6.10 – Nombre de cellules potentiellement urbanisables dans le cadre du scénario de modification de la répartition par commune de la croissance résidentielle (116 communes)

Projection démographique	Nombre de logements	Surface à urbaniser (Ha)	Consommation foncière (U.H.)	Densité brute (logt/ha)	Nombre de cellules potentiellement urbanisables d'ici 2030
Référence	129 759	3 124,2	225	42	78 105

Tableau 6.11 – Nombre de cellules potentiellement urbanisables dans le cadre du scénario de modification de la répartition par commune de la croissance résidentielle (23 communes)

les communes de Mondorf-les-Bains, Remich ou Schengen.

À l'inverse, l'application d'une typologie urbaine stricte permet de contenir grandement la croissance résidentielle. Les cellules potentiellement urbanisables sont localisées au sein de trois pôles au nord, au sud et dans la capitale luxembourgeoise. Il est intéressant de noter que certaines communes voient leur pouvoir de centralité nettement renforcé. C'est notamment le cas pour l'ouest de

la périphérie de la ville-centre. Les communes de Bertrange, Mamer et Strassen sont en effet assez bien pourvues en aménités et donc bien évaluées par MUP-City comme lieu d'implantation des futures extensions résidentielles. La commune de Clémency, au nord du bassin minier et à la frontière belge, connaît un potentiel d'urbanisation conséquent, alors même que la commune est assez peu pourvue en aménités et ne dispose plus de gare ferroviaire. Évidemment, ce genre de scénario est assez extrême, mais il possède un certain intérêt dans la comparaison des différentes formes globales d'urbanisation.

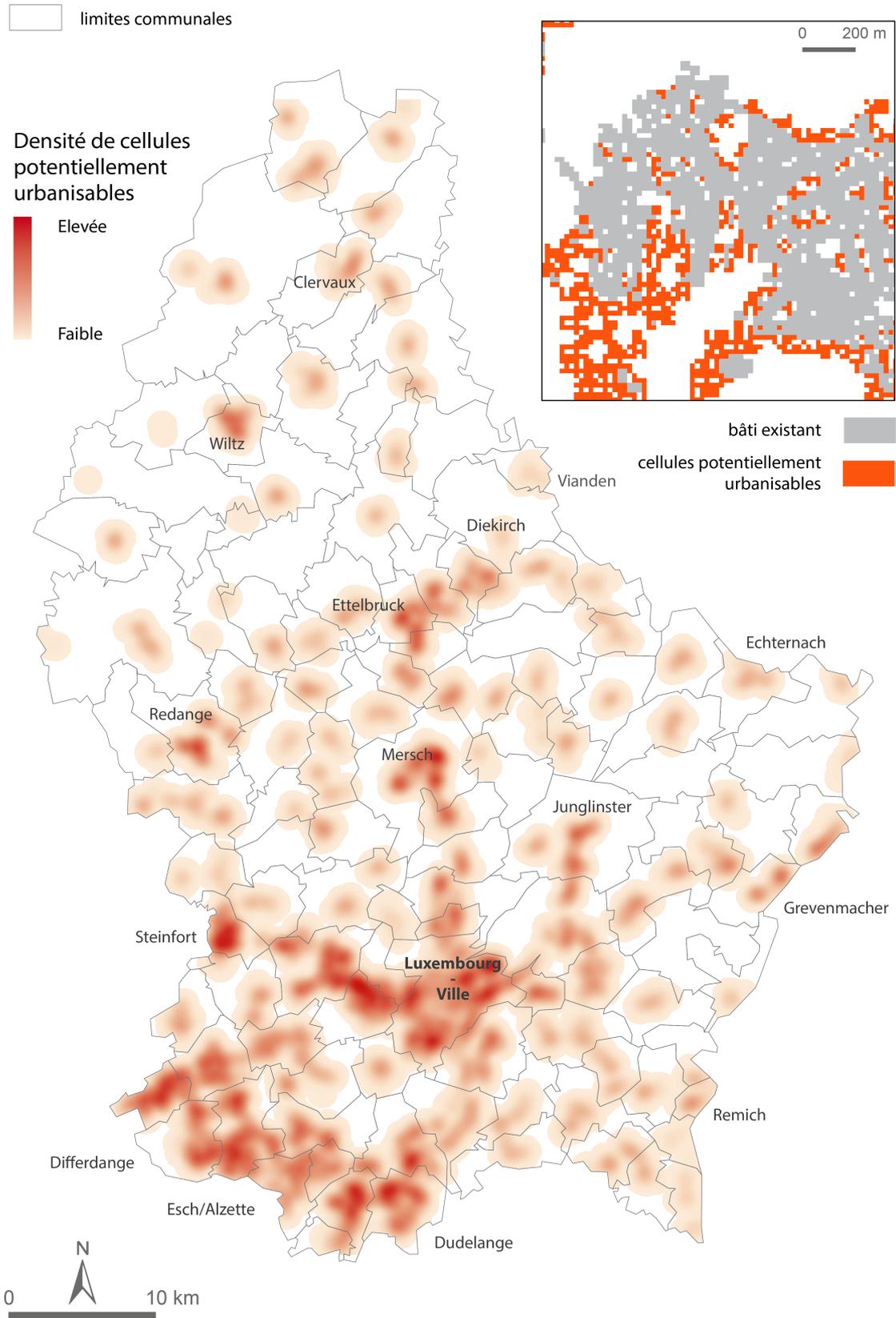


FIGURE 6.6 – Résultat du scénario de modification de la répartition par commune de la croissance résidentielle (116 communes), représentation par la méthode des noyaux et zoom sur le potentiel d'urbanisation

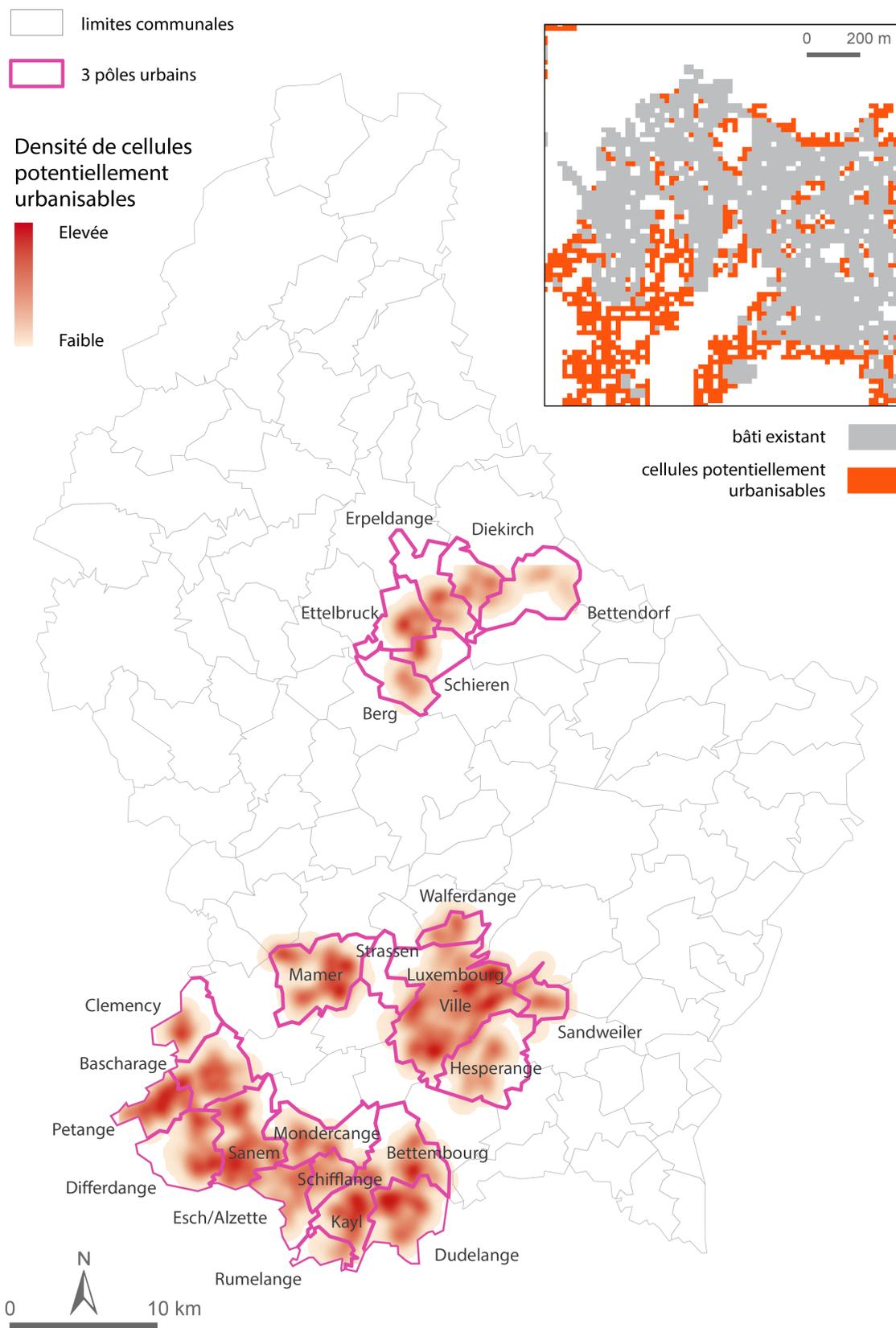


FIGURE 6.7 – Résultat du scénario de modification de la répartition par commune de la croissance résidentielle (23 communes), représentation par la méthode des noyaux et zoom sur le potentiel d’urbanisation

1.6. Le scénario de la disponibilité foncière

L'objectif de ce scénario est d'introduire davantage de réalisme en permettant ou interdisant la construction dans certaines zones. La génération du potentiel de cellules urbanisables est restreinte aux terrains légalement déclarés comme disponibles dans les documents de planification et identifiés par l'Observatoire de l'Habitat. Il est supposé qu'il existe une réelle différence de localisation entre les terrains vraiment disponibles et ouverts à la construction au Luxembourg et les zones potentiellement urbanisables telles que définies dans les autres scénarios. Les autres règles d'aménagement ont été laissées identiques au scénario IVL, sauf pour la forme urbaine globale. En effet, les terrains disponibles au Luxembourg sont localisés dans l'ensemble des communes sans qu'une priorité puisse être définie. Ne sachant pas combien de cellules pourraient être simulées dans cette couche d'information, nous avons décidé de calculer la norme de densité après l'étape d'identification des cellules potentiellement urbanisables par MUP-City (comme pour les scénarios FOD ou des 23 communes).

Projection démographique : estimation de référence
Norme de densité : 150 logements à l'hectare (calcul effectué a posteriori)
Forme urbaine locale : fractale, avec $D = 1.77$
Forme urbaine globale : sans
Distance aux aménités : pondération des règles pour favoriser l'accessibilité des commerces et services
Restrictions : les terrains disponibles au Luxembourg

Tableau 6.12 – Récapitulatif des caractéristiques des scénarios dit de la disponibilité foncière

Comme le montre le tableau 6.13, le nombre de cellules identifiées par MUP-City dans les polygones du potentiel foncier constructible est restreint : à peine plus de 20 000 cellules, ce qui est loin des 120 000 cellules du scénario de référence. En conservant les objectifs d'aménagement, il faudrait donc construire avec une densité bâtie de 150 logements par hectare. Si l'on se réfère à la figure 3.6, une telle densité relèverait d'immeubles collectifs de taille conséquente. Nous sommes donc une fois encore assez éloignés des dynamiques de construction en cours au Luxembourg, mais toujours dans une dimension réaliste. Il faut préciser que les polygones qui représentent numériquement les

terrains disponibles sont généralement de surface assez réduites et contraignent fortement le modèle fractal. De fait, ce dernier, de par sa logique de construction, essaye tout de même de préserver les règles morphologique et de maximiser l'accessibilité aux espaces ouverts pour toutes les cellules bâties, existantes ou à venir.

Projection démographique	Nombre de logements	Surface à urbaniser (Ha)	Consommation foncière (U.H.)	Densité brute (logt/ha)	Nombre de cellules potentiellement urbanisables d'ici 2030
Référence	129 759	858,6	67	151	21 465

Tableau 6.13 – Nombre de cellules potentiellement urbanisables dans le cadre du scénario de la disponibilité foncière

La sortie cartographique des formes simulées conforte une partie des résultats publiés en 2012 par l'équipe de l'Observatoire de l'Habitat (note n° 18, avril 2012). Les zones où le potentiel semble le plus important, en rouge soutenu sur la carte 6.8, sont localisées à Luxembourg / Strassen, Steinfort, Dudelange, Esch-sur-Alzette / Sanem ou encore dans l'agglomération de la Nordstad. Toutefois, certaines communes identifiées par l'équipe du CEPS/INSTEAD et du ministère du Logement n'apparaissent pas sur la présente carte, malgré un fort potentiel foncier disponible, c'est le cas de Wincrange, Rambrouch ou encore Junglister. Ces communes sont peu dotées en commerces et services et les cellules ont été assez mal évaluées par le modèle. Il est également possible que la règle de géométrie fractale « interdisant » la construction dans les cellules non urbanisées au niveau supérieur ne soit pas en adéquation avec ces terrains disponibles.

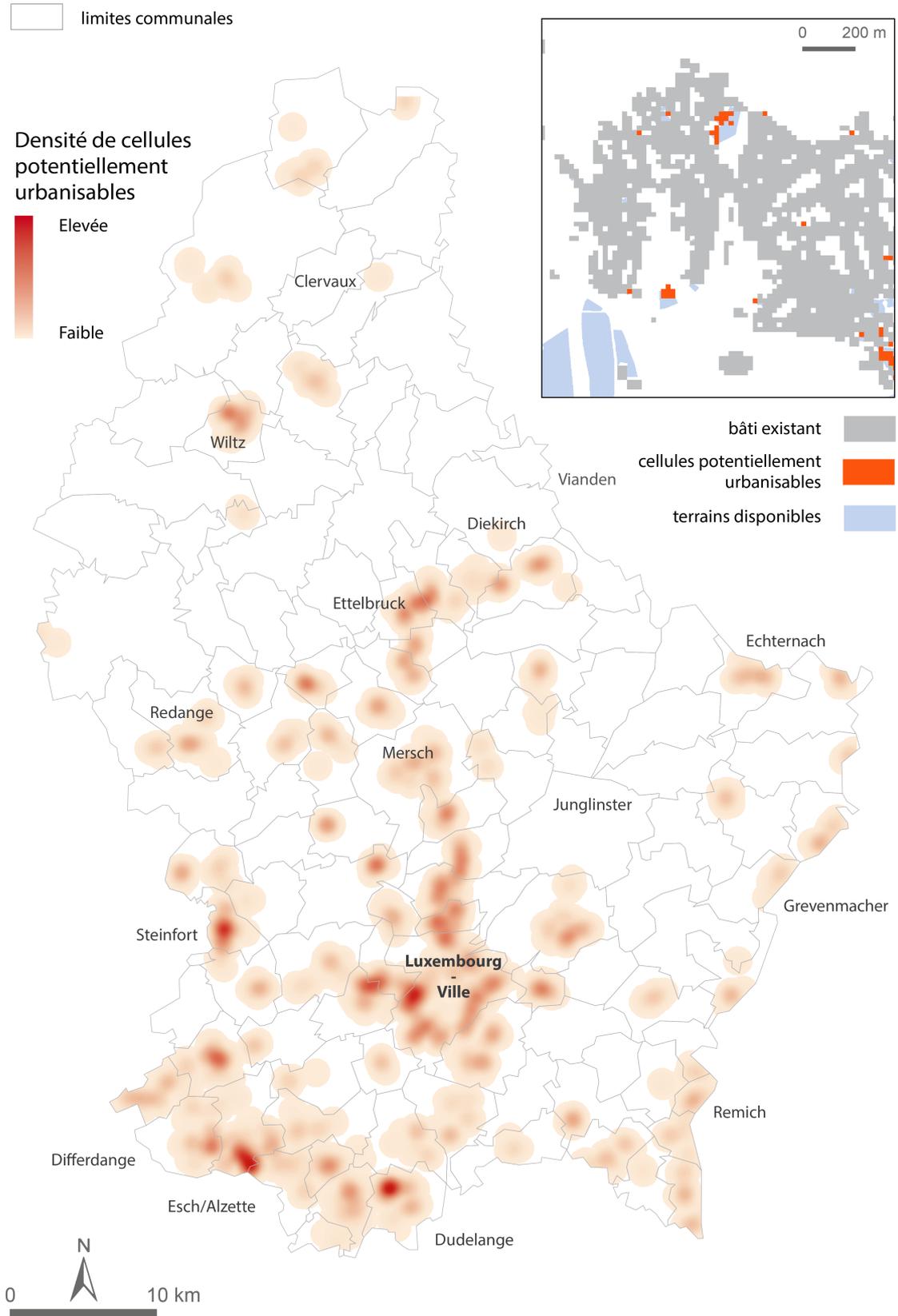


FIGURE 6.8 – Résultat du scénario de la disponibilité foncière, représentation par la méthode des noyaux et zoom sur le potentiel d’urbanisation

2. Les scénarios issus du projet MOEBIUS

L'objectif de la démarche prospective du projet MOEBIUS (Mobilities, Environment, Behaviours Integrated in Urban Simulation) et d'essayer de traduire un certain nombre d'objectifs décrits dans les documents officiels de planification en normes d'aménagements (Lord et al, 2015). Dans cette optique, un regard croisé a été adopté entre le discours politique contenu dans ces documents, et une revue de la littérature sur le plan de l'aménagement et de la prospective urbaine. De fait, le cadre conceptuel de la construction des scénarios d'aménagement s'articule autour de la synthèse de trois concepts de développement urbain : *Smart Growth*, *Transit Oriented Development* et *New Urbanism* (Bilgin, 2012). À ces trois familles d'aménagement ont été confrontées cinq variables clés : centralité, densité, accessibilité, mixité et compacité. Ces variables ont été sélectionnées en fonction de leur apparition fréquente dans la littérature. Elles forment le socle des normes et des règles des scénarios MOEBIUS, dont la démarche de construction figure sur le schéma 6.9. Ces critères d'aménagement ainsi déclinés en fonction des 4 scénarios sont appliqués uniquement aux terrains disponibles dans les plans d'aménagements généraux (PAG, voir figure 2.15 du chapitre 2). Pour permettre la comparaison, ces potentiels fonciers ont été découpés selon la même grille de cellules de 20 x 20 mètres, alignés sur la grille utilisée par MUP-City. Après une rapide présentation des indicateurs et des scénarios, nous présenterons les principaux résultats de cette partie du projet de recherche.

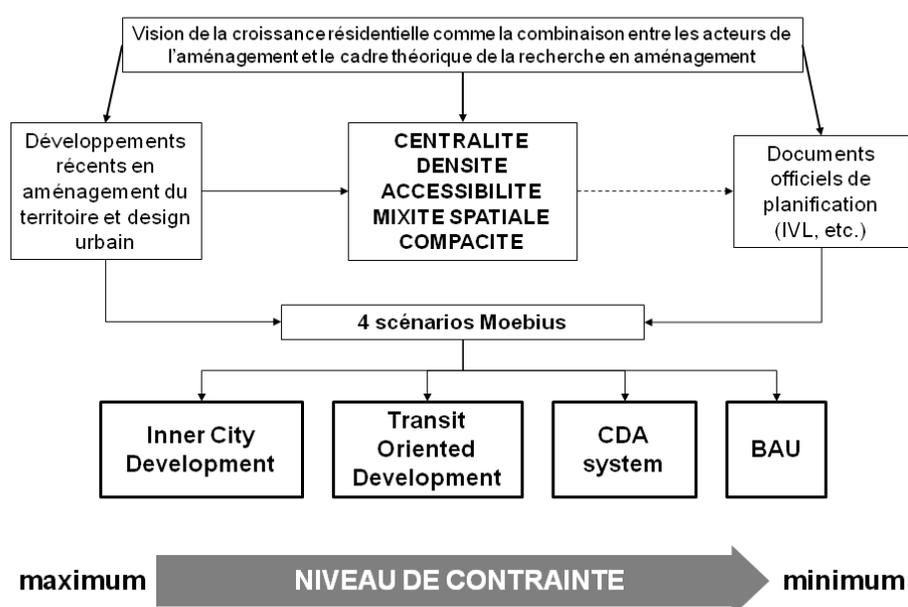


FIGURE 6.9 – Démarche de construction des scénarios de MOEBIUS, d'après Lord et al., 2011

2.1. Les 5 variables des scénarios MOEBIUS

En fonction de la littérature, cinq indicateurs ont été retenus pour construire les scénarios MOEBIUS : centralité, densité, accessibilité, mixité et compacité. Ils peuvent notamment faire l'objet d'une analogie avec ceux proposés par Cervero et Ewing (2010), lorsqu'ils abordent la question du développement urbain par rapport au choix des modes de transport ou au nombre de kilomètres parcourus.

1. Centralité

Le Programme Directeur a défini Luxembourg-Ville (et son agglomération), le Sud Minier et la Nordstad comme les 3 pôles économiques du pays. À ces trois zones urbaines s'ajoutent les communes prioritaires de l'IVL et celles des CDA. La typologie des communes permet de hiérarchiser les priorités d'urbanisation dans le but de redéfinir ou de renforcer le concept de centralité au Luxembourg.

2. Densité

La densité se définit ici comme le ratio entre un nombre de logements et une quantité de surface, facilement convertible en habitants par unité de surface. Dans l'IVL, la notion de densité est renvoyée aux plans régionaux et aux plans d'aménagement généraux. La densité est considérée ici comme un déterminant important de l'investissement public dans les transports en commun.

3. Accessibilité

L'accessibilité comprend ici un temps d'accès en transports en commun aux centres régionaux depuis les autres régions. Les centres considérés sont : Luxembourg-Ville et son agglomération, Esch-sur-Alzette et Diekirch/Ettelbruck, et des centres secondaires : Differdange, Steinfort, Wiltz, Echternach... Cette accessibilité prend en compte les infrastructures existantes pour éviter les relocalisations, tout en minimisant les temps de parcours.

4. Mixité

L'indicateur de mixité de l'occupation du sol se fonde sur la recherche d'une certaine hétérogénéité spatiale, telle que définie comme objectif d'aménagement au sein du Programme Directeur. L'occupation du sol est définie en 6 classes dans les PAG : zones d'activités (commerce + industrie), zones d'habitations, zones mixtes (commerces et habitations), zones de réserve (foncière), zones publiques (dédiées aux équipements et infrastructures) et les zones non constructibles. Les zones de réserve et les zones non constructibles ne sont pas intégrées au calcul de l'indicateur de mixité. Ce dernier se base sur un ratio entre les quatre autres catégories d'occupation du sol au sein des PAG.

5. Compacité

La compacité possède deux dimensions : la configuration géométrique et la composition de l'occupation du sol (niveau d'hétérogénéité). Dans le Programme Directeur, la compacité est généralement considérée (à tort) comme synonyme de la densité. La mesure de la compacité (au sens géométrique) se mesure ici pour chaque périmètre d'agglomération, qui délimite les Plans d'Aménagement Généraux. Un indice morphologique tiré de la littérature permet d'évaluer la compacité ou non des périmètres d'agglomération considérés.

2.2. Les scénarios de croissance résidentielle de MOEBIUS

2.2.1. Le scénario « Inner City Development »

L'objectif principal du scénario « Inner City Development » est de développer les centres urbains existants. Dans cette optique, l'essentiel du scénario repose sur les 3 pôles économiques du pays que présentés auparavant (mesure de la centralité). Le critère de densité vise à renforcer la construction au sein de ces 23 communes. D'un point de vue de l'accessibilité, seuls les espaces très bien desservis à destination des 3 pôles sont sélectionnés. Les communes ayant un fort taux de mixité de l'occupation du sol font l'objet d'une priorité au niveau de l'urbanisation, de même que celle possédant un périmètre d'agglomération très compact pour limiter les distances d'accès au centre.

2.2.2. Le scénario « TOD - MOEBIUS »

La finalité du scénario « TOD - MOEBIUS » consiste en une forte volonté d'optimiser le réseau de transport existant. De ce fait, l'ensemble des indicateurs se rapportent à la question des trans-

ports en commun. Du point de vue de la centralité, ne sont conservées que les communes ayant un bon accès en TC aux 3 pôles économiques. De même, les zones déjà denses tiennent compte de la desserte en transports en commun afin d'accentuer leur caractère prioritaire. L'accessibilité a pour but de renforcer l'accessibilité existante, à proximité des gares ferroviaires et des arrêts de bus. La mixité fonctionnelle doit elle aussi être élevée près de ces infrastructures. Enfin, un indicateur de compacité élevé permet d'accéder plus facilement aux transports en commun, par des distances plus courtes.

2.2.3. Le scénario « CDA system »

Le scénario « CDA system », pour système de Centre de Développement et d'Attraction, est une autre façon de renforcer les centralités luxembourgeoises (typologie des centres telle que définie dans le Programme Directeur). Derrière les 3 niveaux de CDA que comporte le document (supérieur, moyen et régional), on peut lire une volonté de *déconcentration concentrée*. Il s'agit à la fois de prolonger les hiérarchies existantes tout en assurant aux espaces ruraux l'accessibilité à des commerces ou des services. À terme, les CDA devraient accueillir certaines fonctions urbaines localisées pour l'instant à Luxembourg-Ville. Dans MOEBIUS, les cellules potentiellement urbanisables sont surtout sélectionnées si elles appartiennent à un CDA. Dans cette optique, une comparaison est possible avec les scénarios de modification du contexte global construits auparavant.

2.2.4. Le scénario « BAU »

Le scénario dit « BAU », pour Business As Usual, est le scénario du laissez-faire en matière de croissance résidentielle. C'est celui qui possède le moins de contraintes des quatre scénarios MOEBIUS, voir figure 6.9. L'urbanisation peut se faire au fil de l'eau, en fonction des besoins, dans l'ensemble des terrains disponibles du Luxembourg. Il forme donc une autre forme de référence, indiquant ce qu'il se passerait en l'absence d'interventionnisme dans la politique d'aménagement luxembourgeoise.

À l'heure actuelle, la disponibilité foncière³ au Luxembourg, toutes catégories confondues et sans priorisation temporelle (tous les terrains ne sont pas immédiatement mobilisables) est d'environ 6 000 hectares, ce qui représente un total de 150 000 cellules environ.

3. « Le potentiel foncier constructible théorique correspond à la surface totale des terrains disponibles, en se basant sur le statut réglementaire de la parcelle et non sur les dispositions du propriétaire à vendre ou à faire construire son terrain. » (Rapport Observatoire Habitat 2012)

2.3. Synthèse des résultats issus des scénarios MOEBIUS

Les résultats de la démarche de construction de scénarios dans le projet MOEBIUS sont présentés dans le tableau 6.10 (Gerber et al, 2013). Au premier abord, on constate que le nombre de cellules générées par les trois premiers scénarios est restreint, entre 6 et 13 000 cellules. En conservant des densités de construction équivalentes aux dynamiques actuelles, il n'y a que le scénario BAU qui permettrait de répondre aux objectifs de croissance résidentielle au Luxembourg pour 2030.

Dans le cadre de ce projet, les résultats obtenus ont ensuite été utilisés pour la suite de la démarche, qui comprend la localisation de la population synthétique (Cornélis et Barthélémy, 2012), la modélisation du choix modal (Omrani et al, 2014) et la simulation du trafic routier. Le modèle d'enchères utilisé (Caruso et Médard de Chardon, 2012) a permis de localiser l'ensemble de la population dans les potentiels obtenus, en accroissant de façon conséquente la densité de construction. Issus d'un croisement entre des objectifs d'aménagement, affichés dans le discours et les documents des politiques publiques et la littérature scientifique sur la question des formes urbaines, ces résultats peuvent être interprétés comme une inadéquation entre la volonté politique des personnes en charge de l'aménagement du Grand-Duché et les travaux de recherche menés depuis quelques années sur le sujet (Lord et al, 2015).

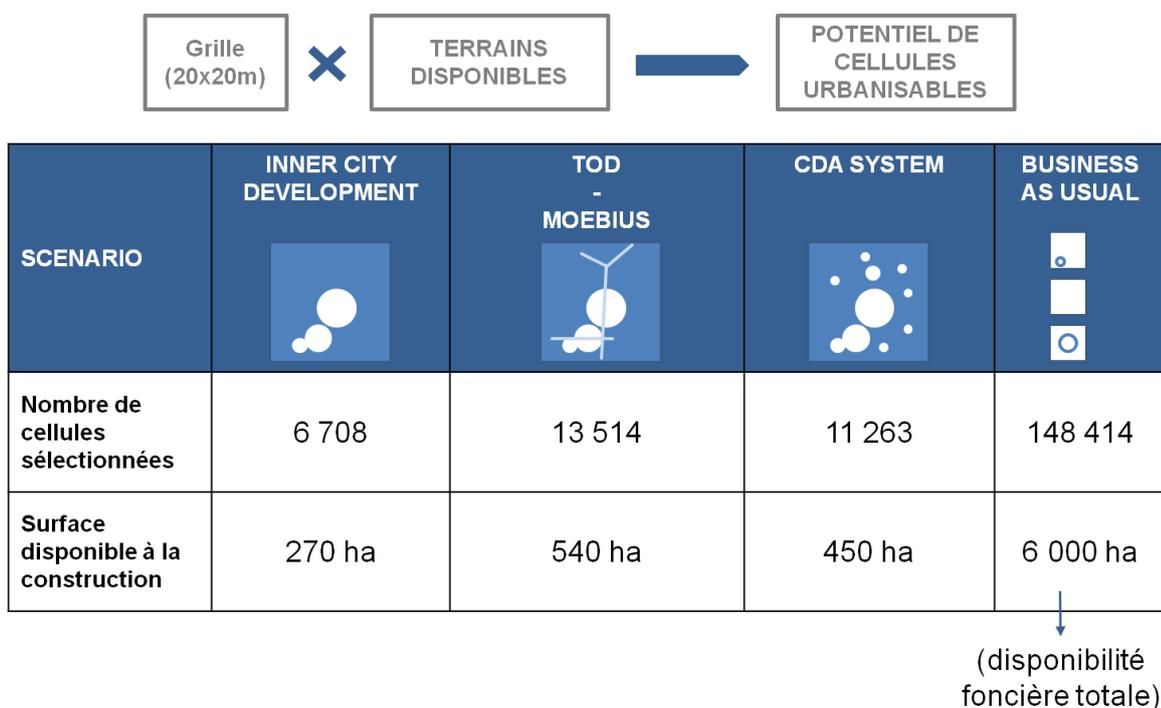


FIGURE 6.10 – Synthèse des résultats des scénarios de MOEBIUS, 2013

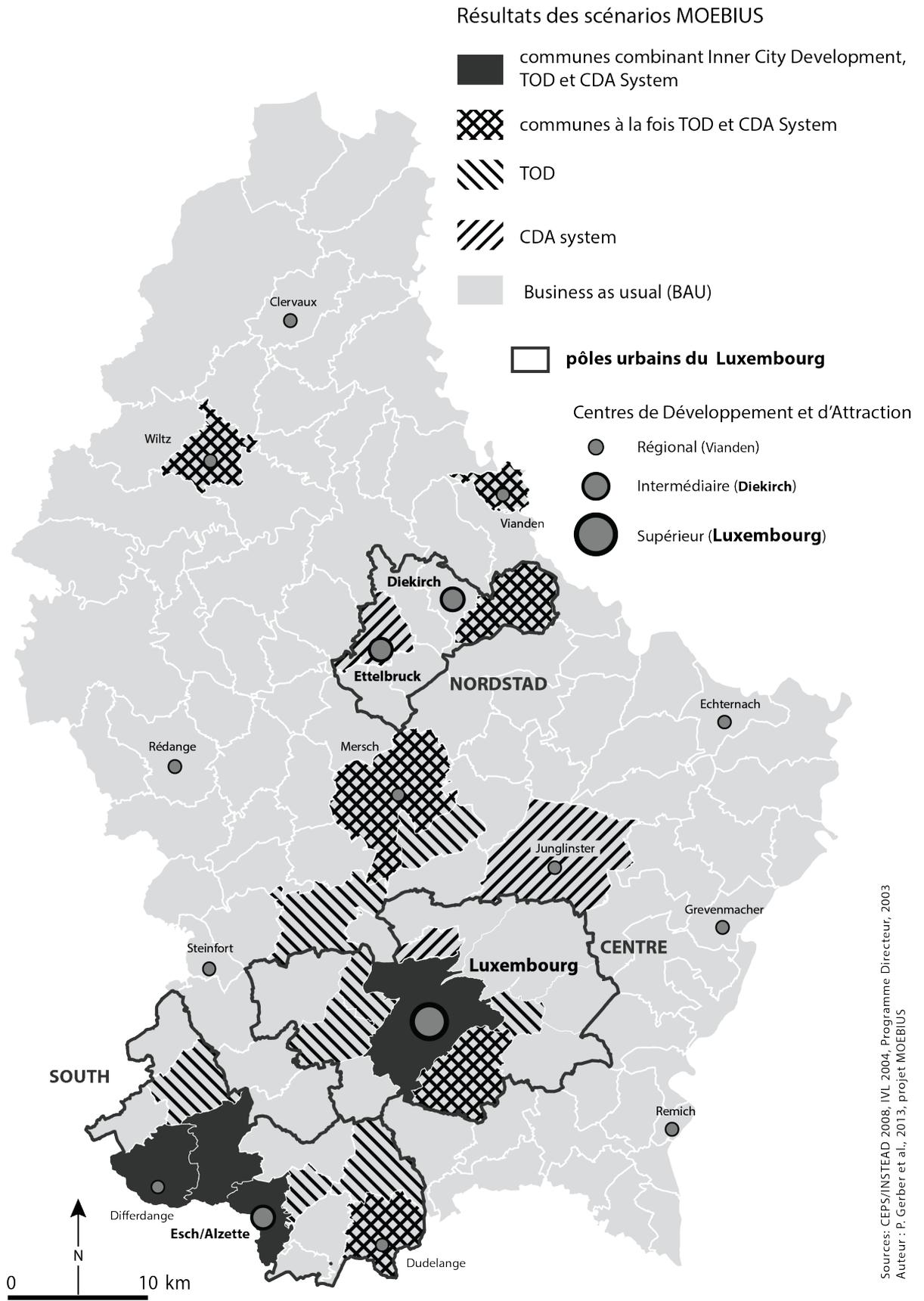


FIGURE 6.11 – Carte de synthèse des résultats des scénarios de MOEBIUS, 2013

3. Conclusion du chapitre 6

Ce sixième chapitre n'est rien de moins que l'élément central de la démarche de recherche. L'obtention de ces premiers résultats apporte une réponse concrète à l'un de nos questionnements, à savoir la construction de scénarios réalistes de croissance résidentielle au Luxembourg à l'aide d'une plateforme de simulation. Avec une sélection restreinte de critères, et leur modification progressive par essais successifs, il est possible d'obtenir des scénarios très contrastés qui répondent à des normes d'aménagement différentes. Nous avons également confirmé l'importance des données utilisées, que ce soit dans le cadre du FOD, des typologies de communes à l'origine des formes urbaines globales, ou encore des critères de restrictions, comme les zones non urbanisables ou les terrains disponibles.

Le tableau 6.14 présente une synthèse des principaux résultats obtenus. Un premier point de comparaison existe entre les scénarios au niveau de la surface à urbaniser et dépendant du nombre de cellules potentiellement urbanisables qui ont été simulées. En revenant sur les principaux leviers de ces écarts de surface urbanisée, comme expliqué dans le chapitre 2 sur le Luxembourg, la surface disponible théoriquement est de 5 512 hectares en 2010, dont 2 701 hectares pour l'urbanisation (en comptant 75% des zones mixtes). Le scénario IVL, qui constitue pourtant notre référence parce qu'il représente une forme de prolongement de tendances (en tous cas, une application des normes souhaitées), conduit à l'urbanisation de 4 801 hectares, soit près du double du foncier théoriquement disponible. À l'inverse, l'application du modèle fractal dans les terrains disponibles, au travers du scénario dit de la disponibilité foncière, permet de diminuer cette surface consommée de plus de 80%. Pour cela, il faudrait une densité résidentielle de 150 logements par hectare soit, comme évoqué dans le chapitre 3 et à l'aide des travaux de l'AUCAME, des immeubles de cinq ou six étages. La plus grande consommation foncière est atteinte avec le scénario basé sur une répartition des constructions dans les 116 communes, en considérant une densité de 18 logements à l'hectare, soit la densité résidentielle actuellement observée au Luxembourg. Logiquement, le scénario de la densité permet de diminuer assez fortement la consommation foncière, alors que les règles de densité ont été à peine doublées, avec un maximum de 60 logements par hectare dans les communes prioritaires. Ce seuil de 60 logements par hectare représente, d'après les travaux de l'AUCAME, des maisons de villes ou des maisons en bandes, tel qu'il est possible d'en trouver actuellement au Grand-Duché. Le scénario FOD, quant à lui, amène une diminution de 75% de la surface consommée ; en construisant à moins de 1 000 mètres des gares et à l'aide d'une densité résidentielle de 80 logements par hectare, la consommation foncière représente 1 083 hectares, soit à peine plus du tiers de la surface théoriquement disponible. Les scénarios de variations de projections démographiques ont pour objectif

de souligner les conséquences spatiales d'un changement de projection par rapport au scénario IVL de référence. Dans le cas d'une augmentation de l'ordre de 6 000 résidents supplémentaires, la consommation foncière augmenterait de 5%. Au contraire, les projections basses, si elles venaient à se réaliser, permettraient une diminution de 30% de la consommation foncière.

Sur le plan spatial, la répartition des cellules potentiellement urbanisables correspond globalement aux tendances en vigueur au Luxembourg. À l'issue des scénarios, une différenciation spatiale subsiste à l'échelle communale (voir figure 6.12). Les communes les plus souvent représentées dans les scénarios, c'est-à-dire où le plus de cellules sont générées, sont celles d'une large moitié sud du pays, qui comprend l'agglomération de la capitale Luxembourg-Ville. On retrouve également quelques communes centrales du pays, comme les centres de Wiltz, Rédange, l'agglomération de la Nordstad (Diekirch et Ettelbruck) ou Steinfort. La plupart des communes prioritaires de l'IVL sont également bien représentées, mais au regard de la construction des scénarios, ce résultat était attendu. Quelques centres (CDA régionaux) possèdent un potentiel d'urbanisation limité, comme Clervaux, Vianden, Echternach ou Remich. Pourtant plus petite que Clervaux, mais probablement mieux pourvue en aménités, la commune de Troisvierges, à l'extrémité nord du pays, semble constituer selon les scénarios projetés une nouvelle centralité septentrionale. Cinq communes ne font l'objet d'aucune croissance résidentielle : Eschweiler (au nord de Wiltz), Neunhausen et Heiderscheid (à l'ouest de la Nordstad), Septfontaines (entre Mersch et Steinfort) et Bech (entre Junglister et Echternach). Les communes du Lac-de-la-Haute-Sûre (au sud de Wiltz), Putscheid (au nord de Vianden), Ermsdorf (à côté de Diekirch) et Flaxweiler (au sud de Grevenmacher) peuvent être ajoutées à cette liste puisqu'elles totalisent moins de vingt cellules potentiellement urbanisables sur nos huit scénarios. La petite taille de ces communes et leur faible équipement explique en grande partie ce résultat. Ces espaces ont aussi été écartés par le modèle fractal d'urbanisation à un niveau d'échelle plus important.

Outre le nombre de cellules sélectionnées et les représentations cartographiques adoptées, on constate que l'analyse et la comparaison des scénarios entre eux de façon systématique n'est pas chose aisée à une échelle fine. Il y aurait probablement d'autres pistes à explorer. L'utilisation du logiciel *Map Comparison Kit* (MCK), développée par l'équipe du RIKS aux Pays-Bas a été envisagée. Malheureusement, le format de données et surtout les formes de développement résidentiel simulées ne semblent pas compatibles avec une application destinée à comparer des cartes d'occupation du sol issues d'automates cellulaires plus classiques. Il n'en demeure pas moins que les indicateurs d'accessibilité spatiale, et les indicateurs de mobilité quotidienne, qui font l'objet de la troisième partie de la thèse constituent un moyen de comparaison des scénarios précédemment simulés.

Scénario	Règles importantes	Densité (log/ha)	Nombre de cellules à urbaniser	Surface à urbaniser (en ha)
IVL	80% dans les communes prioritaires	35 (prioritaires) et 18 (complémentaires)	120 027	4 801
FOD	1 000m des gares et accès au TC	80	27 085	1 083
Projection hautes	+ 6 100 résidents	35 (prioritaires) et 18 (complémentaires)	125 670	5 028
Projections basses	- 37 901 résidents	35 (prioritaires) et 18 (complémentaires)	84 969	3 399
Densité élevée	augmenter la densité de construction	60 (prioritaires) et 35 (complémentaires)	64 166	2 567
116 communes	Pas de hiérarchie au niveau global	18	178 419	7 137
23 communes	urbanisation dans les 3 pôles urbains	42	78 105	3 124
Disponibilité foncière	urbanisation dans les terrains disponibles	151	21 465	858
Inner-City Development (MOEBIUS)	urbanisation dans les 3 pôles urbains	<i>non calculée</i>	6 708	270
TOD (MOEBIUS)	urbanisation près des infrastructures de transports en commun	<i>non calculée</i>	13 514	540
CDA system (MOEBIUS)	urbanisation dans les 15 CDA	<i>non calculée</i>	11 263	450
BAU (MOEBIUS)	pas de règle	<i>non calculée</i>	148 414	5 937

Tableau 6.14 – Principales caractéristiques des scénarios simulés

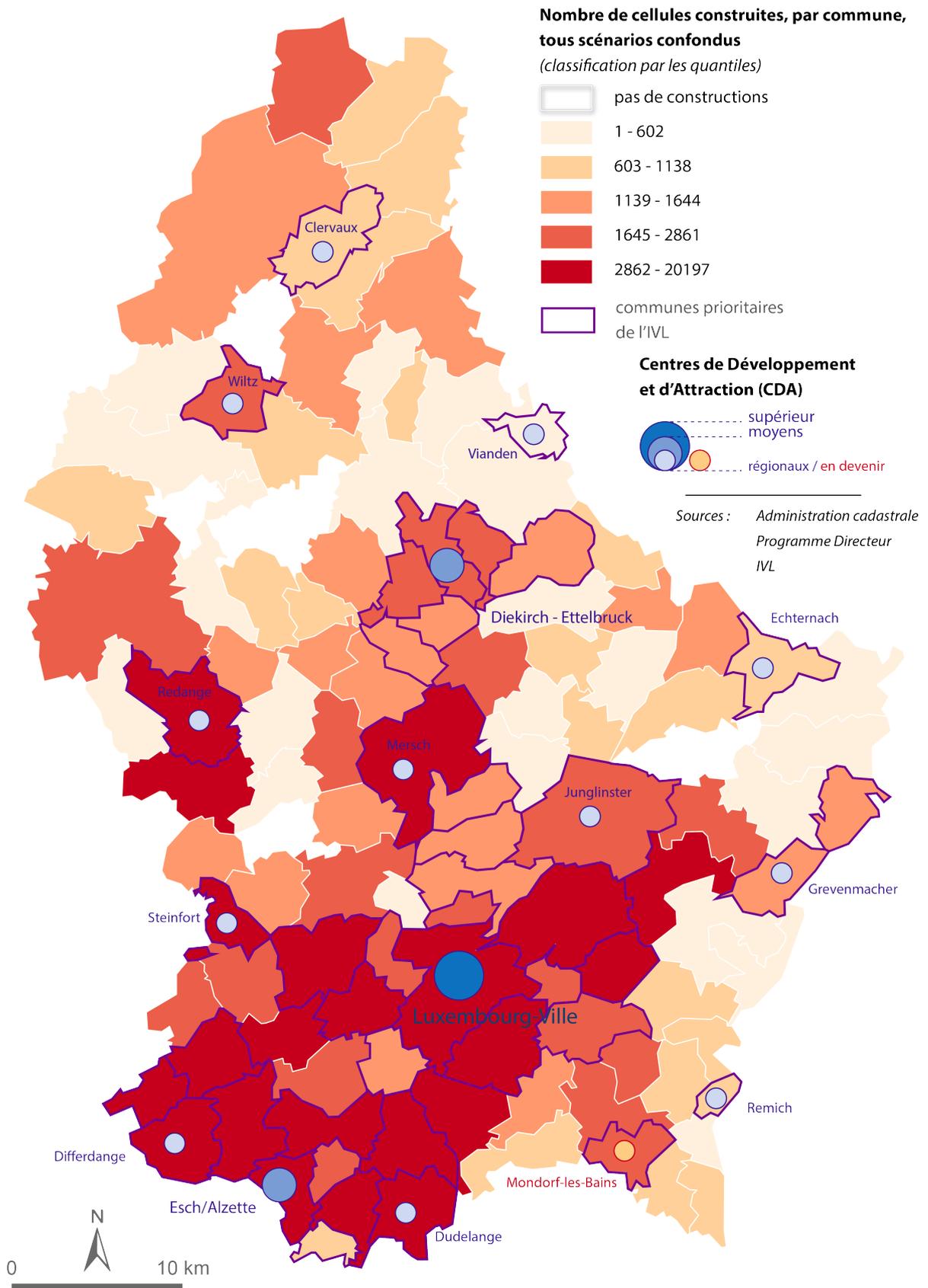


FIGURE 6.12 – Répartition communale des cellules générées dans les scénarios au Luxembourg en 2030

Conclusion de la deuxième partie

LA DEUXIÈME partie de cette thèse était consacrée à la simulation de scénarios de croissance urbaine. Nous avons vu, au cours des trois chapitres qui la composent, comment modéliser ces extensions futures du tissu urbain. La démarche a été présentée, ainsi que les outils à disposition, les données disponibles et les résultats sous forme de scénarios de développement résidentiel simulés.

C'est la première fois que MUP-City est appliqué à un cas d'étude tel que le Luxembourg. Ceci a nécessité de nouveaux développements concernant cette plateforme. Hormis les quatre règles d'accessibilité de la version précédente (0.8), il est désormais possible d'évaluer l'accessibilité aux aménités urbaines centrales, aux aménités vertes et de loisirs, et aux infrastructures en commun. La multiplication des règles (10 au total) a conduit un changement de méthode dans l'agrégation des valeurs en une valeur synthétique. La moyenne arithmétique des valeurs de chaque règle aurait été insuffisante et aurait « dilué » les évaluations particulières. Avec l'introduction des comparaisons par paires et de l'opérateur de Yager, une nouvelle possibilité de formalisation des règles d'aménagement est possible. Si, pour des raisons de temps et des questions d'ordre méthodologique, peu de combinaisons ont été testées, il est indéniable que cette méthode apporte davantage de subtilité dans la construction des scénarios.

Par ailleurs, la constitution du corpus de données n'a pas été chose aisée. En l'absence de base de données exhaustives concernant les activités (comme le fichier SIRENE en France), des extractions d'annuaire numérique ont été menées pour créer la base de données des aménités (commerces, services, loisirs) au Luxembourg. Ces dernières sont parfois mal renseignées au niveau des adresses et, de plus, les typologies utilisées pour les rubriques n'étaient pas toujours en adéquation avec les niveaux de recours potentiels souhaités. En outre, la base de données pour les aménités vertes semble elle aussi incomplète, surtout en ce qui concerne le premier niveau de recours. Les résultats de simulation obtenus n'en demeurent pas moins suffisamment réalistes.

Les résultats des premiers tests de sensibilité du modèle montrent clairement la difficulté de transposer des normes d'aménagement en règles sans remettre en cause les normes elles-mêmes. Ces tests illustrent aussi l'importance de disposer de projections démographiques fiables et sur le long terme. En cela, les travaux menés par le STATEC ont évité d'éventuels prolongements de tendances plus ou moins hasardeux.

La conclusion du chapitre 6 fait état de différences nettes entre les scénarios, tant sur le plan quantitatif de la consommation foncière que de la localisation spatiale de ces possibles extensions. Les règles d'aménagement, traduction des normes dans le modèle de simulation, constituent la source de ces divergences. À l'aide d'un paramètre, il est possible de faire varier les résultats du simple au double, voire au triple. En appliquant à l'échelle nationale des règles d'aménagement strictes (avec des seuils de distance identifiés précisément) et finalement peu nombreuses (une dizaine de règles en tout), la contrainte apportée au modèle d'urbanisation est réelle.

Les résultats obtenus dans le cadre du scénario FOD peuvent être rapprochés de ceux obtenus par Fertner *et al.* (2011) et leurs simulations de différents scénarios urbains pour l'agglomération de Copenhague. Les auteurs ont découvert, pour le cas danois, une urbanisation potentielle de 15% à 23% à proximité (moins de 1 200 mètres) des gares ferroviaires. Avec 20% (1 083 hectares comparés aux 4 801 de l'IVL) de terrains urbanisables dans le cadre du scénarios FOD, la proximité est assez frappante. Sans nul doute, un des leviers d'action majoritaires dans la diminutions des surfaces consommées réside dans l'articulation entre forme locale et forme globale du développement résidentiel. Ce constat prolonge les conclusions établies par Bengston *et al.* (2004) qui prônent, à l'aide de l'exemple des États-Unis, pour une meilleure coordination des politiques locales et des politiques fédérales en matière d'aménagement du territoire, et notamment de la croissance résidentielle.

Dans la troisième partie, la comparaison de ces scénarios, d'abord en matière d'accessibilité spatiale, puis à l'aide d'indicateurs de mobilité quotidienne, devrait apporter un éclairage supplémentaire à notre question de recherche qui concerne notamment la mesure du lien entre forme urbaine et fonctionnement de la ville. Les différences morphologiques (locales mais surtout globales) entre nos scénarios expliqueront probablement les différences dans les résultats de simulation d'une partie du fonctionnement urbain, les mobilités quotidiennes. Dès lors, il sera possible de quantifier le lien entre la forme urbaine et son fonctionnement.

**TROISIÈME PARTIE : COMPARAISON ET
ÉVALUATION DES SCÉNARIOS DE
CROISSANCE RÉSIDENTIELLE**

Introduction de la troisième partie

IL EXISTE une certaine difficulté dans le fait d'appréhender simultanément le puzzle constitué par les formes urbaines, les comportements de déplacement, et la localisation résidentielle (Handy, 1996 ; Crane et Crepeau, 1998 ; Krizek, 2003). Ce fait, évoqué lors de l'introduction générale, fait partie de notre questionnement. Cette troisième partie a pour objectif principal de mesurer les conséquences spatiales des scénarios de développement résidentiel et ainsi de permettre des comparaisons. La méthodologie adoptée comporte deux étapes : i) la mesure d'indicateurs d'accessibilité spatiale à différentes aménités ; ii) la simulation des mobilités quotidiennes à l'aide de la plateforme MobiSim afin d'évaluer, à l'aide d'une approche individu-centrée, le fonctionnement potentiel des scénarios.

Le premier chapitre de cette troisième partie sera consacré à l'analyse d'indicateurs d'accessibilité spatiale mesurés avec MUP-City pour la situation initiale en 2010 et pour chacun des scénarios en 2030. Ce qui nous intéresse est de vérifier s'il existe des contrastes locaux liés à la localisation différenciée de la croissance résidentielle, en fonction des scénarios. En distinguant la situation initiale des scénarios, il est possible de quantifier l'apport des scénarios à l'évolution de l'offre spatiale en aménités variées (commerces, services, espaces verts et de loisirs ou transports en commun). Aussi, l'échelle fine des calculs d'accessibilité⁴ permet d'éviter l'écueil de l'agrégation tel que décrit par Krizek (2003). De nombreux travaux, notamment aux États-Unis, sont basés sur les unités de recensement, les zones de codes postaux ou les zones d'analyses des transports (*transportation analysis zones, TAZs*). Or, ces zones sont généralement très grandes (plus de 3 kilomètres de côté), contiennent jusqu'à plusieurs milliers de ménages et ne permettent pas d'avoir une certaine finesse dans l'analyse des différences d'accessibilité ; cela peut d'avérer hasardeux, notamment dans le cas des modes doux où les distances restent relativement courtes.

Comme l'a suggéré Handy (1993), il faut tenir compte à la fois du voisinage immédiat des espaces résidentiels, autrement dit de l'accessibilité spatiale, et de l'inscription de ce voisinage dans

4. Tout comme les scénarios, les mesures d'accessibilité sont calculées à une résolution de 20x20 mètres

une zone urbaine plus large, ce qui est conforme avec le caractère multi-échelles des formes urbaines. Les facteurs qui font varier l'accessibilité sont nombreux (Geurs et van Wee, 2004 ; Crozet *et al.*, 2012) : demande de transport, réseaux, coûts, connectivité... L'accessibilité peut être mesurée de nombreuses manières qui font l'objet de discussions au sein de la communauté scientifique (Geurs et van Wee, 2004 ; Handy, 2005a), tant sur le plan des concepts qu'elle mobilise que des méthodes employées. Nous considérons ici l'accessibilité comme un révélateur du fonctionnement urbain, la mobilité quotidienne (Gutiérrez *et al.*, 2010) et constitue donc une conséquence de la forme urbaine. De fait, les mesures d'accessibilité forment une réponse concrète pour les aménageurs dans l'évaluation des formes urbaines et, plus largement, dans le domaine de la planification (Levinson, 1998).

Salze *et al.* (2011) rappellent que les indicateurs d'accessibilité spatiales « classiques » sont relativement limités et il peut être nécessaire d'adopter une approche plus désagrégée (avec les questions que cela suppose) afin de prendre davantage en considération les comportements individuels. En effet, l'accessibilité peut se considérer selon deux approches.

La première se concentre sur la dimension spatiale, et donc la localisation des origines et d'une ou plusieurs destinations. L'accessibilité peut comprendre la distance métrique entre une personne (ou un lieu) et une destination ou la distance entre une personne (ou un lieu) et l'utilité de plusieurs destinations (Koenig, 1980). De façon générale, l'accessibilité peut être définie comme la facilité relative que des individus ont à atteindre des lieux ou des activités (Morris *et al.*, 1976 ; Lotfi et Koohsari, 2009). L'accessibilité spatiale, ou *place-based accessibility* (Neutens *et al.*, 2010), permet de mesurer la proximité d'un certain nombre d'aménités aux lieux fréquentés par les individus comme leur résidence ou leur lieu de travail (Miller *et al.*, 2012).

La deuxième approche de l'accessibilité consiste à ajouter une dimension temporelle à l'accessibilité spatiale (Kwan, 1998 ; Geurs et van Wee, 2004), ce qui permet d'intégrer des horaires de départ à l'origine et ainsi de définir des chaînes d'activités. Cette dimension temporelle est prise en compte à l'aide des horaires de passages des transports en commun ou la prise en compte de la congestion sur le réseau routier. Ces éléments permettent ainsi de définir des temps de trajets et des choix modaux, et ainsi de mesurer le degré de liberté des individus à pratiquer des activités en fonction de contraintes spatio-temporelles. On retrouve dans cette définition la notion d'opportunité en fonction d'un certain temps ou d'un coût de transport (Hansen, 1959).

C'est pourquoi le deuxième chapitre de cette troisième partie décrira la simulation des mobilités quotidiennes, toujours pour la situation initiale en 2010 et pour une sélection de scénarios. À l'aide d'une population synthétique localisée spatialement dans les espaces de développement résidentiel, nous espérons observer des différences entre les scénarios afin d'affiner la réflexion sur le lien entre forme urbaine et fonctionnement. Les hypothèses à l'origine de la définition des normes d'aménagements prises en compte dans la construction des scénarios seront-elles confirmées ?

Chapitre 7

Comparaison des scénarios à l'aide d'indicateurs d'accessibilité spatiale

« *L'espace c'est ce qui empêche que tout soit à la même place.* »

Paul Virilio

A PRÈS quelques rappels sur la notion d'accessibilité, ce chapitre sera consacré à la présentation des résultats des mesures d'accessibilité *ex-post* obtenues à l'aide de MUP-City pour chaque scénario de développement résidentiel. Par la suite, une partie de ces résultats feront l'objet d'une comparaison avec les résultats obtenus pour les scénarios issus du projet MOEBIUS.

1. L'accessibilité spatiale pour comparer les scénarios de croissance résidentielle

Dans la version utilisée de MUP-City, il existe 16 indicateurs d'accessibilité spatiale *ex-post*. Ces indicateurs ont déjà été employés dans de nombreux travaux (Koenig, 1980 ; Arentze *et al.*, 1994 ; Kwan, 1998 ; Hewko *et al.*, 2002 ; Tsou *et al.*, 2005 ; Boone *et al.*, 2009). On peut les rassembler en trois groupes principaux :

- la distance à l'aménité la plus proche, quelque soit le type pour une même fréquence de recours,
- le nombre d'aménités que l'on peut atteindre en une distance (ou un temps) donnée,
- la distance minimale pour accéder à l'ensemble des aménités de même fréquence de recours les plus proches.

Ces indicateurs ne sont pas calculés de la même manière que dans le cadre des évaluations *ex-ante* lors de l'étape de simulation des scénarios de développement résidentiel, ils ne doivent donc pas être confondus.

La distance à l'aménité la plus proche peut être vue comme une forme « d'accessibilité relative », telle que développée par Ingram dès 1971. Elle représente l'une des mesures d'accessibilité les plus simples, en exprimant le degré de connectivité de deux points situés sur un même plan (Geurs et van Wee, 2004).

Le nombre moyen d'aménités dans le voisinage d'une cellule représente l'offre potentielle (Apparicio et Séguin, 2006). Le nombre d'aménités dans un voisinage donné est calculé ici selon une approche locale uniquement en considérant des distances en marche à pied ou en vélo. Les modes doux sont en effet à privilégier dans la fréquentation des commerces ou services de proximité (Aultman, 1997). De plus, la pratique régulière de la marche à pied et du vélo a un impact positif sur la santé, en prévision du surpoids, de l'obésité ou des maladies cardio-vasculaires (Handy, 2005a).

La troisième famille d'indicateurs, calculant la distance minimale d'accessibilité à l'ensemble des commerces et services et aménités vertes ou de loisirs d'une même fréquence de recours, combine la notion de proximité et la diversité de l'offre en commerces et services.

Dans le cadre du calcul de la distance minimale à l'aménité la plus proche, les évaluations locales traduisent les aires de chalandises (Gasnier, 2007). Des effets de voisinages sont également à prévoir. Par exemple, si une cellule possède une bonne évaluation du nombre de commerces et services de fréquentation quotidienne à moins de 1000 mètres, il est plus que probable que sa voisine ait une évaluation proche de celle-ci. On obtient donc un effet d'auto-corrélation spatiale, avec une homogénéisation locale des valeurs (Neutens *et al.*, 2010).

Pour autant, une bonne évaluation locale pour un indicateur donné n'entraîne pas forcément une bonne évaluation pour d'autres indicateurs. Comme le souligne Srinivasan et Ferreira (2002), les résultats d'accessibilité peuvent différer selon la localisation résidentielle. Une zone avec une bonne accessibilité aux transports en commun en marche à pied peut avoir une moins bonne accessibilité en voiture.

Le calcul des indicateurs a été effectué pour les 8 scénarios¹ et la situation initiale. Dans le cas des scénarios, seules les nouvelles cellules potentiellement urbanisables ont été prises en compte. Comme dans le cadre des évaluations ex-ante, les mesures de distances et de voisinages ont été réalisées sur un réseau détaillé, comprenant également les chemins et sentiers (pour préciser les calculs en marche à pied notamment). Au regard du grand nombre de résultats obtenus, il n'était pas forcément opportun de représenter par des cartes l'ensemble des indicateurs pour tous les scénarios. Nous avons donc dans un premier temps décidé de regarder les distributions des séries statistiques. Afin de comparer visuellement nos différents scénarios, l'utilisation des boîtes de dispersion (ou *boxplots*) a été employée. Cette méthode de représentation permet de visualiser sur un même support l'amplitude de la distribution ainsi que les principales variables descriptives : quartiles, médiane, moyenne. La comparaison des scénarios pour un même indicateur s'effectue d'abord du point de vue de la médiane (éventuellement aidée de la moyenne), de la position des deuxièmes et troisièmes quartiles et enfin de l'amplitude de la distribution à l'aide des premiers quartiles. La position de chaque scénario est indiquée pour chaque indicateur et servira de base au calcul du classement des scénarios par types d'indicateurs.

Dans le cadre d'une simulation des extensions résidentielles, une baisse générale de l'accessibilité aux aménités fait partie des résultats attendus, d'autant que l'augmentation du nombre d'aménités n'est pas simulée.

Ainsi, nous reprenons les trois principaux types d'indicateurs d'accessibilité évoqués précédemment pour envisager l'organisation de la section suivante, à savoir : la distance à l'aménité la plus proche, le nombre d'aménités dans un voisinage donné et la distance moyenne d'accessibilité à chaque type d'aménité d'une même fréquence de recours.

1.1. La distance de chaque cellule potentiellement urbanisable à l'aménité la plus proche

Les résultats qui suivent sont présentées pour le bâti déjà existant en ce concerne la situation initiale en 2010 et pour les cellules potentiellement urbanisables des scénarios de développement résidentiel en 2030.

1. Pour rappel : IVL, FOD, densité, disponibilité foncière, 116 communes, 23 communes et variations des projections démographiques selon des hypothèses hautes et basses

1.1.1. Le commerce ou service de fréquentation quotidienne le plus proche

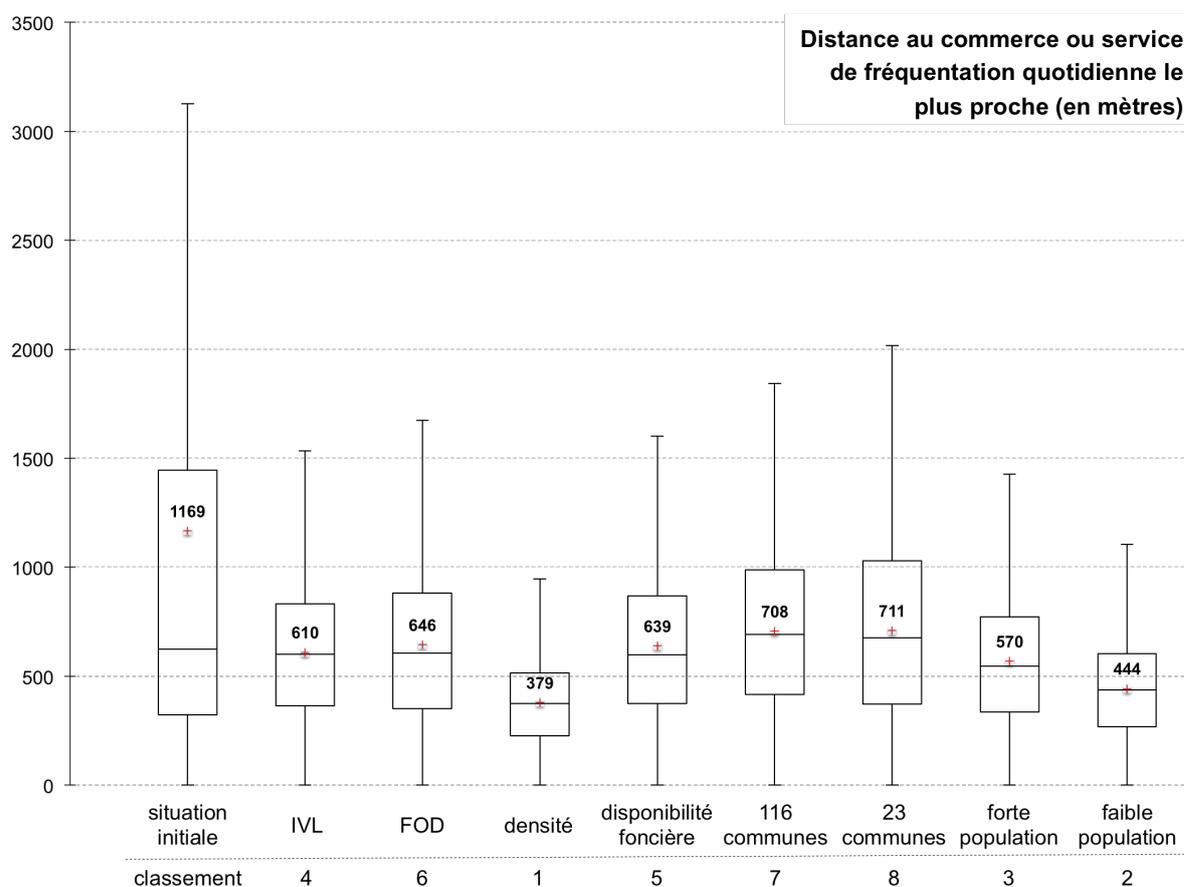


FIGURE 7.1 – Distributions statistiques des valeurs d'évaluation de l'accessibilité au commerce ou service de fréquentation quotidienne, pour la situation initiale en 2010 et chaque scénario en 2030

Au regard des distributions statistiques des valeurs d'évaluations des cellules potentiellement urbanisables de chaque scénario, on peut constater une diminution de la distance au plus proche commerce et service de fréquentation quotidienne par rapport à la situation initiale. Alors qu'il faut en moyenne plus de 1 000 mètres et jusqu'à plus de 3 000 mètres (dernier quartile) en 2010 pour atteindre ce niveau d'aménité, le scénario densité permet de ramener cette distance moyenne à moins de 400 mètres (la proximité de la médiane et de la moyenne traduisent une certaine homogénéité de la distribution), tandis que les cellules les plus éloignées le seront d'environ 2 000 mètres (dernier quartile), pour le scénario reposant sur les 23 communes les plus centrales. Le scénario de la densité présente la distribution la plus resserrée de ses valeurs avec 75% des valeurs de distances inférieures à 1 000 mètres.

Pour les scénarios plus diffus spatialement, comme celui des 116 communes, les résultats obtenus sont également satisfaisants. Les commerces et services de fréquentation quotidienne qui sont bien dispersés sur l'ensemble du territoire luxembourgeois et l'utilisation de la règle d'accessibilité

à ces aménités dans la construction de nos scénarios expliquent ces bons résultats. Pour rappel, la seuil adoptée dans la simulation des scénarios est de 1 000 mètres, 500 mètres étant déjà considérés comme une distance acceptable. Hormis les scénarios 116 et 23 communes dont le dernier quartile se situe au delà de 1 000 mètres, la plupart des scénarios sont bien évalués au regard des règles d'aménagement appliquées.

1.1.2. Le commerce ou service de fréquentation hebdomadaire le plus proche

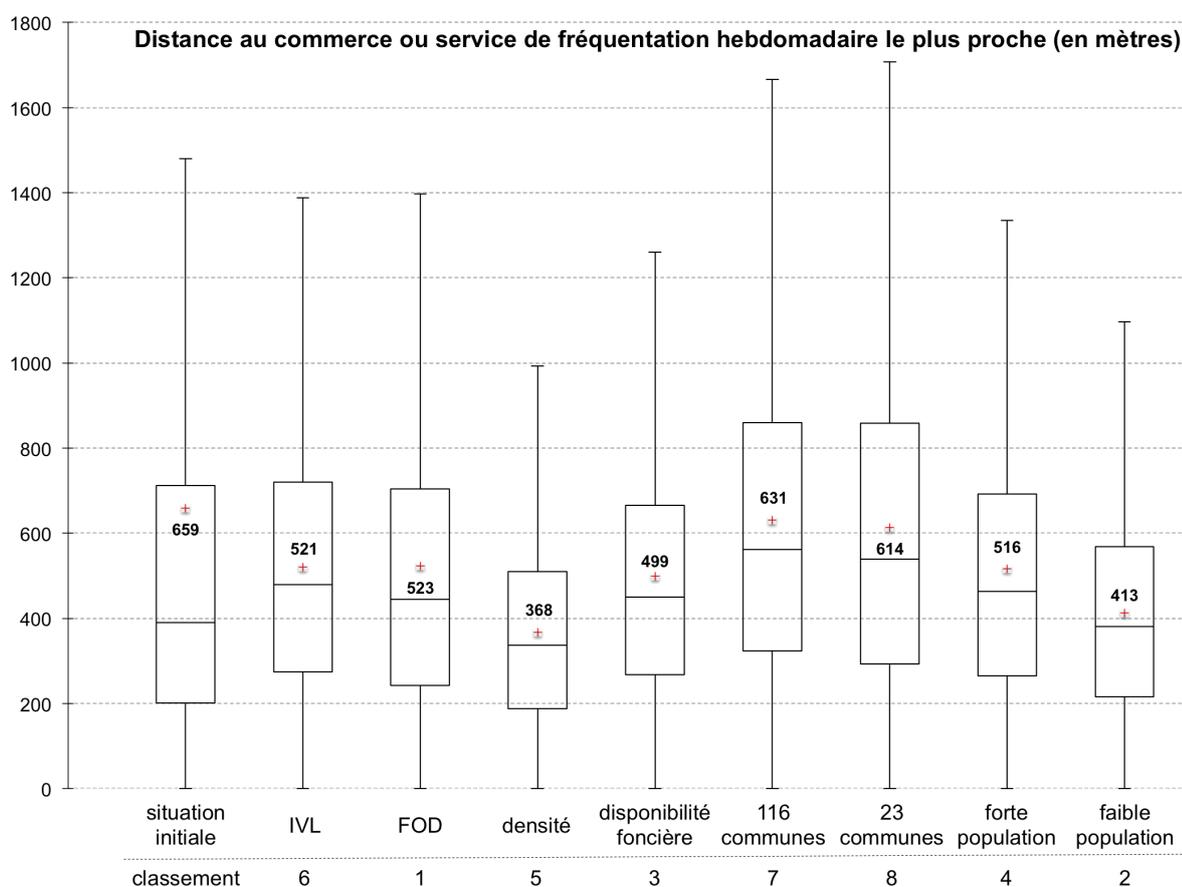


FIGURE 7.2 – Distributions statistiques des valeurs d'évaluation de l'accessibilité au commerce ou service de fréquentation hebdomadaire le plus proche, pour la situation initiale en 2010 et chaque scénario en 2030

Il est intéressant de noter que pour la situation initiale, la distance mesurée pour cet indicateur est inférieure à la mesure de la distance au commerce et service de fréquentation quotidienne. Comme il l'a été souligné dans les évaluations *ex-ante*, le Grand-Duché est bien pourvu et donc bien évalué en ce qui concerne l'accessibilité aux commerces et service de fréquentation hebdomadaire et ces aménités sont localisées de façon centrale par rapport au bâti existant. C'est pourquoi dans les scénarios plus diffus localement (116 et 23 communes, par exemple), l'amélioration de l'acces-

sibilité à ces aménités est moindre par rapport à la situation initiale.

C'est encore une fois le scénario dense qui permet d'améliorer l'accessibilité aux commerces et services de fréquentation hebdomadaire. La distance moyenne est presque deux fois inférieure à la distance calculée pour la situation initiale, les deux médianes étant toutefois assez proches. Les principales variations apparaissent dans les valeurs élevées (derniers quartiles), les valeurs obtenues étant plus resserrées dans le scénario densité.

Dans le cas des autres scénarios, la situation est davantage contrastée. Pour l'urbanisation prenant place dans les 23 communes centrales, bien que la moyenne soit également inférieure à la situation initiale, la médiane est bien plus élevée et la distribution des valeurs plus étendue. C'est aussi le cas pour le scénario des 116 communes. Par ailleurs, on ne constate que très peu de différences statistiques entre les scénarios IVL, FOD et celui impliquant une hypothèse de forte croissance démographique. Même si l'amélioration de la situation initiale est moins nette que pour l'indicateur précédent, la règle de distance pour le commerce ou service le plus proche est de 2 000 mètres, soit supérieure aux valeurs obtenues avec cet indicateur.

1.1.3. L'aménité verte ou de loisirs de fréquentation quotidienne la plus proche

Comme cela a déjà été constaté dans les parties précédentes, le Luxembourg ne bénéficie pas d'une très bonne accessibilité aux parcs et jardins. On peut noter sur la figure 7.3 que les distances d'accessibilité mesurées sont parfois très élevées avec des valeurs atteignant les 8 000 mètres pour la situation initiale. En général, les scénarios tendent à abaisser ces distances, sauf dans le cas d'une urbanisation diffuse sur les 116 communes où la distance moyenne augmente ainsi que l'amplitude de la distribution. La règle considérée dans la partie précédente pour les aménités vertes ou de loisirs de fréquentation quotidienne est de 1 000 mètres maximum. Les scénarios FOD, densité, disponibilité foncière et 23 communes ont environ 50% de leur potentiel de croissance résidentiel qui permet de répondre à cette règle. À l'inverse, dans le cadre d'une urbanisation plus concentrée, pour les 23 communes ou dans les zones actuellement disponibles, la moyenne est inférieure à 1 500 mètres et 75% des valeurs d'évaluations sont inférieures à 4 000 mètres. Si ces distances sont peu susceptibles d'être parcourues de façon quotidienne en marche à pied², l'emploi du vélo permet d'améliorer l'accessibilité au parc le plus proche.

2. Cf : les seuils d'acceptabilité des distances en marche à pied

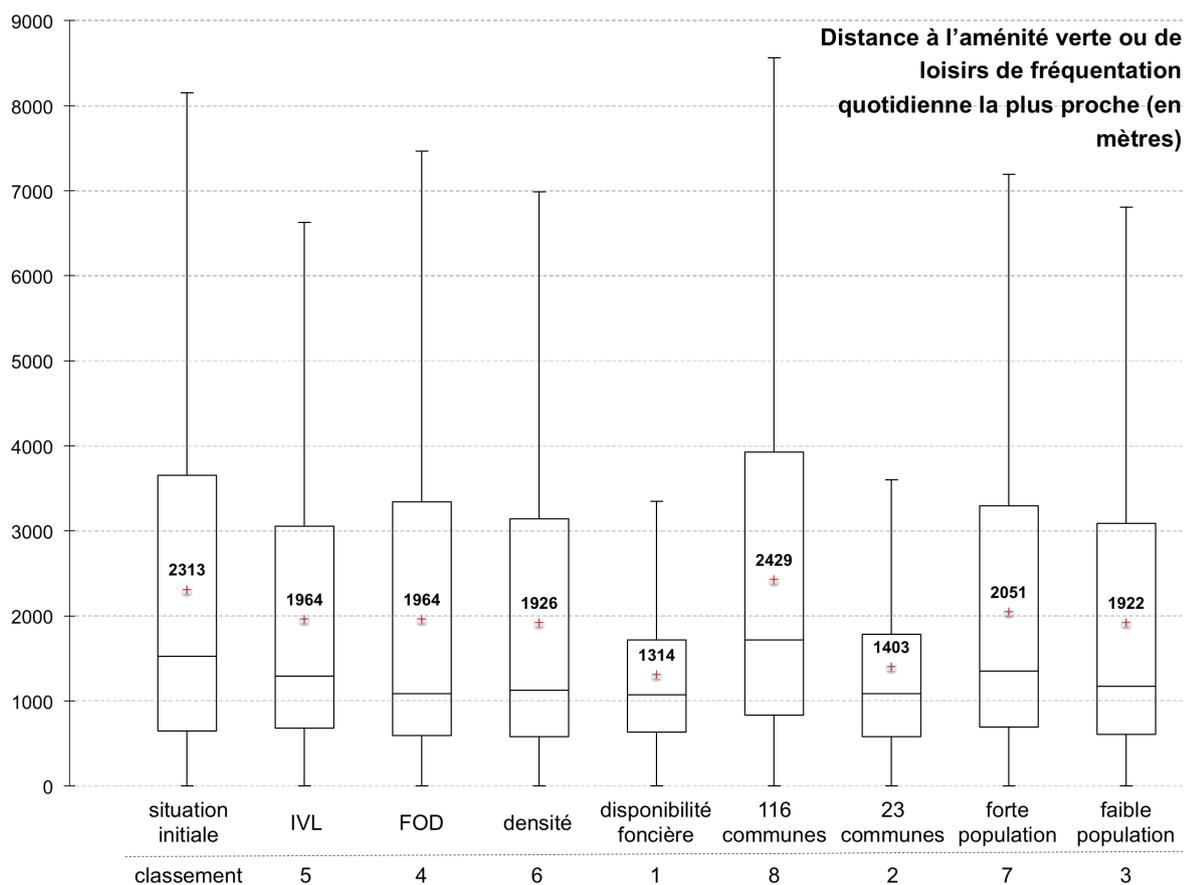


FIGURE 7.3 – Distributions statistiques des valeurs d'évaluation de l'accessibilité à l'aménité verte ou de loisirs de fréquentation quotidienne la plus proche, pour la situation initiale en 2010 et chaque scénario en 2030

1.1.4. L'aménité verte ou de loisirs de fréquentation hebdomadaire la plus proche

Si le scénario selon les terrains disponibles permet une meilleure accessibilité aux aménités vertes de fréquentation quotidienne, ce n'est plus le cas en ce qui concerne le niveau hebdomadaire, d'autant que les évaluations sont meilleures pour le niveau hebdomadaire que pour le niveau quotidien. Toutefois, tous les autres scénarios permettent de réduire la distance minimale d'accessibilité, notamment les scénarios IVL et le scénario 116 communes, qui impliquent une dispersion spatiale des cellules potentiellement urbanisables sur l'ensemble du territoire luxembourgeois. Ces résultats s'expliquent par la localisation des aménités de ce type, plutôt bien réparties dans les municipalités et souvent localisées à proximité des franges urbaines, où existent de nombreux espaces boisés de taille modeste mais situés à proximité des zones urbaines.

Les distances mesurées étant souvent inférieures aux normes d'aménagement prônées dans la construction des scénarios (2 000 mètres), une substituabilité de cette règle d'évaluation avec celle concernant les aménités vertes et de loisirs de fréquentation quotidienne pourrait être envisagée.

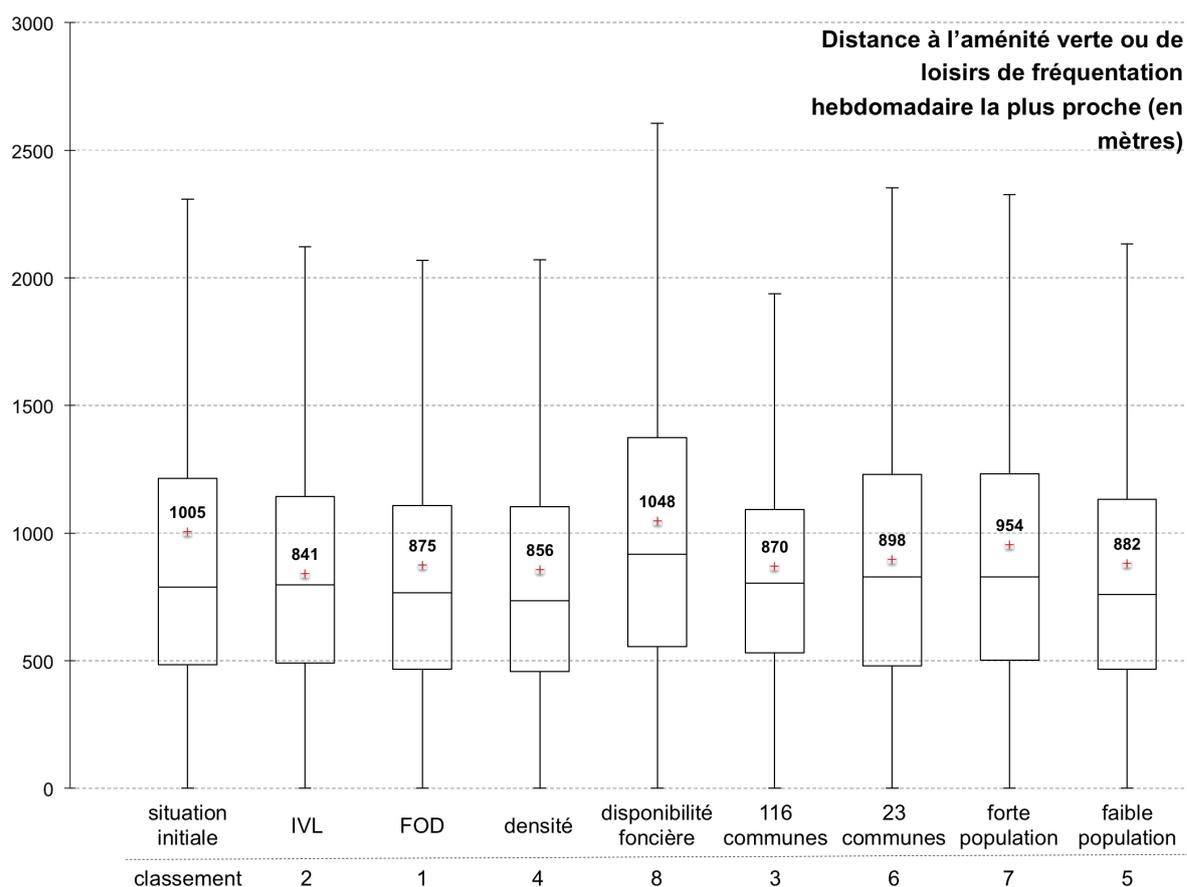


FIGURE 7.4 – Distributions statistiques des valeurs d'évaluation de l'accessibilité à l'aménité verte ou de loisirs de fréquentation hebdomadaire la plus proche, pour la situation initiale en 2010 et chaque scénario en 2030

1.1.5. L'aménité verte ou de loisirs de fréquentation mensuelle la plus proche

L'accessibilité aux aménités vertes et de loisirs de fréquentation mensuelle pourrait s'envisager comme une accessibilité aux franges urbaines, les espaces boisés les plus vastes n'étant pas localisés au sein des espaces urbains. De fait, quels que soient les scénarios, il n'y a pas d'amélioration de cette accessibilité par rapport à la situation initiale (moyennes et médianes inférieures à la situation initiale). On peut expliquer ce résultat du fait des formes urbaines simulées, qui sont localement denses et limitent l'étalement souvent induit par la croissance résidentielle. Parmi les résultats notables, on constate que le scénario FOD, qui est localement compact, permet de minimiser la distance aux grands espaces verts. Dans le même temps, le scénario basé sur une typologie de 23 communes, qui lui est globalement compact, augmente significativement l'amplitude de la distribution des valeurs d'évaluation. Avec des valeurs d'accessibilité inférieures à 5 000 mètres quel que soit le scénario, nous sommes en-dessous du seuil préconisé par Natural England (5 000 mètres pour les

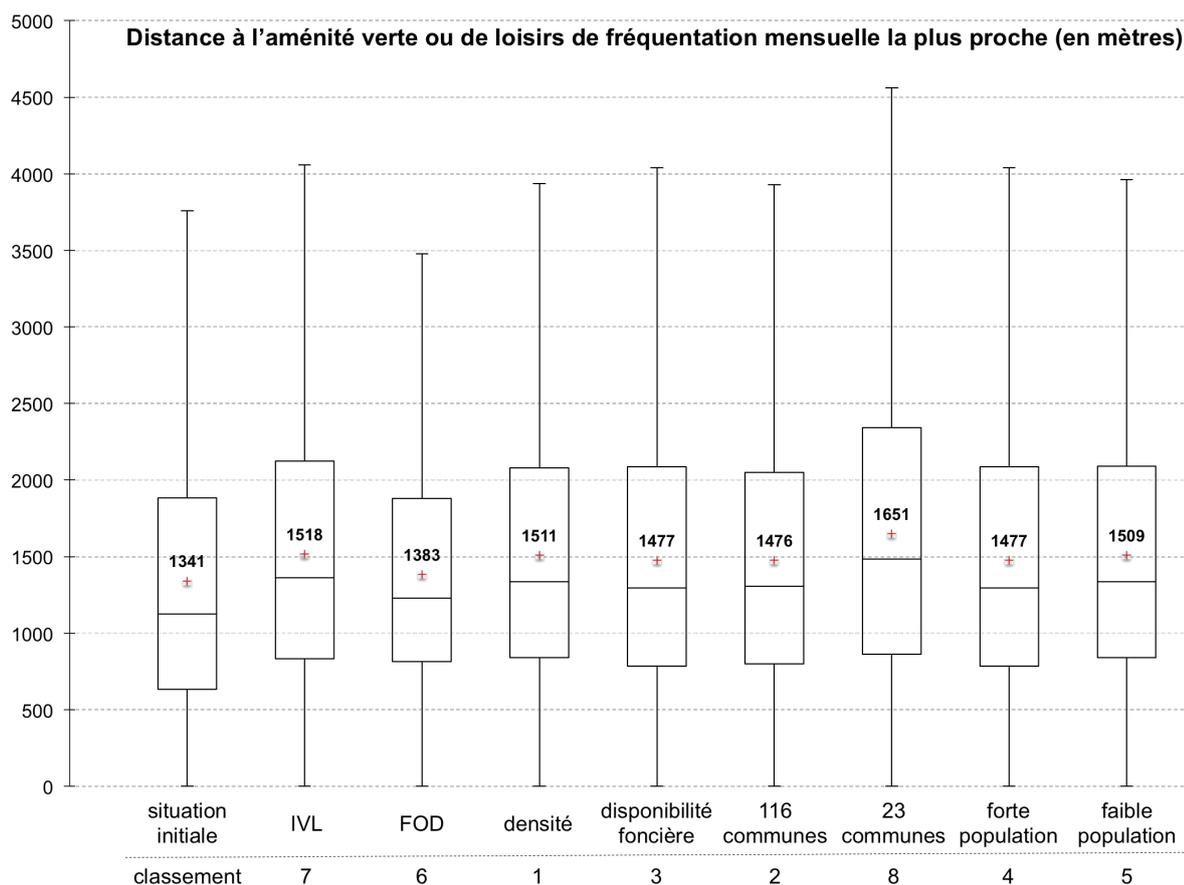


FIGURE 7.5 – Distributions statistiques des valeurs d'évaluation de l'accessibilité à l'aménité verte ou de loisirs de fréquentation mensuelle la plus proche, pour la situation initiale en 2010 et chaque scénario en 2030

espaces verts de 100 hectares).

1.1.6. La gare ferroviaire la plus proche

Le scénario FOD minimise le plus la distance à la gare ferroviaire la plus proche, avec une distance moyenne d'un peu plus de 700 mètres. Dans l'ensemble, tous les scénarios permettent de réduire la distance d'accès à la gare la plus proche, celle-ci étant initialement comprise entre 0 et 17 kilomètres, avec une moyenne à plus de 5 000 mètres. Le scénario basé sur les 23 communes les plus centrales permet également d'obtenir de bons résultats pour cet indicateur, avec 75% des cellules potentiellement urbanisables situées à moins de 5 000 mètres de la gare la plus proche et une distance moyenne d'environ 2 000 mètres. À l'inverse, le scénario des 116 communes comporte des valeurs d'évaluation assez élevées, jusqu'à 13 kilomètres, certaines communes étant dépourvues d'infrastructures ferroviaires. De façon étonnante, le scénario de la densité ne permet pas de réduire de façon remarquable la distance à la gare la plus proche. En effet, certaines communes urbanisées dans ce scénario ne possèdent pas d'accès direct au train. En considérant la règle d'aménagement

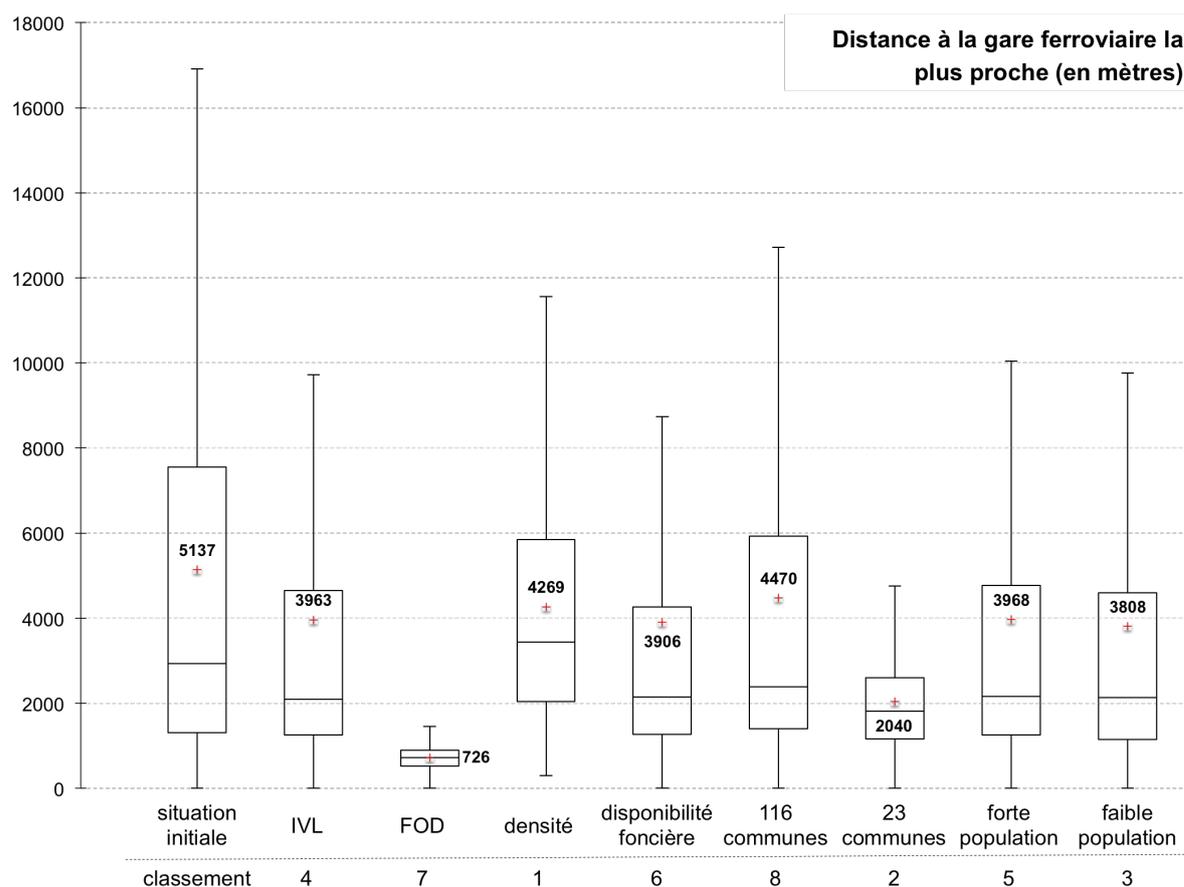


FIGURE 7.6 – Distributions statistiques des valeurs d'évaluation de l'accessibilité à la gare ferroviaire la plus proche, pour la situation initiale en 2010 et chaque scénario en 2030

appliquée (3 000 mètres maximum) pour atteindre la gare ferroviaire la plus proche, seul l'ensemble des cellules du scénario FOD et une grande partie des cellules du scénario 23 communes sont situés à une distance acceptable. Avec des médianes aux alentours de 2 000 mètres, de nombreux scénarios ont un potentiel de croissance résidentielle à proximité des transports en commun.

Au final, pour chaque scénario, les évaluations des scénarios en matière d'accessibilité aux aménités les plus proches (commerce ou service de fréquentation quotidienne et hebdomadaire, aménité verte de fréquentation quotidienne, hebdomadaire, mensuelle ou plus rare et gare ferroviaire) présentent de fortes variations, aucun scénario ne se classant premier pour tous les indicateurs.

Le tableau 7.1 fournit une proposition de classement des scénarios en fonction de la multiplication des valeurs de position des scénarios dans le classement de chaque indicateur, de sorte à ce que :

$C_{t,k} = i_1 \times i_2 \times \dots \times i_n$, où C_t est le score total du scénario k , en fonction de chaque indicateur $i_{1 \rightarrow n}$

Le recours à la multiplication accentue le caractère discriminant du classement des indicateurs. Il n'y a pas de pondération entre les différents indicateurs d'accessibilité.

Le scénario densité arrive en première position puisqu'il s'est classé premier dans trois des six indicateurs. Si on compare le scénario de la densité avec la référence qui est le scénario IVL, le gain relatif d'accessibilité est en grande partie dû à la division par deux du nombre de cellules dans le scénario. Comme les cellules les mieux évaluées *ex-ante* sont sélectionnées en premier lieu, il est logique que les scénarios comportant moins de cellules soit favorisés dans l'analyse des résultats.

C'est pourquoi le scénario de la densité est suivi par le scénario FOD et le scénario de variation des projections démographiques selon une hypothèse basse. Les scénarios de variation des projections démographiques selon une hypothèse hautes, des 23 communes et des 116 communes arrivent en queue de ce classement. Entre les deux, les scénarios IVL et de disponibilité foncière se placent à des positions intermédiaires. La méthode d'agrégation des résultats par multiplication n'est peut-être pas parfaite mais elle permet de souligner certaines tendances. Les variations soulèvent des choix opérationnels en vue de favoriser l'un ou l'autre scénario en l'absence de réelle démarcation de l'un d'entre eux.

	IVL	FOD	densité	dispo. fon- cière	116 com- munes	23 com- munes	forte popu- lation	faible popu- lation
comm & serv. quot.	4	6	1	5	7	8	3	2
comm & serv. hebdo.	6	5	1	3	7	8	4	2
aménité verte quot.	5	6	4	1	8	2	7	3
aménité verte hebdo.	2	4	1	8	3	6	7	5
aménité verte mensuelle	7	1	6	3	2	8	4	5
gare ferroviaire	4	1	7	6	8	2	5	3
produit des classement	6 720	720	168	2 160	18 816	12 288	11 760	900
classement total	5	2	1	4	8	7	6	3

Tableau 7.1 – Classement des scénarios en fonction des résultats obtenus pour chaque indicateur de distance minimale entre chaque cellule potentiellement urbanisable et l'aménité la plus proche

1.2. Le nombre moyen d'aménités localisées à une certaine distance de chaque cellule potentiellement urbanisable

1.2.1. Les commerces et services de fréquentation quotidienne, à moins de 1 000m de chaque cellule

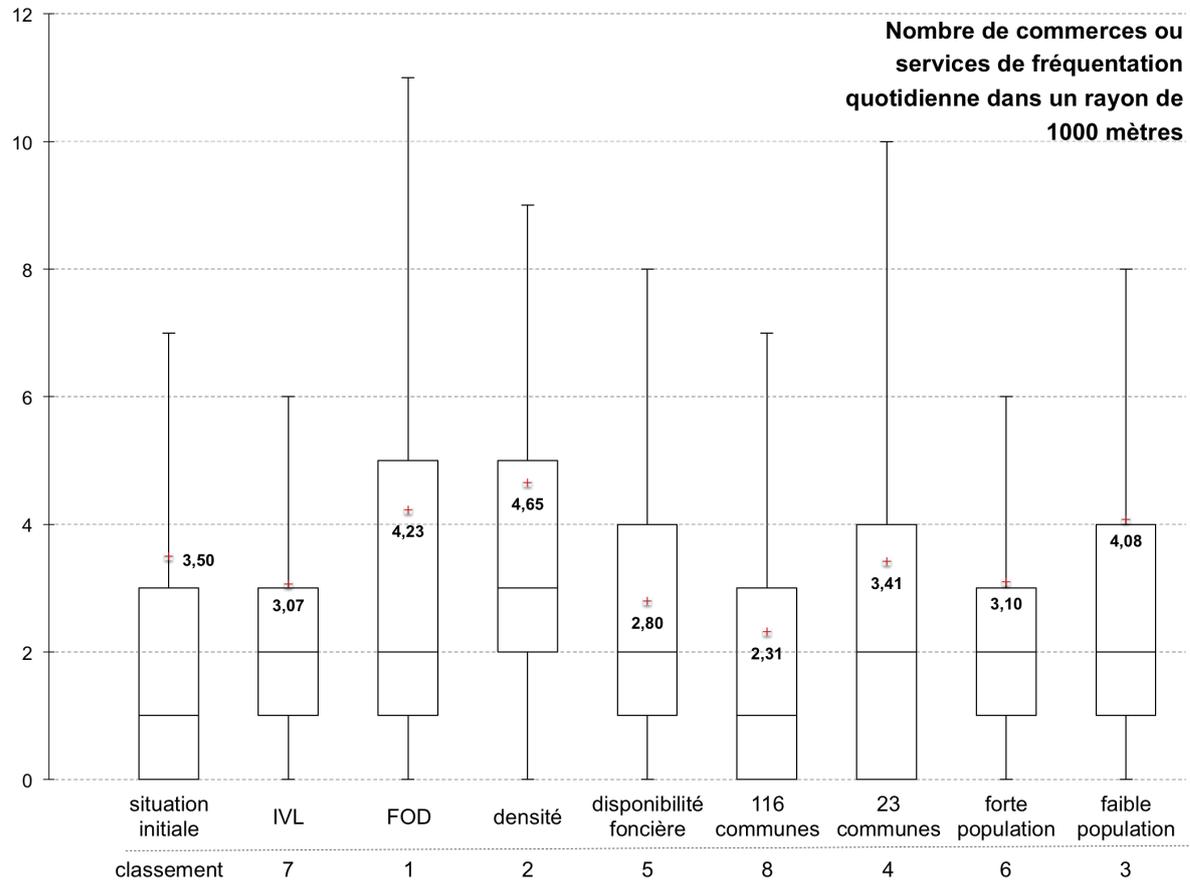


FIGURE 7.7 – Distributions statistiques des valeurs d'évaluation de l'accessibilité aux commerces et services de fréquentation quotidienne localisés à moins de 1 000m de chaque cellule potentiellement urbanisable, pour la situation initiale en 2010 et chaque scénario en 2030

Si la moyenne des évaluations du nombre de commerces et services de fréquentation quotidienne est parfois plus basse que dans la situation initiale, la médiane est toujours supérieure et la position plus haute des boîtes ainsi que des derniers quartiles confirme une amélioration potentielle de la situation par les scénarios proposés. Le scénario basé des 116 communes est le seul dont la situation s'approche de l'état initial. À l'opposé, les scénarios FOD et dense permettent d'augmenter très significativement le nombre d'aménités atteignables en parcourant une distance de 1 000 mètres. La règle d'accessibilité aux commerces et services de fréquentation quotidienne définit une très bonne accessibilité à partir de quatre aménités dans un voisinage de 1 000 mètres. Seuls les scénarios FOD, densité et dans une moindre mesure le scénario de variation des projections dé-

mographiques selon une hypothèse basse, permettent de s'approcher de ce seuil.

1.2.2. Les commerces et services de fréquentation hebdomadaire, à moins de 2 000m de chaque cellule

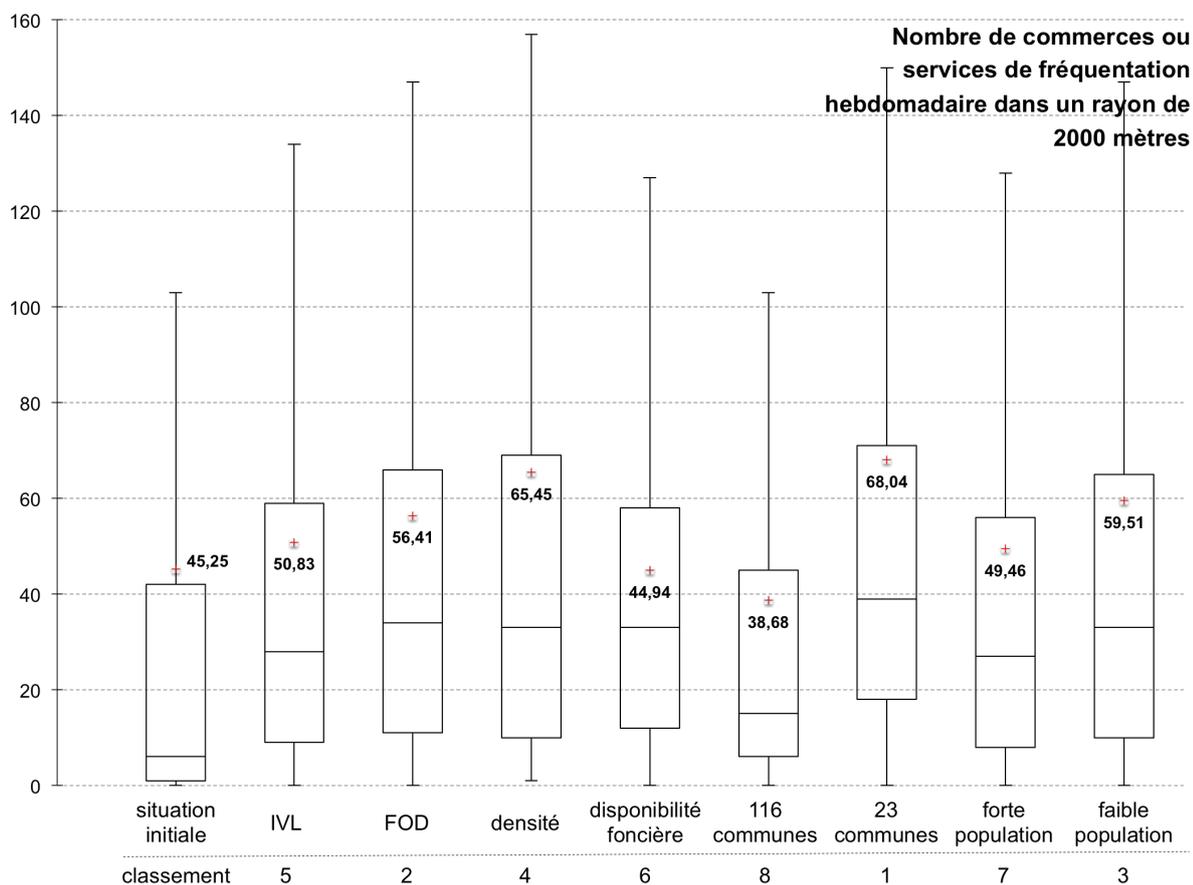


FIGURE 7.8 – Distributions statistiques des valeurs d'évaluation de l'accessibilité aux commerces et services de fréquentation hebdomadaire localisés à moins de 2 000m de chaque cellule potentiellement urbanisable, pour la situation initiale en 2010 et chaque scénario en 2030

Plus que les moyennes, il est intéressant ici de regarder les médianes qui sont nettement inférieures. La situation initiale fait état de 50% de cellules déjà bâties ayant accès à moins de 6 commerces ou services de fréquentation hebdomadaire. Le scénario le moins bien évalué est celui des 116 communes qui permet d'atteindre une valeur médiane de 15 aménités. Les autres scénarios ont des valeurs comprises entre 27 et 39 aménités dans un voisinage de 2 000 mètres. L'accès à une dizaine d'aménités de ce type dans un voisinage proche constitue déjà une bonne accessibilité.

Les résultats obtenus par l'évaluation de l'accessibilité aux commerces et services de fréquentation hebdomadaire sont assez similaires à ceux obtenus avec l'indicateur d'évaluation de l'accessibilité aux commerces et services de fréquentation quotidienne. Si moins de 40 aménités se situent

en moyenne à moins de 2 000 mètres des cellules du scénario des 116 communes, le scénario de la densité et celui basé sur 23 communes permettent d'en atteindre plus de 65. Si les cellules les mieux évaluées à l'état initial permettent d'atteindre une centaine d'aménités, les scénarios IVL, FOD, dense, des 23 communes ou avec variation de population selon une hypothèse basse contiennent des cellules dont l'évaluation dépasse les 120 voire 150 commerces et services dans leur voisinage.

1.2.3. Les arrêts de bus à moins de 1000m de chaque cellule

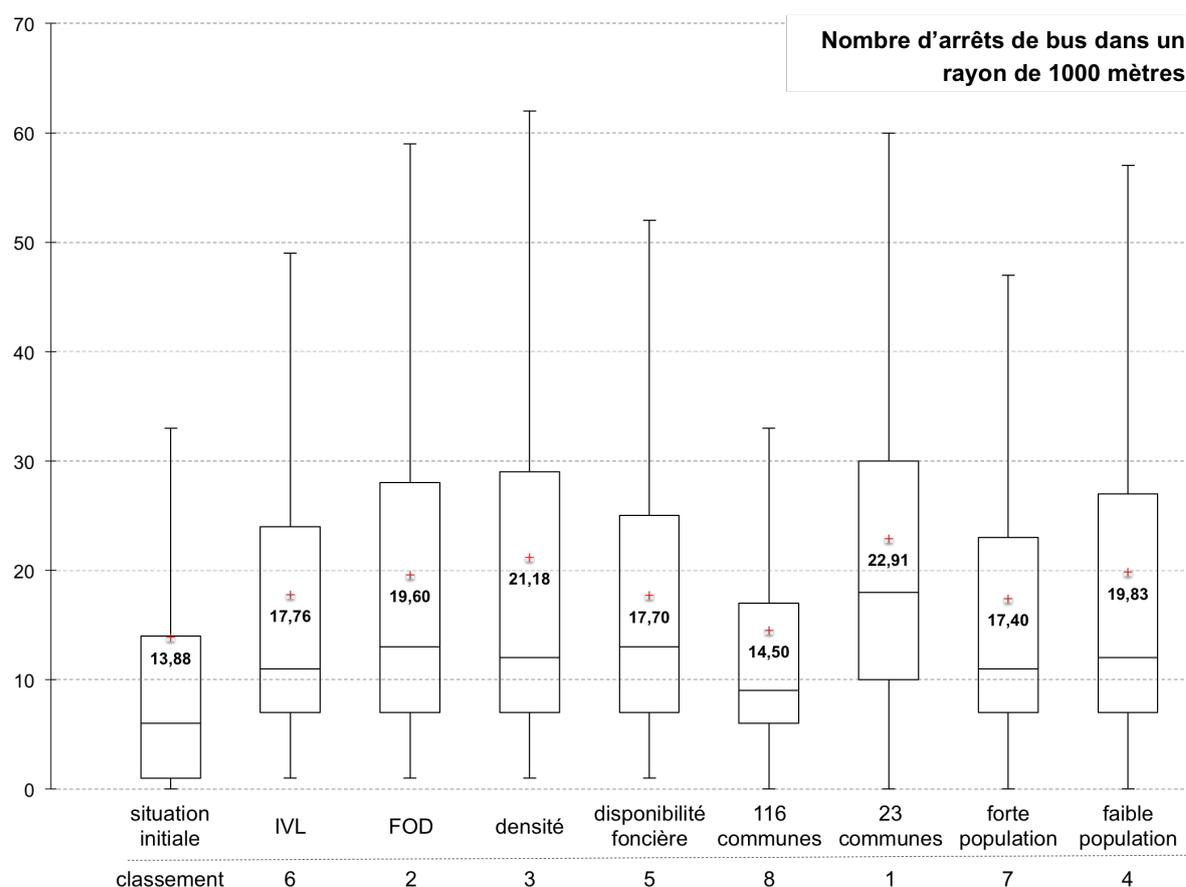


FIGURE 7.9 – Distributions statistiques des valeurs d'évaluation de l'accessibilité aux arrêts de bus localisés à moins de 1 000m de chaque cellule potentiellement urbanisable, pour la situation initiale en 2010 et chaque scénario en 2030

Dans le cas de l'évaluation de l'accessibilité aux arrêts de bus, une valeur plus élevée est obtenue pour l'ensemble des scénarios par rapport à la situation initiale. C'est pour le scénario reposant sur les 23 communes que le nombre d'arrêts de bus dans un rayon de 1 000 mètres autour des cellules évaluées est le plus important. De fait, c'est dans les communes les plus centrales du pays que le nombre d'arrêts est le plus élevé puisque les densités d'arrêts de bus y sont les plus importantes. Le scénario FOD, pourtant davantage basé sur l'infrastructure ferroviaire présente aussi de bons résultats. Il faut dire qu'une très grande majorité des gares du pays est pourvue d'arrêts de bus à proximité

immédiate dans l'optique de favoriser l'inter-modalité. À l'inverse, c'est dans le cadre du scénario des 116 communes que le nombre d'arrêts de bus est le plus réduit. Toutes les communes luxembourgeoises ne sont pas pourvues du même nombre d'arrêts de bus, ce qui génère des contrastes entre les scénarios où la répartition globale des cellules diffère.

1.2.4. Les aménités vertes ou de loisirs de fréquentation quotidienne à moins de 1 000m de chaque cellule

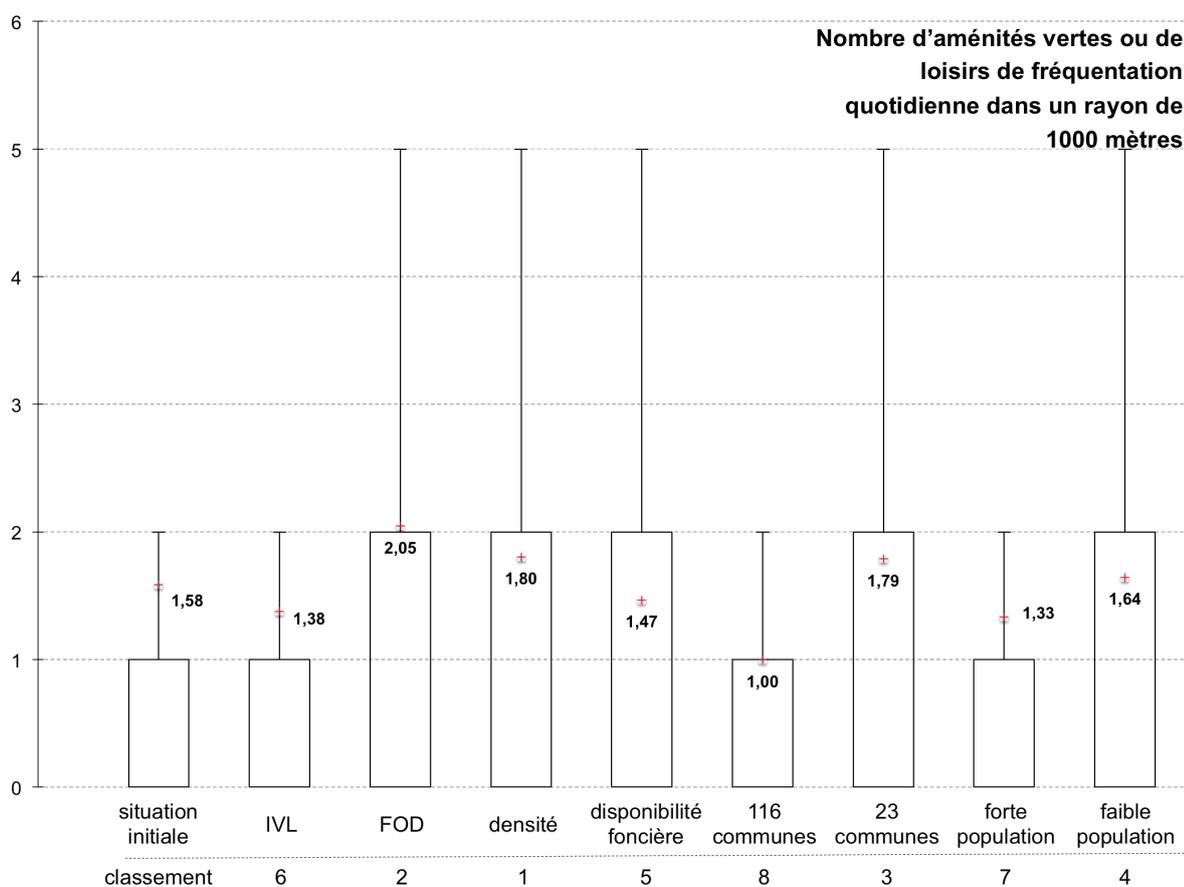


FIGURE 7.10 – Distributions statistiques des valeurs d'évaluation de l'accessibilité aux aménités vertes ou de loisirs de fréquentation quotidienne localisées à moins de 1 000m de chaque cellule potentiellement urbanisable, pour la situation initiale en 2010 et chaque scénario en 2030

Les résultats obtenus pour l'analyse du nombre d'aménités vertes de fréquentation quotidienne sont assez bien corrélés avec ceux issus du calcul de la distance minimale. Dans un rayon de 1 000 mètres, il est possible de trouver entre un ou deux parcs et jardins, rarement plus, comme l'indique la limite supérieure de nos boîtes. Ce sont les scénarios FOD, de densité et des 23 communes qui obtiennent les meilleurs résultats, même si le scénario selon les terrains disponibles et celui fondé sur des hypothèses basses des projections démographiques ont des résultats assez similaires. En tout état de cause, il semblerait que la localisation des espaces verts de proximité dans les espaces plutôt

urbains explique une grande partie de ces résultats. Lorsque la croissance résidentielle est spatialement plus dispersée au niveau communal, comme dans les scénarios IVL, des 116 communes ou selon une hypothèse de forte croissance démographique, le nombre d'aménités vertes dans un voisinage proche des cellules potentiellement urbanisables est plus réduit qu'à l'état initial.

1.2.5. Les aménités vertes ou de loisirs de fréquentation hebdomadaire à moins de 2 000m de chaque cellule

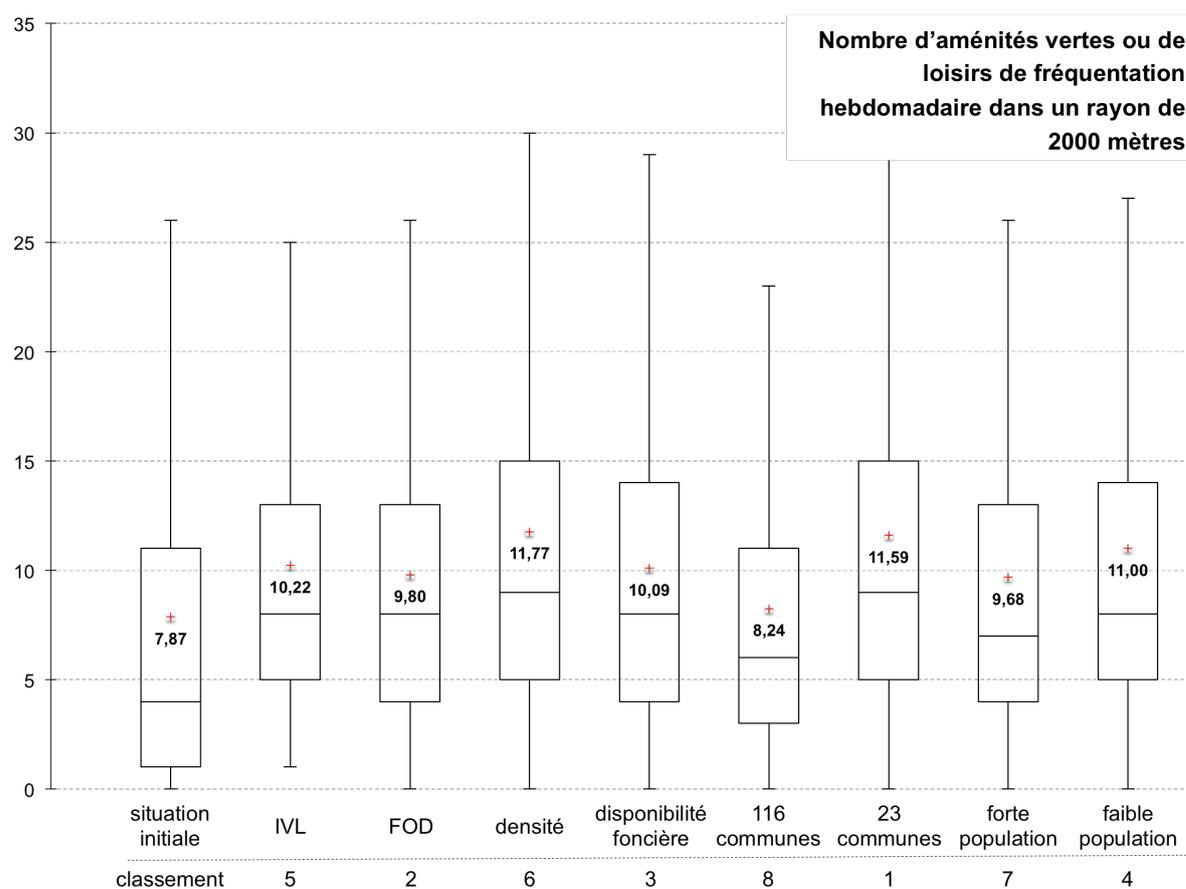


FIGURE 7.11 – Distributions statistiques des valeurs d'évaluation de l'accessibilité aux aménités vertes ou de loisirs de fréquentation hebdomadaire localisées à moins de 2 000m de chaque cellule potentiellement urbanisable, pour la situation initiale en 2010 et chaque scénario en 2030

Contrairement aux aménités vertes et de loisirs de fréquentation quotidienne, tous les scénarios permettent d'atteindre une plus grande quantité d'aménités dans un voisinage de 2 000 mètres, tant pour les cellules potentiellement urbanisables que les cellules initialement urbanisées. Ce sont les scénarios des 23 communes et de la densité qui sont les mieux évalués, même si les valeurs d'évaluation de chaque scénario sont assez proches. De fait, la valeur moyenne d'évaluation oscille entre 8,24 et 11,77 aménités en moyenne et le premier quartile se situe souvent au-dessus de 4 entités. C'est le scénario composé des 116 communes qui est le moins bien évalué. Les aménités vertes de

ce niveau sont composées d'infrastructures sportives généralement localisée dans les principales communes³ mais aussi d'espaces boisés de moins de 100 hectares, mieux réparties sur le territoire. C'est pour cette raison que peu de différences sont observées entre les scénarios.

Comme pour l'indicateur d'accessibilité à l'aménité la plus proche, il existe une forte variation dans le classement des scénarios pour chaque indicateur de comptage du nombre moyen d'aménité dans le voisinage des cellules potentiellement urbanisables. Le tableau 7.2 illustre la synthèse des classements des scénarios en fonction du produit des classements pour chaque indicateur. Trois scénarios se détachent nettement : 23 communes, densité et FOD. Si les deux derniers étaient déjà parmi les mieux classés lors des évaluations de proximité, le scénario des 23 communes est passé de la septième à la première place. Le comptage du nombre d'aménités dans un certain voisinage favorise les scénarios dont la forme urbaine est concentrée d'un point de vue global, sur un nombre restreint de communes de taille importantes. À l'inverse, les scénarios dont le développement résidentiel simulé est plus dispersé spatialement (IVL, hypothèse forte de croissance démographique et des 116 communes) ferment le classement.

	IVL	FOD	densité	dispo. fon- cière	116 com- munes	23 com- munes	forte popu- lation	faible popu- lation
nb. comm & serv. quot. (1 000m)	7	2	1	5	8	4	6	3
nb. comm & serv. hebdo. (2 000m)	5	4	2	6	8	1	7	3
nb arrêts de bus (1 000m)	6	3	2	5	8	1	7	4
nb aménité verte quot. (1 000m)	6	1	2	5	8	3	7	4
nb aménité verte hebdo. (2 000m)	5	6	2	3	8	1	7	4
produit des classement	6 300	144	16	2 250	32 768	12	14 406	576
classement total	6	3	2	5	8	1	7	4

Tableau 7.2 – Classement des scénarios en fonction des résultats obtenus pour chaque indicateur du nombre moyen d'aménités de chaque type dans le voisinage de chaque cellule potentiellement urbanisable

3. C'est notamment le cas pour les grands équipements sportifs : piscines, gymnases... Un peu moins pour les terrains de sport.

1.3. La distance moyenne minimale de chaque cellule à un ensemble d'aménités différentes

1.3.1. Distance moyenne minimale pour accéder à chaque type de commerce et service de fréquentation quotidienne

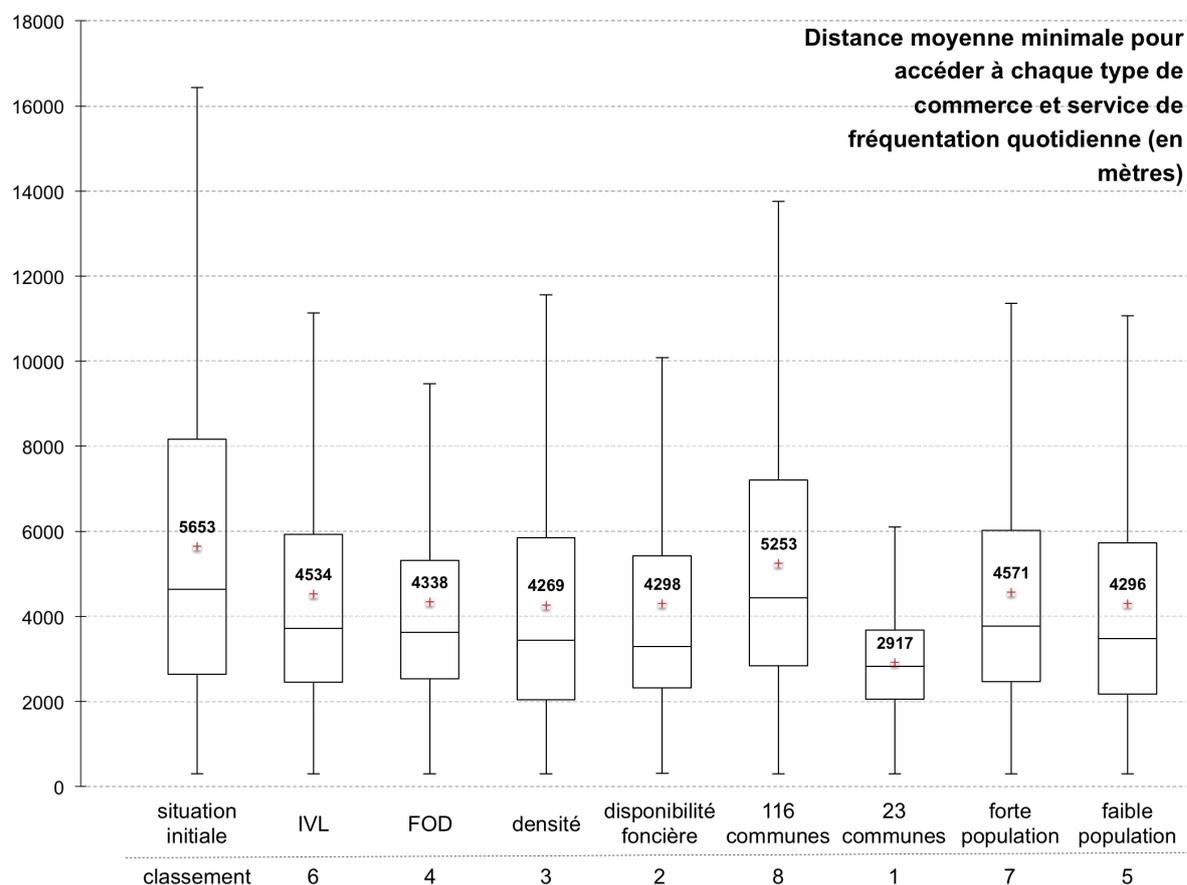


FIGURE 7.12 – Distributions statistiques des valeurs d'évaluation de l'accessibilité à chaque type de commerces et services de fréquentation quotidienne, pour la situation initiale en 2010 et chaque scénario en 2030

Comme le montre la figure 7.12, c'est le scénario des 23 communes qui permet une meilleure accessibilité aux différents types de commerces et services de fréquentation quotidienne. En effet, chaque commerce et service de recours quotidien⁴ est atteint en moins de 3 000 mètres en moyenne et compris le plus généralement entre 2 000 et 4 000 mètres. Ce résultat est à mettre au regard de la situation initiale où le troisième quartile se situe à plus de 8 kilomètres et le maximum au delà de 16 kilomètres, donc l'accessibilité à un ensemble d'aménités différentes de fréquentation quotidienne est très grandement améliorée. Les scénarios FOD et des terrains disponibles obtiennent également des résultats intéressants. En revanche, le scénario des 116 communes qui possède est le

4. C'est à dire à la fois une alimentation générale ou une supérette, une boulangerie, une boucherie, une crèche, une école et un bureau de tabac / presse.

moins bien évalué puisqu'il faut en moyenne parcourir 5 000 mètres pour atteindre l'aménité quotidienne la plus proche de chaque type (2 000 mètres dans 75% des cas).

1.3.2. Distance moyenne minimale pour accéder à chaque type de commerce et service de fréquentation hebdomadaire

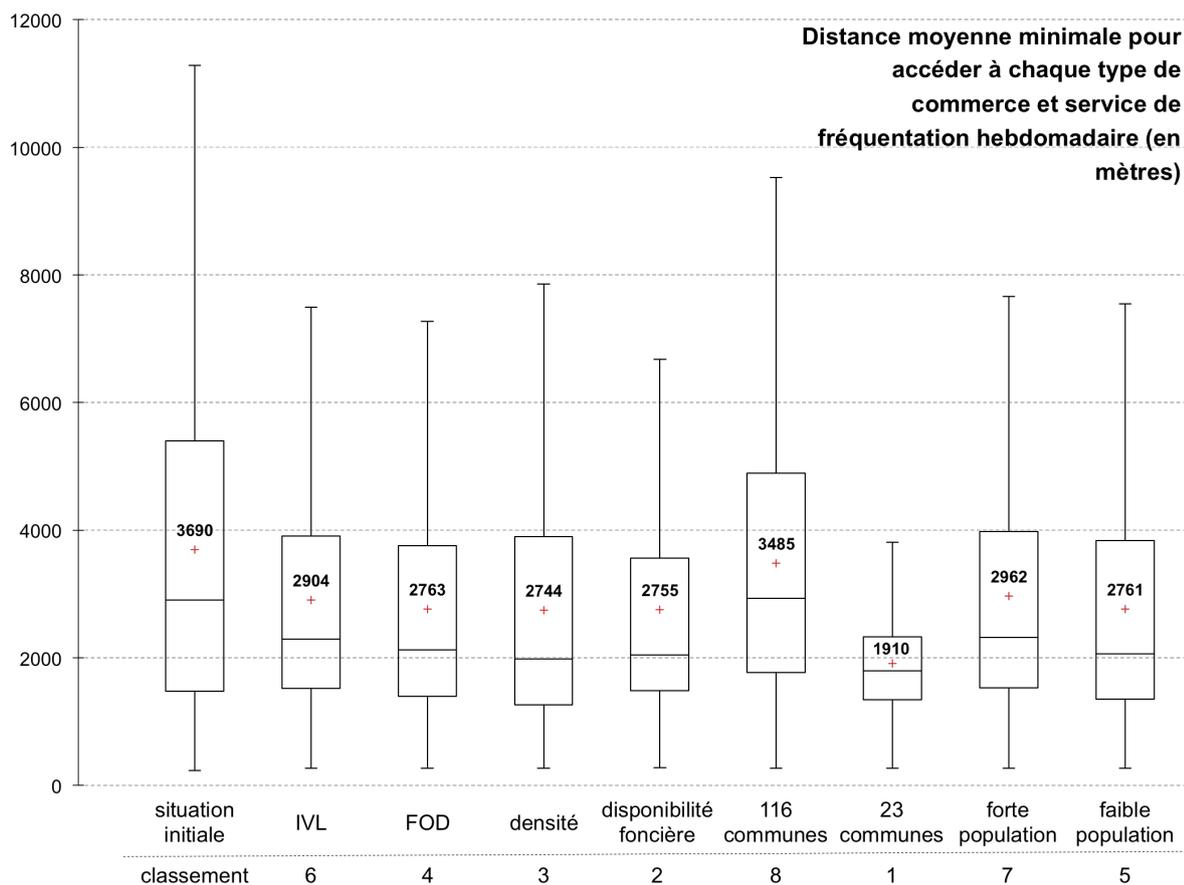


FIGURE 7.13 – Distributions statistiques des valeurs d'évaluation de l'accessibilité à chaque type de commerces et services de fréquentation hebdomadaire, pour la situation initiale en 2010 et chaque scénario en 2030

Les résultats obtenus par la mesure de la distance moyenne minimale pour accéder à chaque type de commerce et service de fréquentation hebdomadaire⁵ sont en tous points identiques à ceux obtenus pour les commerces et services de recours quotidien. Une fois encore les cellules potentiellement urbanisables situées dans les 3 pôles urbains du pays (scénario des 23 communes) sont nettement mieux évaluées que les cellules initialement urbanisées avec une distance moyenne deux fois inférieure. Aussi, le dernier quartile se situe à moins de 4 000 mètres, ce qui est bien plus faible

5. C'est à dire à la fois à une agence bancaire, un café-bar, un coiffeur, un chausseur, un magasin de vêtements, une salle de fitness, une fleuriste, une station de lavage de voitures, un médecin généraliste, une pharmacie, un bureau de poste, un pressing, un restaurant, une station-service, un supermarché ou un hypermarché.

que les 11 kilomètres de la situation initiale et les 6 à 8 kilomètres des autres scénarios. En revanche, il faut près de 3 500 mètres pour rejoindre au chaque type d'aménités dans le cas du scénario des 116 communes.

On peut tout à fait comprendre ce résultat puisqu'un certain nombre de ces aménités, notamment les supermarchés, les agences bancaires ou encore les commerces de vêtements ou chaussures sont localisés dans les communes les plus importantes. Les distances à parcourir sont en général plus courtes que dans le cas des aménités quotidiennes du fait d'un nombre quatre fois plus élevé de commerces et services, et ce malgré un nombre d'aménités différentes plus conséquent.

1.3.3. Distance moyenne minimale pour accéder à chaque type de commerce et service de fréquentation mensuelle ou plus rare

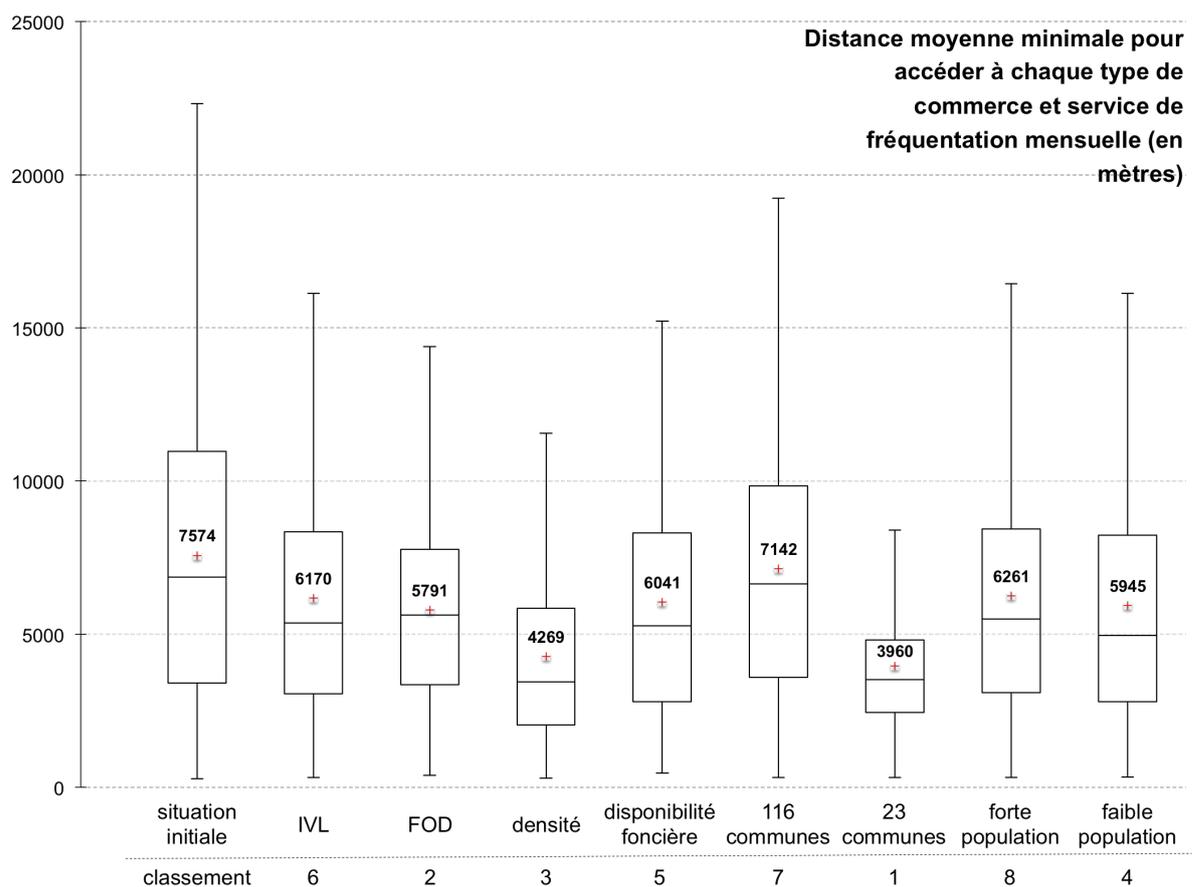


FIGURE 7.14 – Distributions statistiques des valeurs d'évaluation de l'accessibilité à chaque type de commerces et services de fréquentation mensuelle ou plus rare, pour la situation initiale en 2010 et chaque scénario en 2030

Au niveau des commerces et services de recours potentiel mensuel⁶, les résultats sont assez proches des deux niveaux précédents. Les administrations, les infrastructures de santé ou un grand nombre d'aménités culturelles sont implantées dans les plus grandes communes du pays. C'est pourquoi les scénarios denses et des 23 communes sont les mieux évalués. On peut également relever un résultat intéressant dans le cadre du scénario FOD pour lequel 75% des cellules potentiellement urbanisables sont situées à moins de 15 kilomètres de chaque type d'aménité mensuelle. Toutefois, il reste à savoir si ces kilomètres peuvent être parcourus en transports en commun, puisque leur utilisation est l'un des objectifs principaux du scénario FOD.

1.3.4. Distance moyenne minimale pour accéder à chaque type d'aménité verte ou de loisirs de fréquentation quotidienne

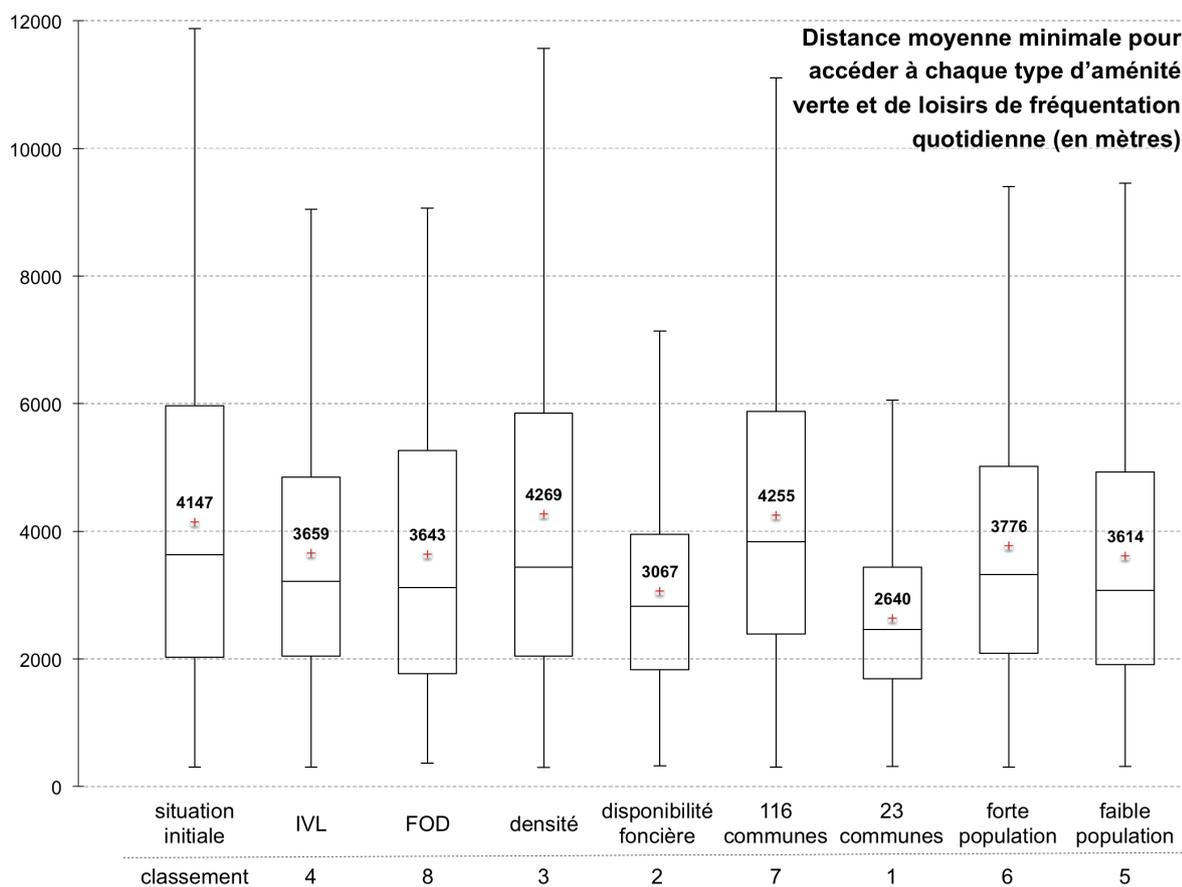


FIGURE 7.15 – Distributions statistiques des valeurs d'évaluation de l'accessibilité à chaque type d'aménités vertes ou de loisirs de fréquentation quotidienne, pour la situation initiale en 2010 et chaque scénario en 2030

6. C'est à dire à la fois à une mairie, une administration, une aménité culturelle (théâtre, cinéma, bibliothèque...), une librairie, un dentiste, un médecin spécialiste et un hôpital.

L'intérêt de cet indicateur est limité puisque ces aménités sont seulement de deux ou trois types (parcs / jardins, jardins familiaux, forêts et bois de moins de 2Ha), et les fonctions qu'elles proposent sont assez similaires. Un parc ou espace boisé de surface limitée permettent sensiblement les mêmes usages quotidiens (jeu des enfants, sports ou loisirs, promenade des animaux domestiques). C'est le scénario des 23 communes qui bénéficient de la distance moyenne la plus courte à chaque type d'aménités verte et de loisirs de fréquentation quotidienne. Le scénario des terrains disponibles arrive en deuxième position. Ces deux scénarios présentent une distribution statistique des valeurs d'accessibilité relativement resserrée, l'ensemble des cellules évaluées étant localisées à moins de 7 500 mètres des différentes aménités.

1.3.5. Distance moyenne minimale pour accéder à chaque type d'aménité verte ou de loisirs de fréquentation hebdomadaire

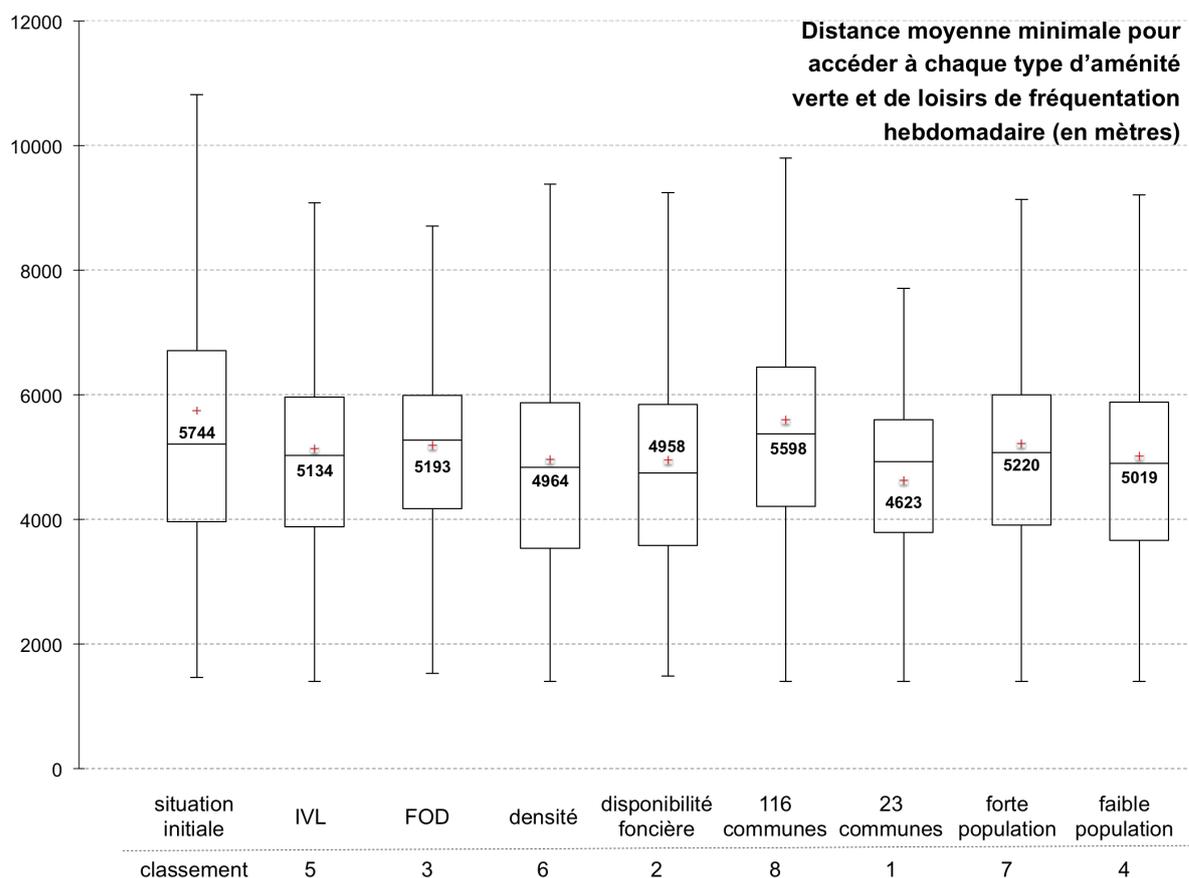


FIGURE 7.16 – Distributions statistiques des valeurs d'évaluation de l'accessibilité à chaque type d'aménités vertes ou de loisirs de fréquentation hebdomadaire, pour la situation initiale en 2010 et chaque scénario en 2030

L'évaluation de la distance minimale d'accès à chaque type d'aménité verte ou de loisirs de recours potentiel hebdomadaire est assez semblable pour l'ensemble des scénarios, qui améliorent tous la situation initiale. Comme pour l'évaluation du nombre de ces aménités dans un voisinage

proche, la répartition spatiale de chaque type peut dépendre d'une compensation entre les types d'aménités. Par exemple, on peut aisément concevoir que la distance pour accéder au terrain de golf le plus proche n'est pas toujours des plus courtes, ces derniers étant peu nombreux et localisés dans les espaces plutôt ruraux. Néanmoins, les communes urbaines peuvent compenser ce manque relatif par un équipement sportif à proximité immédiate (gymnase ou piscine). Dans le même temps, les communes les plus rurales bénéficient d'une bonne accessibilité aux espaces boisés. Ces différentiels dans la localisation des activités expliquent en grande partie la ressemblance des valeurs représentées dans la figure 7.16.

Le tableau 7.3 présente le classement des scénarios pour les indicateurs d'accessibilité moyenne minimale pour atteindre chaque type d'aménité d'une même fréquence de recours. Cette fois, le scénario des 23 communes, déjà premier des indicateurs de comptage, figure en premier place pour chacun des cinq indicateurs. L'urbanisation étant concentrée dans les trois pôles urbains du pays, il est normal de pouvoir accéder à une grande variété d'aménités en un minimum de temps. Le scénario des terrains disponibles arrive en deuxième position ; les terrains actuellement constructibles au Luxembourg sont situés pour une majeure partie à proximité du bâti existant, qui est déjà bien évalué pour un certain nombre d'aménités, comme nous avons pu le constater dans la deuxième partie de la thèse. Le scénario FOD complète le haut du classement, indiquant que les espaces potentiellement urbanisables à proximité des gares ferroviaires bénéficient d'une assez bonne accessibilité à des aménités variées. Une fois encore, ce sont les scénarios les plus dispersés spatialement à l'échelle globale qui sont les moins bien évalués ; IVL, hypothèse d'une forte croissance démographique et des 116 communes.

Une synthèse des résultats obtenus pour chaque type d'indicateurs (distance minimale au plus proche, nombre d'aménités dans un voisinage, distance moyenne minimale pour accéder à chaque type d'aménités) est possible en multipliant les résultats des indicateurs entre-eux, ce qui accentue encore davantage les contrastes entre les scénarios. Le scénario des 23 communes, classé premier sur deux des trois familles d'indicateurs, est le mieux évalué en matière d'accessibilité synthétique du fait d'une adéquation entre la localisation des cellules potentiellement urbanisables et les aménités considérées. Le scénario de la densité arrive en deuxième place, puisqu'il se compose d'un nombre relativement restreint de cellules potentiellement urbanisables. Le scénario FOD est également assez bien évalué, il y aurait donc à proximité des stations ferroviaires luxembourgeoises des espaces potentiellement urbanisables proches d'une certaine variété de commerces, services ou d'espaces verts et de loisirs. Le scénario de la disponibilité foncière est également assez bien évalué, ce qui tend à démontrer que les terrains disponibles à la construction constituent un réel potentiel

	IVL	FOD	densité	dispo. fon- cière	116 com- munes	23 com- munes	forte popu- lation	faible popu- lation
comm & serv. quot.	6	3	4	2	8	1	7	5
comm & serv. hebdo.	6	3	4	2	8	1	7	5
comm & serv. mensuels.	6	3	2	5	8	1	7	4
aménité verte quot.	4	3	8	2	7	1	6	5
nb aménité verte hebdo. (2 000m)	5	6	3	2	8	1	7	4
produit des classement	4 320	486	768	80	28672	1	14 406	2 000
classement total	6	3	4	2	8	1	7	5

Tableau 7.3 – Classement des scénarios en fonction des résultats obtenus pour chaque indicateur de la distance moyenne minimale pour accéder à chaque type d'aménité d'une même fréquence de recours depuis les cellules potentiellement urbanisables

dans le développement futur au Grand-Duché. Comme nous l'avons évoqué précédemment lors des analyses de chaque type d'indicateurs, les scénarios les plus diffus spatialement sont également ceux dont l'accessibilité à différentes aménités semble la moins bonne. Les aménités mensuelles ou plus rares, ou certains commerces, services et loisirs de fréquence de recours hebdomadaire, se situent dans un nombre limité de communes mieux équipées, dont les municipalités les plus rurales demeurent éloignées.

	IVL	FOD	densité	dispo. fon- cière	116 com- munes	23 com- munes	forte popu- lation	faible popu- lation
produit des classement dist. min.	6 720	720	168	2 160	18 816	12 288	11 760	900
classement dist. min.	5	2	1	4	8	7	6	3
produit des classement nb. aménités	6 300	144	16	2 250	32 768	12	14 406	576
classement nb. aménités	6	3	2	5	8	1	7	4
produit des classement dist. moy. minimale	4 320	486	768	80	28 672	1	14 406	2 000
classement dist. moy. minimale	6	3	4	2	8	1	7	5
produit des classements	1,8.10 ¹¹	5,0.10 ⁷	2,0.10 ⁶	3,8.10 ⁸	1,8.10 ¹³	1,4.10 ⁵	2,4.10 ¹²	1,0.10 ⁹
classement final	6	3	2	4	8	1	7	5

Tableau 7.4 – Classement des scénarios en fonction des résultats obtenus pour chaque type d'indicateur d'accessibilité spatiale : distance minimale au plus proche, nombre d'aménités dans un voisinage, distance moyenne minimale pour accéder à chaque type d'aménités

2. Comparaison avec les résultats obtenus à partir des scénarios

MOEBIUS

Pour ne pas allonger la liste de résultats, seuls quelques exemples de chaque type d'indicateurs seront présentés. Le reste des distributions statistiques se situent en annexe. En guise de comparaison entre les scénarios MOEBIUS, le scénario des 23 communes fait office de référence des scénarios COSMELUX, puisqu'il ressortait souvent dans les résultats précédents.

2.1. La distance minimale à la gare ferroviaire la plus proche

Le scénario BAU de MOEBIUS, qui comprend l'ensemble des 150 000 cellules contenues dans les terrains disponibles, est le moins bien évalué en matière d'accessibilité à la gare la plus proche. La moyenne, la médiane et le maximum sont plus élevés que dans le cas de la situation initiale. À l'inverse, les trois autres scénarios de MOEBIUS ont des distributions relativement similaires aux résultats obtenus de le cadre du scénario des 23 communes. Les distributions indiquent une réelle

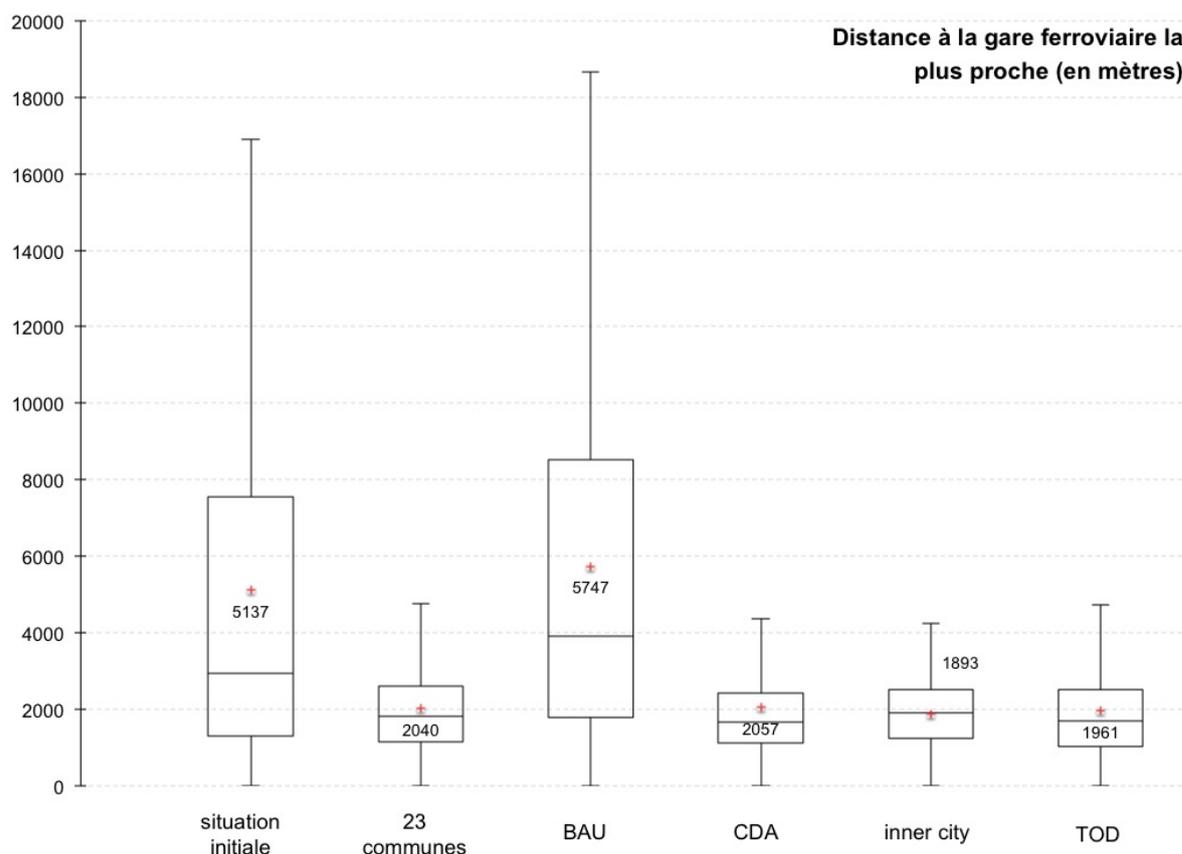


FIGURE 7.17 – Distributions statistiques des valeurs d'évaluation de l'accessibilité à la gare ferroviaire la plus proche, pour la situation initiale (2010), le scénario 23 communes et les 4 scénarios MOEBIUS (2030)

amélioration par rapport à la situation initiale avec des distances plus de deux fois plus courtes pour rejoindre la gare la plus proche. Les distributions sont également très resserrées, avec une valeur de dernier quartile inférieure à 5 000 mètres, donc en-dessous de la moyenne de la situation initiale.

Les scénarios CDA, Inner City et TOD représentent chacun entre 6 000 et 13 000 cellules potentiellement urbanisables, comme nous l'avons vu en fin de seconde partie. Le scénario des 23 communes en contient 78 000. Les écarts en matière d'accessibilité sont donc à nuancer en fonction de la différence du nombre de cellules potentiellement urbanisables dans les scénarios, qui induit un biais dans la présente comparaison. La plus grande partie de ces cellules sont situées dans les principales agglomérations, bien desservies en transports ferroviaires. Contrairement aux résultats obtenus dans le cadre du scénario dit de la disponibilité foncière (moins de 4 000 mètres en moyenne pour accéder à la gare ferroviaire la plus proche), ce premier résultat de la comparaison avec les scénarios de MOEBIUS indique que tous les terrains disponibles actuellement au Luxembourg ne sont pas à urbaniser en priorité.

2.2. Le nombre d'arrêts de bus localisés à moins de 1 000 mètres de chaque cellule potentiellement urbanisable

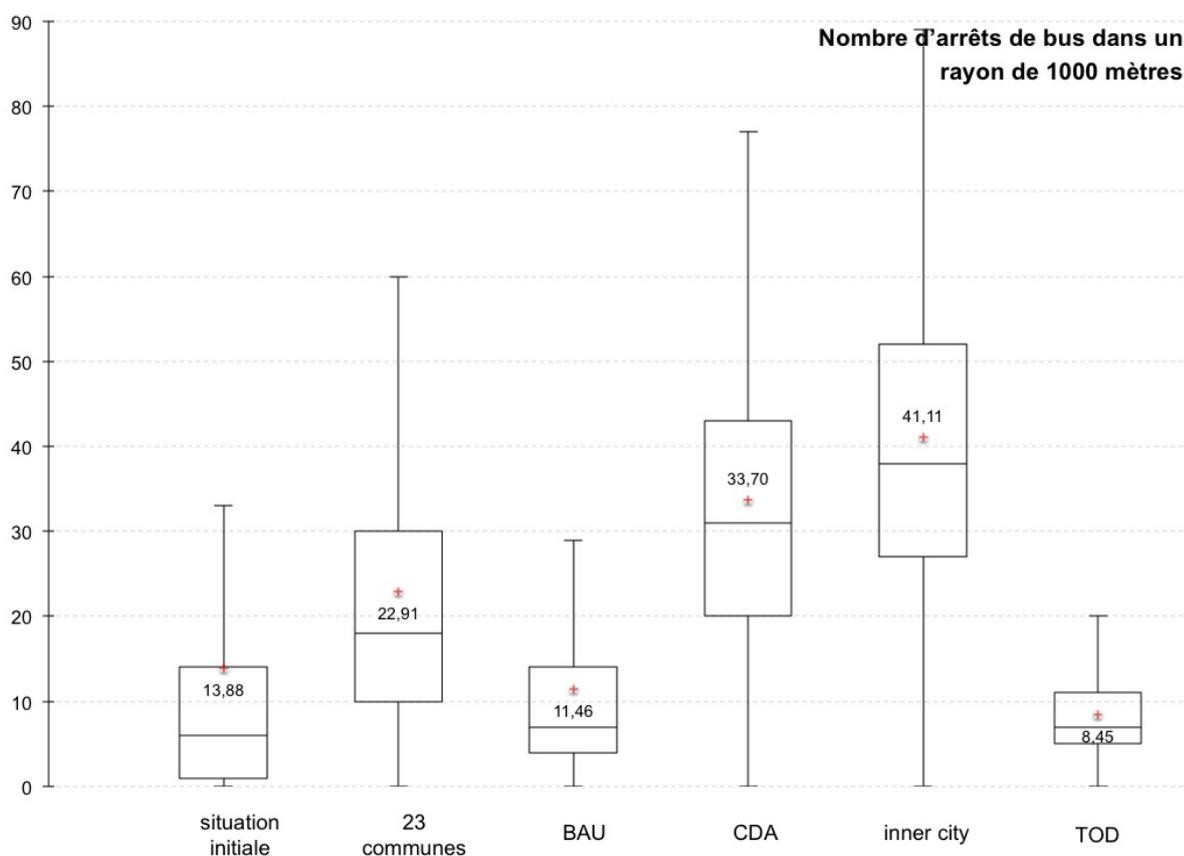


FIGURE 7.18 – Distributions statistiques des valeurs d'évaluation de l'accessibilité aux arrêts de bus, à moins de 1 000 mètres, pour la situation initiale (2010), le scénario 23 communes et les 4 scénarios MOEBIUS (2030)

Les résultats obtenus pour la mesure de l'accessibilité à un certain nombre d'arrêts de bus dans un voisinage de 1 000 mètres sont assez différents de ceux obtenus pour l'accessibilité à la gare la plus proche. Pour deux scénarios, BAU et TOD, les résultats obtenus sont similaires à ceux de la situation initiale. Si la moyenne est plus basse, la médiane est légèrement plus élevée et la distribution des valeurs plus resserrée. À l'opposé, les scénarios CDA et Inner City permettent d'obtenir de bien meilleurs résultats avec plus de 30 et 40 arrêts de bus en moyenne dans un voisinage de 1 000 mètres, et une valeur médiane cinq fois supérieure aux 6 arrêts de la situation initiale. Les résultats obtenus avec ces deux scénarios sont également nettement supérieurs à celui du scénario des 23 communes où le nombre médian d'arrêts de bus est de 22,9.

Le résultat du scénario BAU peut s'expliquer par le fait que la plus grande partie des arrêts de bus sont localisés en milieu urbain et donc pas nécessairement à proximité des terrains disponibles.

On a vu précédemment que la disponibilité foncière était en partie située dans les communes dites complémentaires (les communes les plus rurales du pays), et que les terrains disponibles pouvaient être situés en périphérie des espaces déjà urbanisés et sont ainsi dépourvus d'arrêts très proches. À l'inverse, le résultat du TOD est assez inexplicable. Est-ce dans les règles de construction du scénario, qui intègrent pourtant une certaine proximité aux infrastructures de transports en commun que les cellules à proximité immédiate des arrêts de bus sont écartées ?

2.3. La distance moyenne minimale de chaque cellule à chaque type d'aménité

2.3.1. Les commerces ou services de fréquentation hebdomadaire

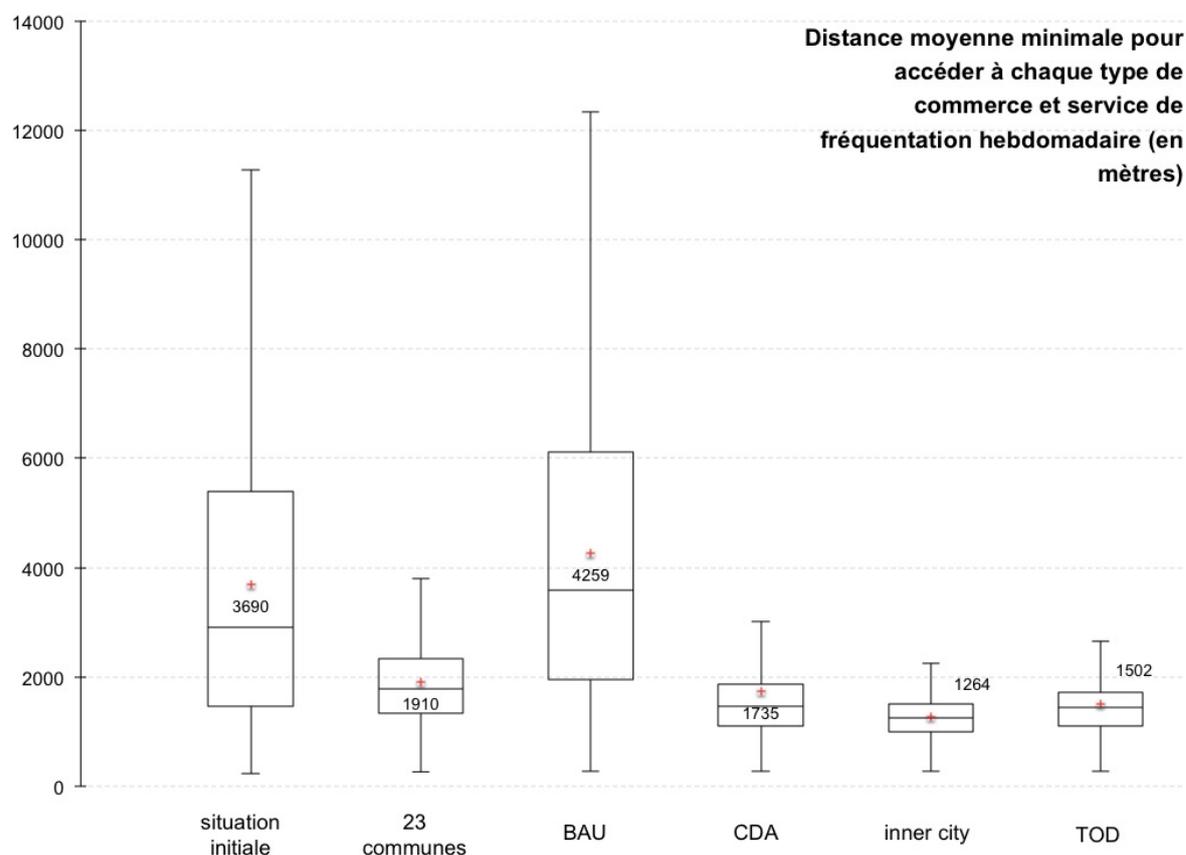


FIGURE 7.19 – Distributions statistiques des valeurs d'évaluation de l'accessibilité à chaque type de commerces et services de fréquentation hebdomadaire, pour la situation initiale (2010), le scénario 23 communes et les 4 scénarios MOEBIUS (2030)

Les mesures d'accessibilité moyennes à chaque type d'aménités produisent sensiblement des résultats identiques quelque soit la fréquence de recours retenue. Nous détaillerons donc ceux obtenus pour l'accessibilité aux commerces et services de niveaux hebdomadaire, mais des conclusions similaires peuvent être obtenues pour les niveaux quotidiens et mensuels, au moins dans la

forme des distributions. On retrouve d'ailleurs des résultats analogues à ceux obtenus dans le cadre de l'évaluation de l'accessibilité aux infrastructures ferroviaires.

L'ensemble des scénarios, à l'exception du BAU, permettent de minimiser la distance moyenne à parcourir pour accéder à chaque type de commerces et services. Médianes et moyennes sont divisées par deux par rapport à la situation initiale. Les valeurs maximales observées sont également très inférieures aux 11 000 mètres du dernier quartile de la situation en 2010. À l'inverse, le scénario BAU de MOEBIUS possède une mauvaise évaluation de l'accessibilité aux commerces et services de fréquentation hebdomadaire. Le dernier quartile se trouve au dessus de celui de la situation initiale, tout comme la moyenne et la médiane. Les terrains déclarés comme actuellement disponibles au Luxembourg semblent ne pas être localisés à proximité des commerces et services, notamment de recours hebdomadaire, une partie de ces derniers étant davantage localisés dans les agglomérations les plus importantes. C'est notamment le cas pour les restaurants, les commerces d'équipements de la personne (chaussures, habillement) ou les salles de sports. Le scénario des 23 communes est à peine moins bien évalué que les scénarios CDA, Inner City et TOD.

2.3.2. Les aménités vertes ou de loisirs de fréquentation hebdomadaire

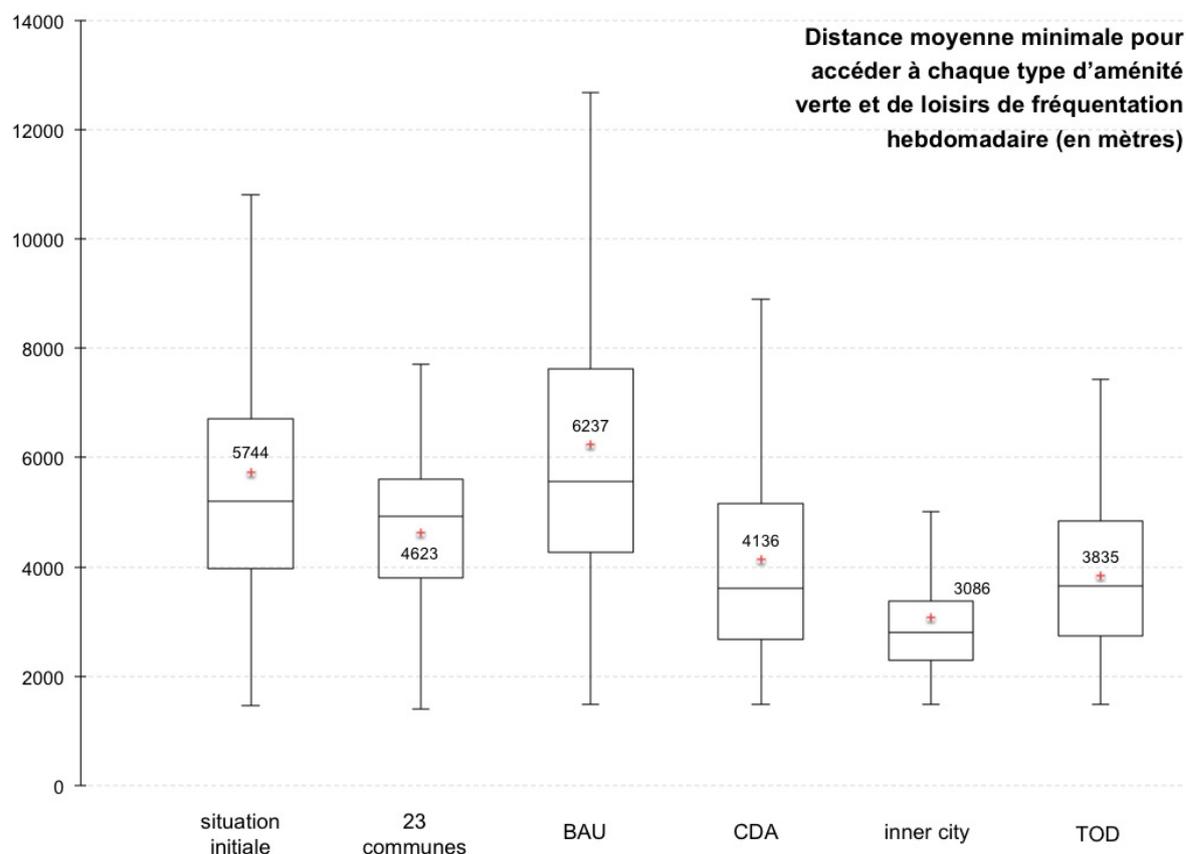


FIGURE 7.20 – Distributions statistiques des valeurs d'évaluation de l'accessibilité à chaque type d'aménités vertes ou de loisirs de fréquentation hebdomadaire, pour la situation initiale (2010), le scénario 23 communes et les 4 scénarios MOEBIUS (2030)

En ce qui concerne l'accessibilité moyenne à chaque type d'aménités vertes de fréquentation hebdomadaire, les résultats sont assez similaires à ceux obtenus avec l'indicateur précédent. À l'exception du scénario BAU, les scénarios MOEBIUS permettent de réduire significativement les distances moyennes à parcourir pour atteindre chaque type d'aménités. Si dans 75% des observations de 2010, la distance à parcourir était au maximum de 11 000 mètres, le dernier quartile du scénario Inner City se situe à 5 000 mètres, celui du TOD à 7 400 mètres et celui du scénario CDA à moins de 9 000 mètres. Les valeurs moyennes et médianes se retrouvent également diminuées de 30 à 50% environ. Là encore, les scénarios CDA, Inner City et TOD sont mieux évalués que le scénario des 23 communes. Les terrains disponibles du scénario BAU ne sont pas tous localisés à proximité de chaque type d'aménités vertes ou de loisirs hebdomadaires. Les grands équipements sportifs, tels que les gymnases et les piscines sont souvent localisés dans les principales agglomérations. Il est également curieux de noter que l'accessibilité aux terrains de golf, également prise en compte dans ce calcul, ne pénalise pas trop l'évaluation de cet indicateur. Malgré un nombre assez restreint de

ces aménités⁷, il semblerait qu'ils soient assez bien répartis sur l'ensemble du territoire.

3. Conclusion du chapitre 7

Comme nous venons de le voir dans ce court chapitre dédié à la comparaison des scénarios en matière d'accessibilité spatiale, les scénarios apportent une amélioration générale de l'accessibilité par rapport à la situation initiale pour chacun des indicateurs retenus, à l'exception des distances minimales d'accessibilité aux commerces et services de fréquentation hebdomadaire et aux aménités vertes et de loisirs de fréquentation mensuelle.

L'évaluation *ex-post* de l'accessibilité spatiale permet, dans le cadre de notre démarche normative, de mesurer l'impact des règles d'aménagement appliquées *ex-ante* lors du paramétrage du modèle. Les boîtes de dispersion, et leur principe de construction sur la base des distributions des valeurs en quartiles permettent partiellement de tenir compte de l'ensemble des valeurs obtenues un indicateur donné. Cette méthode de représentation permet une visualisation simple et rapide, même si comparer une série de boîtes juxtaposées doit faire l'objet de choix dans la méthode de classement. La démultiplication des indicateurs statistiques (médiane, moyenne, quartiles) permet de préciser la comparaison des scénarios mais rend plus difficile l'interprétation et l'exploitation des résultats obtenus.

Pour chacun des seize indicateurs, le scénario le mieux évalué diffère souvent. Il semble pour l'instant peu évident d'en tirer des conclusions générales quant à la position prédominante de l'un d'entre eux sur l'ensemble des scénarios simulés. Néanmoins, on constate que des groupes de scénarios reviennent très souvent parmi les mieux évalués alors que d'autres ne le sont jamais. Il semblerait que la forme urbaine globale (la centralité) et la forme locale jouent un rôle prépondérant dans l'accessibilité aux aménités urbaines et aux espaces verts. Ce groupe se compose des scénarios FOD, de la densité, des 23 communes et parfois de la disponibilité foncière. À l'inverse, les scénarios IVL, des 116 communes et les scénarios de variations de projections démographiques (variantes de l'IVL) ne font pas fréquemment l'objet d'une très bonne évaluation. Ainsi, plus les formes urbaines sont différentes au niveau global, plus le contraste entre les résultats obtenus est élevé, ce qui confirme en partie les résultats obtenus par Tannier *et al.* (2012a).

7. Il y a actuellement six terrains de golf au Luxembourg, ce qui est tout de même plus élevé que le nombre moyen par département en France (compris entre 3 et 4).

Ces différences dans le classement des scénarios traduisent une certaine inertie du territoire qui limite l'impact des scénarios dans l'amélioration de l'accessibilité à différentes aménités. La multiplication des indicateurs complique également la comparaison entre les scénarios et les conclusions qui en découlent, mais reflète la complexité de l'aménagement du territoire. En se plaçant dans un processus décisionnel, par exemple dans le cadre de politiques publiques, on mesure la difficulté de choisir entre les différentes options en présence. Pourtant, ces indicateurs, d'autant plus s'ils sont appréhendés de manière synthétique ou agrégée (avec les questions que cela soulève), fournissent des premiers éléments de réponses à l'évaluation et à la comparaison des scénarios de développement résidentiel.

Il semble également intéressant de confronter quelques évaluations d'accessibilité spatiale avec la littérature. Avec des valeurs médianes comprises entre 379 et 711 mètres pour l'accessibilité au commerce ou service de fréquentation quotidienne le plus proche, et entre 368 et 631 mètres pour le niveau hebdomadaire, l'évaluation des cellules potentiellement urbanisables de nos scénarios se rapproche du seuil de 400 mètres, assez communément admis (Wiel et al., 1997 ; Tannier et al., 2008). Par définition, la moitié des cellules sont donc situées sous ce seuil, ce qui contraste avec les résultats observés sur l'agglomération d'Avignon par Cyrille Genre-Grandpierre (2007), où seulement 12% du bâti se situe à moins de 5 minutes à pied (300 ou 400 mètres) du commerce alimentaire le plus proche, et 29% en considérant l'ensemble des commerces retenus. À Montréal en 2007, Apparicio et al. mesuraient une distance moyenne d'accessibilité de 910 mètres au supermarché le plus proche (correspondant au dernier quartile de nos scénarios) avec une très grande hétérogénéité entre les unités de recensement, les résultats s'étalant de 183 à 6 390 mètres.

En ce qui concerne l'accessibilité aux commerces et services de fréquentation mensuelle ou plus rare, pour accéder à chaque type d'aménité, il faut moins de 20 kilomètres pour la totalité des scénarios et pour 75% des cellules potentiellement urbanisables, moins de 10 kilomètres. Ces valeurs coïncident avec le seuil d'acceptabilité décrit par Le Fort (2012), qui est de 15 minutes en voiture d'après une enquête menée en Wallonie (Belgique).

Les distances d'accessibilité obtenues pour l'évaluation de la proximité aux aménités vertes et de loisirs sont généralement supérieures aux commerces et services, ce qui confirme les résultats déjà obtenus par Lofti et Koohsari en 2009. Les deux auteurs ont démontré qu'à Téhéran (Iran), les commerces de proximité sont plus accessibles (toute la population se situe à moins de 1 200 mètres) que les écoles (11% de la population au-delà de 1 200 mètres) ou encore les espaces verts (5% de la population à plus de 1 200 mètres). D'après Barbosa (2007), les habitants de Sheffield (Royaume-

Uni) font face à un déficit d'accessibilité aux espaces verts de proximité. À Montréal (Canada), 100% des immeubles HLM de l'étude menée par Apparicio et al. (2011) ont un parc d'au moins un hectare dans un voisinage d'un kilomètre. Cette valeur d'accessibilité descend entre 500 et 700 mètres pour la ville de Cardiff au Royaume-Uni (Higgs *et al.*, 2012). Toutefois, ces valeurs peuvent être nuancées en affirmant que la distance à l'aménité la plus proche n'est pas le seul indicateur à prendre en compte en ce qui concerne la mesure de l'accessibilité aux espaces verts, la répartition spatiale de ces aménités jouant également un rôle important (Choumert, 2009). C'est pourquoi les indicateurs de comptage dans un voisinage et la distance moyenne minimale d'accessibilité à plusieurs types d'aménités permettent de compléter ces observations.

Nous venons de constater tout l'intérêt des mesures d'accessibilité spatiale afin de comparer nos scénarios mais aussi les limites de ces indicateurs. Pour aller plus loin, et comme le suggèrent Neutens *et al.* (2010) et Tannier *et al.* (2012c), il semble nécessaire de considérer le comportement des individus selon une approche par les activités afin de mesurer les impacts des scénarios de croissance résidentielle sur les lieux d'activités. Comme l'évoquent Geurs *et al.* (2010), l'accessibilité comportementale permet d'évaluer le gain d'accessibilité des individus (*accessibility benefit measurements*). Il s'agit de tenir compte de leurs contraintes temporelles (Kong *et al.*, 2007), de leurs chaînes d'activités (Hanson, 1980), mais aussi de la qualité des dessertes (Neutens *et al.*, 2010). Ces propositions vont dans le sens de Krizek (2003) qui fait le constat que de trop nombreuses études analysent les déplacements de façon isolée au lieu de les intégrer dans des chaînes d'activités.

Il semble également important de considérer des comportements de déplacements différenciés en fonction des types de ménages. Selon les caractéristiques socio-économiques de ces derniers, les recours aux aménités seront différents, plus ou moins fréquents, plus courts ou plus longs, plus lents ou plus rapides. Il y a donc un réel enjeu à l'application d'un modèle de mobilité quotidienne, qui permet de dépasser les mesures d'accessibilité spatiale. À l'aide de cette démarche, on transforme la mesure d'un potentiel, l'accessibilité spatiale, en usage de ce potentiel au travers des comportements de mobilité. En désagrégeant l'information au niveau le plus fin, c'est-à-dire l'individu, la simulation des mobilités quotidiennes permet d'intégrer le niveau le plus fin de la décision et de l'arbitrage. Cette avancée passe par la prise en compte des plannings d'activités, contraints par la durée des activités, les horaires d'ouvertures ou la congestion (Weber, 2002 ; Kim, 2003). Bien sûr, ces comportements sont simulés, ils sont l'objet de choix de modélisation qui feront l'objet d'une description dans le chapitre suivant. La localisation de ménages dans les espaces potentiellement urbanisables constitue une étape importante du travail, avant une simulation des mobilités quotidiennes pour différents scénarios.

Chapitre 8

Comparaison des scénarios à l'aide d'indicateurs de mobilité quotidienne

« Les villes ne sont jamais que des ensembles plus ou moins réussis de tiroirs échafaudés les uns sur les autres. »

Jacques Sternberg, *Vivre en survivant*, 1977

COMME nous l'avons vu brièvement en introduction de cette troisième partie, et en conclusion du chapitre précédent, il y a un fort intérêt à comparer nos scénarios d'aménagement en matière de mobilité quotidienne. Ceci nécessite le passage par une étape intermédiaire, l'attribution des logements simulés dans les scénarios à des agents et des ménages synthétiques, représentatifs de la population réelle, afin que ceux-ci « peuplent » l'espace, y habitent, travaillent, aient une vie sociale, des loisirs, donc qu'ils s'y déplacent. Avant de simuler les comportements de mobilité des ménages en fonction des différents scénarios générés, il s'agit donc de faire correspondre aux espaces potentiellement urbanisables, un ou plusieurs ménages qui y résident. Cette étape correspond à l'allocation résidentielle, dont la méthode puis les résultats seront présentés dans les deux premières sections de ce chapitre. Le modèle de simulation des mobilités quotidiennes (MobiSim - MQ) sera présenté ensuite.

Afin de limiter le nombre d'opérations et les temps de calculs, la comparaison s'effectuera sur trois scénarios seulement : 1) le scénario IVL, qui nous sert de référence depuis le départ ; 2) le scénario FOD, afin de tester nos hypothèses de report modal de la voiture vers les transports en commun, censé être favorisé par la proximité aux stations de transports en commun et 3) le scénario dit des 23 communes, qui est l'un des scénarios les plus compacts, tant du point de vue de la forme urbaine

globale que locale, et qui est le scénario le mieux évalué sur le plan de l'accessibilité spatiale. La fin de ce chapitre sera consacrée à la comparaison des scénarios à partir des indicateurs de mobilité quotidienne obtenus par la simulation.

1. Application d'un modèle économique d'allocation résidentielle

1.1. Le choix résidentiel

Le choix résidentiel renvoie à l'idée d'un arbitrage entre les différentes composantes d'un logement et de son environnement. D'après Baker (2002), le « pack résidentiel » se compose de 5 éléments principaux : 1) la résidence, le logement (taille, superficie) ; 2) la composante économique (prix du logement, accès à l'emploi, coût de transport) ; 3) l'environnement résidentiel local (voisinage, composition sociale, aménités environnementales) ; 4) les aménités urbaines (commerces, services, infrastructures de transports, établissements scolaires) et 5) le réseau social (famille, amis).

Le modèle d'allocation résidentielle appliqué ici ne considère que l'impact de l'environnement résidentiel sur les choix de localisation résidentielle selon l'hypothèse que les variables en jeu influencent directement les comportements de mobilité quotidienne (Gordon, 1989 ; Bhat, 2002 ; Cervero, 2005 ; Naess, 2005). On considère donc que la localisation résidentielle de nos ménages va dépendre du résultat de l'arbitrage entre les différentes composantes de l'environnement résidentiel local, de la proximité aux aménités et au réseau social. Cet arbitrage est réalisé par les ménages dans le processus d'allocation résidentielle, qui consiste en l'application d'un modèle économique d'enchères sous contrainte de maximisation de l'utilité individuelle.

Dans notre exemple et à notre échelle de travail, il n'est pas possible de tenir compte des caractéristiques intrinsèques du logement, qui nécessiterait la création ou la saisie d'un parc immobilier à l'échelle nationale. En raison des données à notre disposition, cette étape n'est pas envisageable. La question du prix des logements est intégrée à la démarche de façon endogène dans le modèle de maximisation d'utilité sous contraintes d'enchères. Par conséquent, le prix des logements est déterminé a posteriori.

1.2. Principes de la maximisation de l'utilité d'une localisation résidentielle à l'aide d'un modèle d'enchère

Afin de localiser les ménages de la population synthétique (cf section 1.3.1) dans les cellules des scénarios, nous avons opté pour le modèle d'allocation résidentielle développé par Geoffrey Caruso et Cyrille Médard de Chardon à l'Université de Luxembourg (Caruso, 2005 ; Caruso et Médard De Chardon, 2012). Il s'agit d'un modèle micro-économique d'enchères entre les ménages sous contrainte d'une maximisation de leur utilité. Ce modèle a été développé (en partie) et utilisé dans le cadre du projet MOEBIUS.

Le modèle repose principalement sur la capacité des ménages à estimer la valeur de leur logement (ici assimilé au terrain), en fonction de leurs caractéristiques (type de ménage, revenus...) et de leurs préférences résidentielles. La valeur est calculée sur la base d'une utilité directe (Ettema, 2011) et non d'une utilité espérée. Cette estimation de valeur est faite par chaque ménage pour chaque cellule disponible. Dans le cas présent, la consommation résidentielle est logiquement unitaire, c'est-à-dire qu'à un ménage correspond un logement. De plus, il n'y a pas de consensus, ou *trade-off* entre les ménages (Waddell, 2002). L'utilité d'une cellule résidentielle pour un ménage comporte trois dimensions : la consommation de biens économiques (Z), les externalités vertes (G) et les externalités sociales (S), de sorte que l'utilité directe U est définie par une équation de type Cobb-Douglas :

$$U(Z, G, S) = ZG^\beta S^\gamma$$

Les variables β et γ traduisent les préférences individuelles des ménages. Elles servent à calibrer le modèle d'enchères en pondérant l'arbitrage entre externalités vertes et sociales. Afin de déterminer l'utilité d'un ménage, on calcule sa capacité à acheter des biens économiques (synonyme de « bonheur » en économie) en enlevant au revenu les coûts fixes, les coûts de transports ainsi que la rente foncière, ce qui donne Z , non pondéré dans l'équation précédente :

$$Z = Y - T - T_s - R$$

Avec :

Y = revenu du ménage

T = coût de transport pour se rendre au travail

T_s = coût de transport pour accompagner les enfants à l'école ¹

R = coût du logement (variable exogène du modèle)

En remplaçant Z dans le calcul de l'utilité, on obtient l'utilité indirecte, sous contrainte budgétaire, V :

$$V = (Y - T - T_s - R)G^\beta S^\gamma$$

L'objectif du ménage va être de maximiser son utilité en fonction de la différence entre la rente effective (celle qu'il va payer) et la rente de réserve (la rente maximale). Plus cette différence sera grande, plus la capacité Z du ménage à acheter des biens sera grande. C'est pourquoi on parle d'un modèle sous contrainte d'utilité, puisque le ménage obtient satisfaction en minimisant le prix de son « loyer » par rapport à celui qu'il peut au maximum payer en fonction de son revenu. Ceci est possible notamment puisque nous sommes situés dans un système où il y a théoriquement plus d'offre que de demande (Caruso *et al.*, 2007).

La rente d'enchère maximale pour un ménage est calculée en fonction de U , que l'on peut définir comme l'utilité de l'ensemble des autres ménages et qui est corrélée aux revenus Y de ces mêmes ménages. De cette sorte, nous sommes dans un modèle de ville fermée, où la compétition s'effectue entre les ménages du système. Nous sommes en situation d'équilibre à court terme à population donnée. Finalement, c'est le mécanisme de *market-cleaning* qui est à l'origine de la rente finale du fait de la compétition entre les ménages. Ce processus peut être schématisé en trois étapes :

1. Le calcul des possibilités d'enchère (Ψ) pour chaque ménage et pour chaque cellule, dérivée du calcul de l'utilité indirecte. Dans les paragraphes précédents, nous venons de décrire les modalités de calculs des capacités à enchérir pour les ménages. Plus l'utilité d'un ménage est importante, plus sa capacité à enchérir croît, comme le montre la figure 8.1.

$$\Psi = Y - T - T_s - U(G^\beta S^\gamma)$$

1. Ce paramètre n'est valable que pour les ménages avec enfants et s'ajoute au coût de déplacement pour se rendre au travail.

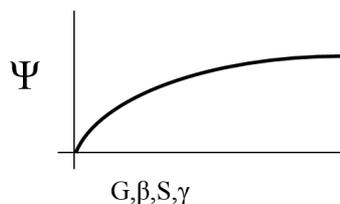


FIGURE 8.1 – Evolution des possibilités d'enchères en fonction des externalités pondérées par les préférences individuelles, d'après Caruso et C. Médard de Chardon, Conférence finale de MOEBIUS, 2013

2. L'allocation des ménages, en fonction du classement des enchères précédemment calculées. Il y a allocation quand l'enchère maximale pour une cellule rencontre le choix le plus satisfaisant pour un ménage. La figure 8.2 présente le principe général de cette étape.

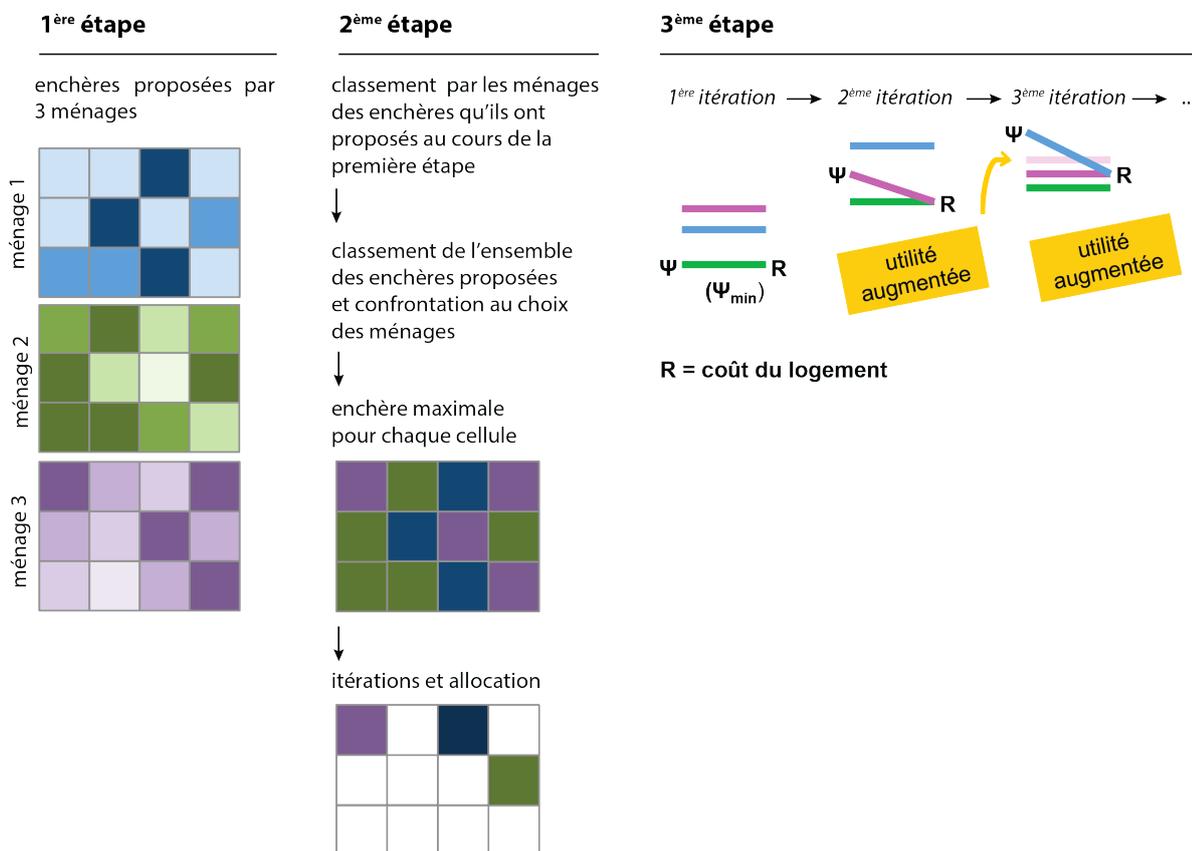


FIGURE 8.2 – Principe d'allocation entre les enchères et le choix des ménages, d'après G. Caruso et C. Médard de Chardon, Conférence finale de MOEBIUS, 2013

3. Le calcul de la rente finale et de l'utilité. Le calcul de la rente finale s'effectue à partir de la plus petite enchère remportée. L'ensemble des enchères sont minimisées et un nouveau calcul de l'utilité est effectué pour l'ensemble des ménages. Les rentes diminuent donc de façon uniforme afin que l'ensemble des utilités individuelles des ménages augmente, comme le montre la troisième étape de la figure 8.2. Ce processus est de nouveau itératif jusqu'à atteindre l'équilibre et qu'aucune utilité ne puisse plus augmenter au détriment d'une autre.

1.3. Description méthodologique du modèle

Le modèle d'allocation résidentielle nécessite deux entrées indispensables à son fonctionnement : 1) les ménages à localiser, 2) les lieux de localisation possibles pour ces ménages.

Il n'est légalement pas concevable de détenir et d'utiliser un fichier composé de l'ensemble de la population luxembourgeoise et de ses caractéristiques socio-économiques. De même, d'un point de vue prospectif, il n'existe pas encore de fichier de recensement de la population en 2030, il faut donc utiliser une population synthétique. Cette dernière reprend l'ensemble de la population du pays, où un habitant est représenté par une ligne dans un tableau. Les attributs (âge, genre, niveau d'éducation...) sont ensuite distribués aux individus tout en respectant les distributions statistiques observées à l'aide des recensements. La mise en ménage des individus est également effectuée, de sorte qu'on obtient deux tables liées. Une table contient les individus et leurs caractéristiques, l'autre les ménages et le lien aux individus qui les composent ainsi que certaines caractéristiques propres aux ménages. On obtient ainsi une population synthétique, qui se définit comme un ensemble numérique d'individus et de ménages, conformes aux réalités observées et représentant la population telle qu'elle existe empiriquement. La population synthétique est issue du projet MOEBIUS dans le cadre duquel elle a été développée, par l'équipe d'Eric Cornelis au Groupe de Recherche sur les Transports de Namur, en Belgique (Barthélémy et Toint, 2013).

Les localisations possibles de ces ménages sont les cellules simulées dans les scénarios d'aménagement. Ces cellules vont faire l'objet d'un traitement a posteriori afin de leur conférer un certain nombre de caractéristiques telles qu'elles sont prises en compte de le modèle d'allocation (ratio d'espaces verts, distance métrique à l'école la plus proche et distance-temps au centre-ville, densité de population avoisinante).

1.3.1. La population synthétique

La construction de la population synthétique s'effectue en deux étapes principales : 1) la construction de la population synthétique à l'année de référence (T_0) et 2) l'évolution de cette population jusqu'à l'horizon de simulation (T_1) et en fonction des projections démographiques.

La méthode employée pour générer la population en T_0 est celle de Bhat (Bhat et Guo, 2007). Elle s'appuie sur l'utilisation d'une fonction itérative (IPFP, *Iterative Proportional Fitting Process*), doublée d'une fonction aléatoire à partir d'un échantillon des distributions estimées. Le résultat est contrôlé à la fois au niveau individuel et des ménages.

Deux types de données ont été utilisées en entrée du modèle de génération de la population synthétique : 1) le recensement général de la population luxembourgeois, réalisé par le STATEC en 2001, 2) les données issues du panel du PSELL (Panel Socio-Économique sur la vie au Luxembourg), pour affiner certaines informations au niveau individuel.

Les attributs qui caractérisent les agents sont leur genre, leur âge, leur niveau d'éducation², la possession ou non du permis de conduire, la possession ou non d'un abonnement aux transports en commun, la catégorie socio-professionnelle, la nationalité, leur zone d'emploi³, le fait qu'ils soient actifs ou non et enfin le fait qu'ils soient au chômage ou non.

Au niveau du ménage, les attributs sont moins nombreux avec : la municipalité de résidence, le type de ménage (couple avec ou sans enfants, famille monoparentale, célibataire ou autre), le nombre d'individus qui composent le ménages et le nombre d'actifs qui font partie du ménage. Un extrait de la population synthétique est présenté dans la figure 8.3.

2. Représenté par le plus haut diplôme obtenu en date du recensement

3. Pour des raisons techniques, il n'a pas été possible d'utiliser les communes d'emploi, le Luxembourg a donc été découpé en six zones d'emplois

commune	id_ind	id_men	type men	taille men	actifs men	gender	age	educ	csp	natio	zone emploi	actif	chomage	permis	abo TC
BASCHARAGE	84840	31615	3	4	3	2	19	1	0	1	0	0	0	2	2
BASCHARAGE	84841	31615	3	4	3	1	53	2	0	1	0	0	0	1	2
BASCHARAGE	84842	31615	3	4	3	2	21	2	0	1	0	0	0	1	2
BASCHARAGE	84843	31615	3	4	3	2	46	1	3	1	4	1	0	1	2
BASCHARAGE	84856	31622	3	4	2	2	6	0	0	5	0	0	0	0	2
LUXEMBOURG	609969	446613	3	4	3	1	1	0	0	4	0	0	0	0	2
LUXEMBOURG	609970	446613	3	4	3	2	33	3	0	6	0	0	0	1	2
LUXEMBOURG	609971	446613	3	4	3	1	1	0	0	4	0	0	0	0	2
LUXEMBOURG	609972	446613	3	4	3	1	53	3	1	4	6	1	0	1	2
LUXEMBOURG	609973	446614	3	3	1	2	23	2	0	5	0	1	1	2	2

FIGURE 8.3 – Extrait de la population synthétique, attributs des individus et du ménage auquel il appartient, d'après E. Cornélis, Conférence finale de MOEBIUS, 2013

La seconde étape de calculs consiste à faire évoluer la population générée en T_0 , année par année jusqu'en T_1 . Pour ce faire, le modèle utilise les tendances observées des évènements possibles afin de déterminer les probabilités que ces évènements arrivent aux ménages ou aux individus. Le processus d'application des évènements est ordonné selon le déroulé suivant :

- l'âge : tous les ans, les agents vieillissent d'une année ;
- l'entrée dans la vie active et l'émancipation familiale : en fonction de l'âge et du niveau de diplôme, un nouveau ménage peut être créé, et le ménage des parents est mis à jour ;
- la CSP, l'emploi, le chômage, le permis de conduire ou l'abonnement aux transports en commun évoluent tous en fonction des grandes tendances observées au niveau du Luxembourg ;
- la retraite, à partir de 54 ans, et qui fait passer l'individu d'actif à inactif ;
- les naissances, possibles uniquement pour les individus en couple, en fonction du taux de fécondité et du nombre d'enfants déjà présents dans le ménage ;

- les décès, en fonction du taux de mortalité, pour les autres individus qui composent éventuellement le ménage du défunt, le type de ménage est mis à jour ;
- les séparations, en fonction d'un taux, pondéré par le nombre d'enfants dans le ménage, le ménage est donc divisé en un ménage célibataire et une famille monoparentale ;
- les unions, pour les individus célibataires, qui se font sur la base d'une recherche de proximité d'âge et de CSP : la localisation du futur ménage est aléatoire entre les précédentes localisations des deux individus ;
- les migrations, des individus ou ménages en provenance ou à destination du Luxembourg sont ajoutés ou retirés à la population résidente en fin de simulation.

Le calcul du revenu a été effectué après la simulation de la population synthétique, puisque nécessaire à l'allocation résidentielle et au calcul d'utilité. Le revenu a été calculé au niveau individuel pour les actifs, en respectant les moyennes observées au niveau national et en tenant compte de trois spécificités que sont : le genre (les hommes ont un revenu supérieur de 15% aux femmes), la catégorie socio-professionnelle et l'âge.

1.3.2. Les attributs spatiaux

Comme nous l'avons vu précédemment, l'allocation résidentielle est dérivée du calcul de l'utilité indirecte, calculée pour chaque ménage. Le « niveau de bonheur » des agents, fruit de cette utilité dépend de son revenu, de ses préférences et de sa localisation résidentielle qui a également certains attributs. Ces derniers sont représentés sur la figure 8.4.

La distance au centre-ville a été calculée en distance géométrique sur le réseau, et en temps de parcours, à l'aide de l'extension *Network Analyst* du logiciel de SIG ArcGIS. La distance à l'école la plus proche a été calculée en utilisant le même procédé. Le ratio d'espaces verts correspond à la part de surface en espaces verts autour d'une cellule donnée. Pour calculer ce ratio, des zones tampons de 100 mètres ont été générées autour de chaque cellule, puis les espaces verts ont été découpés en fonction de ces zones tampons. Le ratio a ensuite été obtenu en faisant le rapport de la surface en espace vert sur la surface totale de la zone tampon. Une méthode analogue a été employée pour calculer la densité de population dans un rayon de 100 mètres autour d'une cellule, cette densité représentant les externalités sociales. Enfin, la capacité des cellules en nombre d'habitants est issue

de la phase de construction des scénarios. Cette capacité permet de calculer combien de ménages peuvent habiter dans une même cellule.

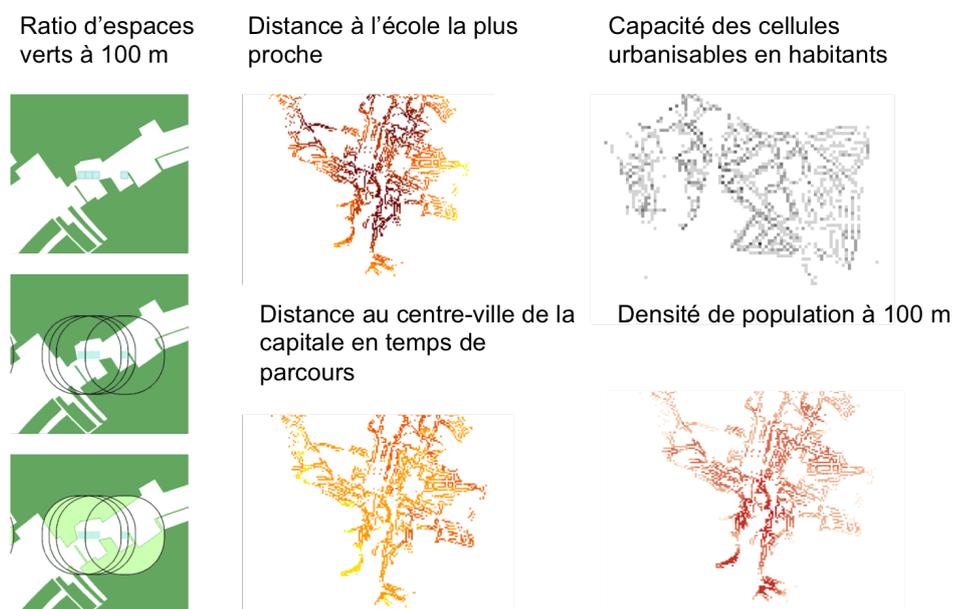


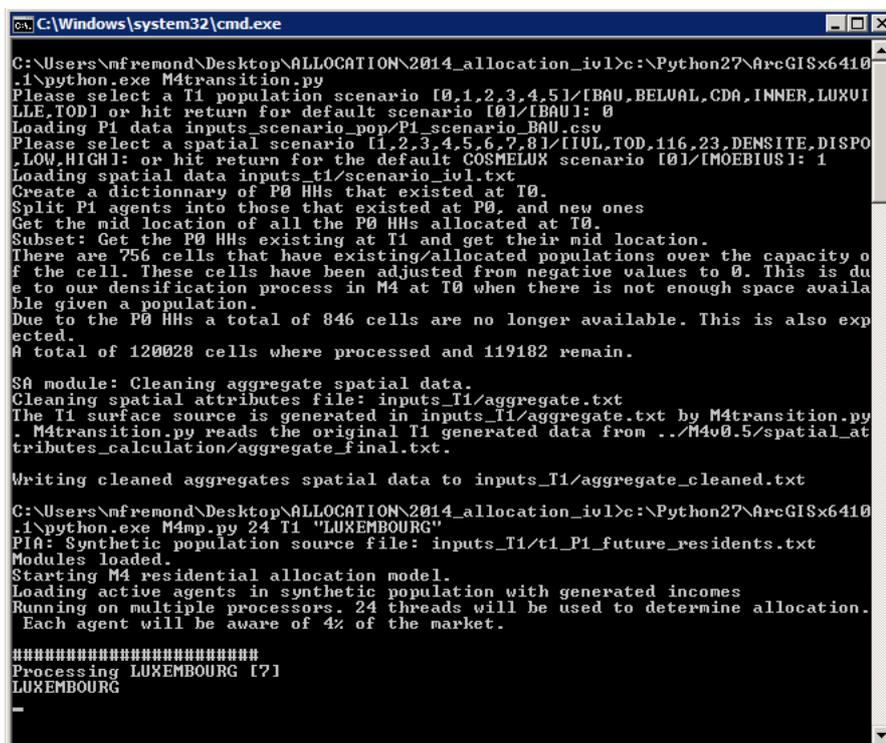
FIGURE 8.4 – Attributs des cellules urbanisables, d'après G. Caruso et C. Médard de Chardon, Conférence finale de MOEBIUS, 2013

Une fois l'utilité indirecte obtenue, ce qui constitue la première étape du calcul de l'allocation résidentielle, nous pouvons passer à l'application du modèle d'enchères, dont les principes sont rappelés dans l'encart technique 8.5.

Sur le plan technique, le modèle d'allocation résidentielle se présente sous la forme de scripts exécutables en langage Python (version 2.7). Il fonctionne selon un processus stochastique et une méthode dite de Monte Carlo. L'exécution de ce programme nécessite l'utilisation d'un serveur de calcul afin de pouvoir lancer en parallèle, c'est-à-dire sur plusieurs processeurs, plusieurs calculs en même temps et de réduire les temps d'analyses. D'abord conçu pour fonctionner sur le serveur de calcul de l'Université de Luxembourg, le modèle a très bien fonctionné sur le serveur de la MSHE C.N. Ledoux de Besançon.

La capture d'écran ci-dessous présente le modèle en fonctionnement. Une fois le modèle exécuté en T_0 , il doit être lancé pour chaque scénario en T_1 , soit huit fois dans notre cas. Entre les deux étapes, une transition permet d'établir les différences entre les deux périodes. Tout d'abord il faut déterminer les cellules disponibles en T_1 , et donc la population qui peut y être localisée. Par la suite, il est nécessaire de définir les ménages qui ne sont pas relocalisés et ceux qui doivent l'être. Les ménages déjà localisés en T_0 ne font pas l'objet d'une nouvelle allocation. Les nouveaux ménages sont issus des étapes de décohabitation, émancipation du domicile parental ou séparation. À ces nouveaux ménages s'ajoutent les migrants qui constituent la plus grande partie des ménages à localiser. Une dernière étape de calcul, dite de consolidation, permet de joindre la population en T_0 (moins les nouveaux ménages) à la population localisée en T_1 .

La validation du modèle est faite sur la base des projections démographiques du STATEC, qui ont été effectuées au niveau communal. Pour laisser une large place aux choix individuels des agents quant à leur localisation, ces projections ont été ramenées à l'échelle des cantons. Suivant les scénarios, un nombre plus ou moins grand de communes peuvent ne pas être sujettes à ne nouvelles localisations résidentielles.



```
C:\Windows\system32\cmd.exe
C:\Users\mfremond\Desktop\ALLOCATION\2014_allocation_iv1>c:\python27\ArcGISx6410
.\python.exe M4transition.py
Please select a T1 population scenario [0,1,2,3,4,5]/[BAU,BELVAL,CDA,INNER,LUXVI
LLE,TOD1] or hit return for default scenario [0]/[BAU]: 0
Loading P1 data inputs_scenario_pop/P1_scenario_BAU.csv
Please select a spatial scenario [1,2,3,4,5,6,7,8]/[IUL,TOD,116,23,DENSITE,DISPO
,LOW,HIGH] or hit return for the default COSMELUX scenario [0]/[MOEBIUS]: 1
Loading spatial data inputs_t1/scenario_iv1.txt
Create a dictionary of P0 HHs that existed at T0.
Split P1 agents into those that existed at P0, and new ones
Get the mid location of all the P0 HHs allocated at T0.
Subset: Get the P0 HHs existing at T1 and get their mid location.
There are 756 cells that have existing/allocated populations over the capacity o
f the cell. These cells have been adjusted from negative values to 0. This is du
e to our densification process in M4 at T0 when there is not enough space availa
ble given a population.
Due to the P0 HHs a total of 846 cells are no longer available. This is also exp
ected.
A total of 120028 cells were processed and 119182 remain.

SA module: Cleaning aggregate spatial data.
Cleaning spatial attributes file: inputs_T1/aggregate.txt
The T1 surface source is generated in inputs_T1/aggregate.txt by M4transition.py
. M4transition.py reads the original T1 generated data from ../M4v0.5/spatial_at
tributes_calculatation/aggregate_final.txt.

Writing cleaned aggregates spatial data to inputs_T1/aggregate_cleaned.txt

C:\Users\mfremond\Desktop\ALLOCATION\2014_allocation_iv1>c:\python27\ArcGISx6410
.\python.exe M4mp.py 24 T1 "LUXEMBOURG"
P10: Synthetic population source file: inputs_T1/t1_P1_future_residents.txt
Modules loaded.
Starting M4 residential allocation model.
Loading active agents in synthetic population with generated incomes
Running on multiple processors. 24 threads will be used to determine allocation.
Each agent will be aware of 4% of the market.

#####
Processing LUXEMBOURG [7]
LUXEMBOURG
-
```

FIGURE 8.5 – Encart technique : principes techniques du modèle d'allocation résidentielle

2. Résultats du modèle d'allocation résidentielle

Cette section présente les résultats du modèle d'allocation pour les trois scénarios retenus : IVL, FOD et 23 communes. Une représentation de ces résultats dans nos cellules de 20 mètres n'étant pas possible, les résultats ont été agrégés à l'échelle communale. Un parallèle peut être fait avec les constats du chapitre 2 concernant les dynamiques démographiques et résidentielles en vigueur au Luxembourg. Ces résultats dépendent des scénarios de croissance résidentielle tels qu'ils ont été définis dans le chapitre 6, soumis au modèle économique d'allocation résidentielle, et donc de l'arbitrage des agents de la population synthétique. Nous verrons également l'intérêt de rapprocher les variations relatives, entre la situation initiale et nos scénarios en 2030, avec le nombre de nouveaux ménages dans chaque commune.

La population (synthétique) en 2010 comptait 441 069 individus répartis dans 171 953 ménages. Conformément aux projections démographiques établies par le STATEC, 720 738 individus composent la population en 2030, avec 351 241 ménages. Cette différence revient à l'ajout de 279 669 individus entre les deux dates, soit 179 288 ménages supplémentaires. Comme cela a déjà été évoqué dans le chapitre 2, cette dynamique de population (des individus et surtout des ménages) fait du Luxembourg un laboratoire unique de modélisation et de simulation.

Les communes en bleu clair, sur les cartes 8.6, 8.7 et 8.8 sont celles où la population décroît ou n'augmente pas. De fortes variations négatives, allant jusqu'à 60% peuvent être observées. Ces variations s'expliquent par le fait que les scénarios sont restrictifs au niveau communal : si aucune cellule potentiellement urbanisable n'a été définie, aucun nouveau ménage ne pourra venir y habiter. Les variations négatives de population sont donc la conséquence des variations naturelles de population et des mouvements qui y sont associés (les décohabitations, les séparations et les décès). Dans les communes très peu peuplées, et à un horizon de vingt ans, on peut imaginer que les décès peuvent constituer une part de variation conséquente du nombre total de résidents.

2.1. Le scénario IVL

Dans le scénario IVL, notre scénario de référence, la croissance résidentielle a lieu dans pratiquement toutes les communes, à l'exception d'une quinzaine, en bleu clair sur la carte 8.6. La majorité de ces municipalités est localisée dans un ensemble contigu, entre la *Nordstad* et Wiltz. À l'inverse, les communes qui voient leur population fortement augmenter se répartissent de façon assez homogène sur le territoire, indépendamment du nombre absolu de nouveaux résidents.

La commune qui accueille le plus de nouveaux ménages (15 683) est la capitale Luxembourg-Ville, la croissance de sa population étant de 45%. Les deux communes suivantes sont Sanem et Wiltz. Sanem voit sa population plus que doubler avec la localisation de 9 588 nouveaux ménages, ainsi la population initiale de 4 951 ménages triple, pour atteindre 14 539 ménages résidents en 2030. À Wiltz, le nombre de ménages est pratiquement multiplié par six entre 2010 et 2030, faisant passer le nombre de ménages de 1 627 à plus de 10 543. Un certain nombre d'autres communes prioritaires connaissent une croissance conséquente : Bascharage (160%), Bertrange (350%), Redange (410%), Merttert (166%), Junglinster (167%), Mersch (183%), Mamer (158%) ou Strassen (103%). Pé-tange, Grevenmacher ou l'agglomération de la *Nordstad* connaissent également une dynamique importante. Dans l'ensemble, la majeure partie des nouveaux ménages se situent dans la moitié sud du pays, correspondant aux cercles les plus grands de la carte 8.6.

La localisation de nombreux ménages dans le nord du pays pourrait surprendre, notamment en ce qui concerne la commune d'Heinerscheid, 2 232 nouveaux ménages (+700%) à la frontière avec l'Allemagne. Comme le montre la carte 6.1 (voir chapitre 6), un potentiel conséquent de cellules a été généré dans le nord du pays avec des localités bien évaluées. Par contre, la croissance dans le nord s'effectue majoritairement dans les communes périphériques : Wincrange (143%), Troisvierges (237%), Heinerscheid ou Hosingen (300%) ; et non dans la commune plus centrale de Clervaux, qui connaît tout de même une croissance de 546 ménages, soit 88%.

L'un des résultats les plus marquants est la localisation de peu de nouveaux ménages dans la communes d'Esch-sur-Alzette (662 ménages, +5,5%). C'est pourtant la deuxième ville du pays et sa situation, au cœur du bassin minier, lui confère un intérêt majeur. Le scénario IVL a conduit la génération de plus de 2 000 cellules, donc approximativement la possibilité de localiser 3 000 ménages. À la suite du modèle d'allocation, il semblerait que la préférence des agents se soit tournée vers les communes voisine de Sanem ou Kayl (4 922 ménages, +183%). Parmi les hypothèses que soulève ce résultat, l'accessibilité aux aménités, notamment aux espaces verts, pourrait être relativement meilleure dans les municipalités contiguës à Esch-sur-Alzette.

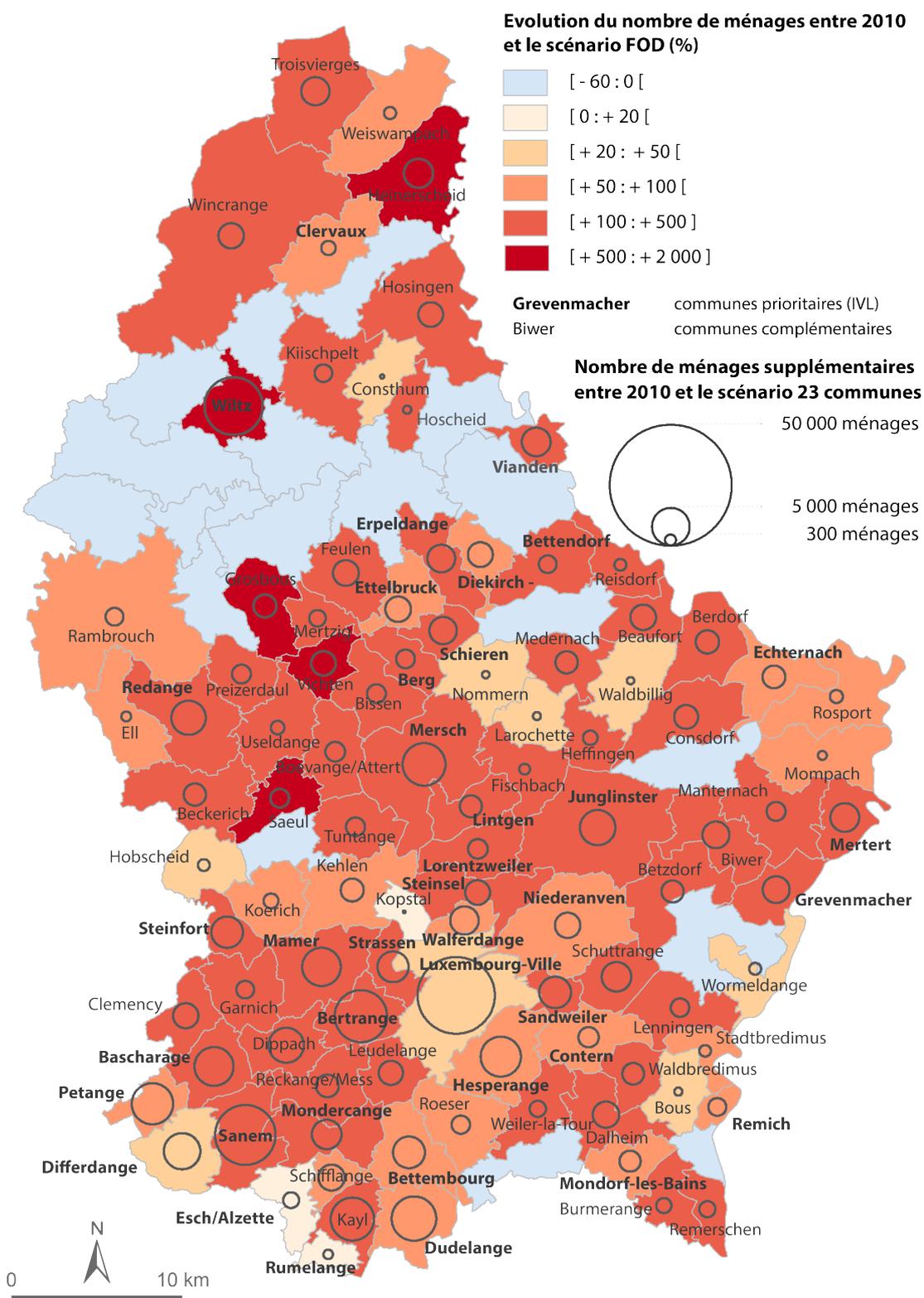


FIGURE 8.6 – Résultats de l'allocation résidentielle à l'échelle communale pour le scénario IVL

2.2. Le scénario FOD

Le scénario FOD apporte un niveau de contrainte beaucoup plus important que le scénario IVL puisque la croissance démographique est circonscrite dans moins d'une quarantaine de communes. La carte 8.7 révèle des contrastes entre ces différentes communes et montre une nouvelle différenciation spatiale au niveau global.

La municipalité qui accueille le plus de nouveaux résidents n'est plus la capitale Luxembourg-Ville. Schuttrange (+15 843 ménages, 1 052 en 2010), Betzdorf (+12 881 ménages, 774 en 2010) et Betrange (+14 257 ménages, 2 047 en 2010) totalisent un quart des nouveaux ménages, comme pouvait le laisser présager le nombre de cellules urbanisables générées avec ce scénario. Le chapelet de communes bien desservies par le train entre Walferdange et la Nordstad voit également sa population augmenter fortement. Il en va de même pour quelques communes au nord du pays, notamment Kiischpelt (+5 233 ménages, 316 en 2010) et Troisvierges (+8 153, 890 en 2010) qui, malgré un fort éloignement au centre de la capitale⁴, connaissent une forte croissance démographique. Comme dans le scénario IVL, la commune de Clervaux, bien qu'ayant une croissance relative conséquente (230%), reçoit assez peu de nouveaux ménages (+1 426). Les communes du sud minier, bien pourvues en infrastructures ferroviaires, supportent également une croissance soutenue de leur nombre d'habitants. Esch-sur-Alzette, qui comporte deux gares, est l'une des seules de cette zone à ne pas recevoir de nouveaux ménages dans le cadre du scénario FOD, malgré plus de 400 cellules potentiellement urbanisables dans la commune et la présence de deux gares ferroviaires. À l'issue du modèle d'affectation, les futurs ménages ont préféré, une nouvelle fois, les municipalités voisines de Kayl (255%), Differdange (112%), Bettembourg (130%) et plus au nord, Steinfort (520%), du fait de l'arbitrage entre les différentes composantes du calcul de l'utilité : l'accessibilité aux aménités et les coûts de transports à la capitale.

Lors la présentation du scénario, on remarquait que quelques communes où se trouvent des gares ferroviaires ne sont pas définies comme potentiellement urbanisables. Il s'agit de Leudelange, pourtant à proximité immédiate de Luxembourg, Manternach, non loin du centre de Merttert, Erpeldange et Bourscheid (voisines de la Nordstad) et Weiswampach entre Troisvierges et Clervaux. Le nombre d'aménités dans ces communes reste limité, et sans cellules à urbaniser dans le scénario, il n'est pas possible que des ménages puissent s'y localiser par le processus d'allocation.

Finalement, le résultat du modèle d'allocation confirme l'organisation spatiale du scénario, avec

4. La distance en temps et en kilomètre à Luxembourg-Ville fait partie du calcul de l'utilité dans le modèle d'allocation.

trois axes de développement principaux autour de la capitale. Le premier part vers le nord, tout le long de la voie ferrée. Le deuxième se dirige vers l'est et la frontière avec l'Allemagne et le dernier occupe tout la partie sud ouest du pays avec le bassin minier. La comparaison des scénarios en matière de mobilité quotidienne devrait apporter de nouveaux éléments face à cette structuration contrainte du développement résidentiel au niveau national. Les agents utiliseront-ils davantage les transports en commun en raison de leur proximité géographique aux infrastructures ferroviaires ?

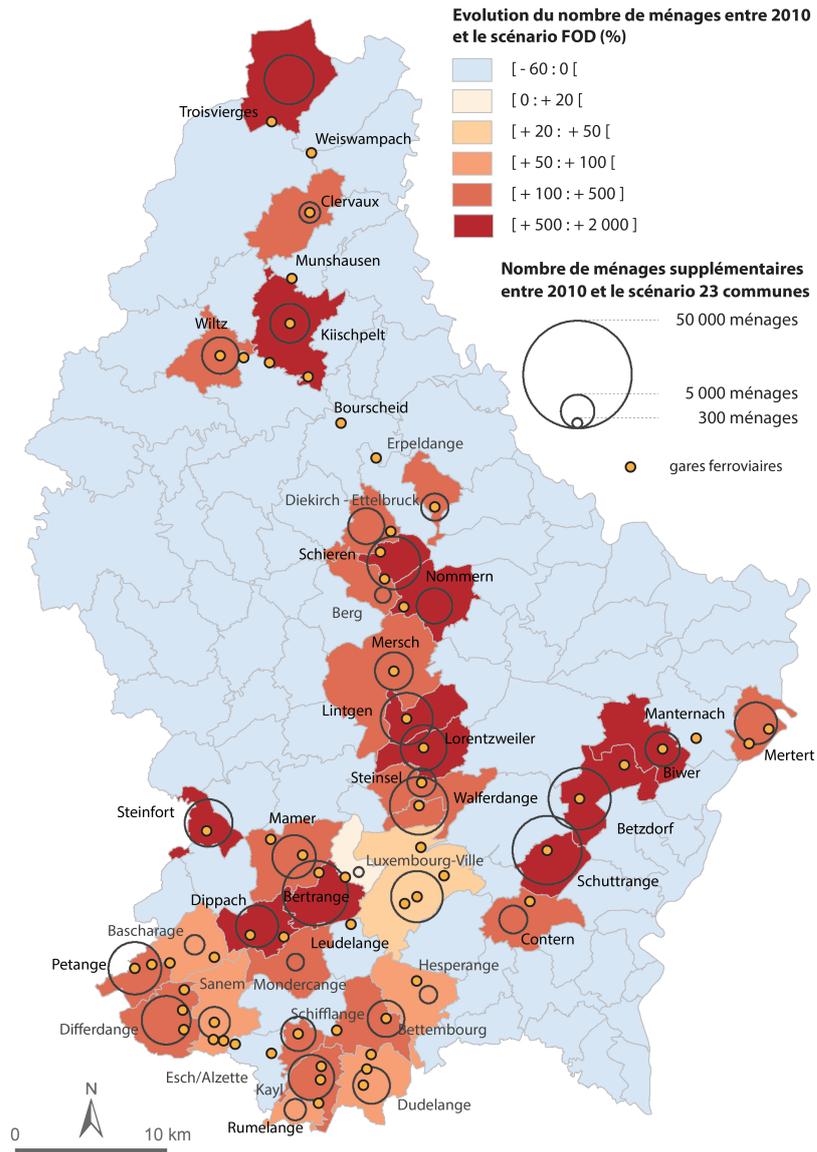


FIGURE 8.7 – Résultats de l'allocation résidentielle à l'échelle communale pour le scénario FOD

2.3. Le scénario des 23 communes

Le scénario des 23 communes est le plus contraignant des scénarios, de par la localisation du développement résidentiel dans les trois pôles économiques du pays. Des suites du processus d'allocation résidentielle, la plupart des communes retenues connaissent une croissance très forte de leur population.

Avec 61 772 nouveaux ménages (1/3 du total des nouveaux ménages), Luxembourg-Ville accueille le plus de résidents, soit une augmentation de 175% par rapport à 2010. Les communes limitrophe d'Hesperange, Sandweiler et Walferdange intègrent une partie de cette centralité. La commune de Mamer, pourtant non adjacente à la capitale fait également partie du pôle central : sa croissance démographique, de 8 728 ménages, augmente donc de façon conséquente. L'agglomération de la Nordstad est le deuxième siège d'une forte croissance de population, avec 66 812 nouveaux ménages. Seule la commune de Berg, pourtant comprise dans cette agglomération et comportant un potentiel de près de 1 000 cellules potentiellement urbanisables dans le scénario, n'a pas partagé la dynamique des communes voisines.

Dans le sud, Sanem (+11 026 ménages) est une nouvelle fois la commune qui connaît le plus fort développement suivi des localités de Bascharage et Kayl. Dans le cadre de ce scénario, Clemency possède un fort développement du fait de sa relative proximité à la capitale ; elle reçoit 4 692 nouveaux ménages (+ 611%). Schiffange, dont le potentiel théorique s'élevait à 2 600 ménages d'après le scénario, a subi une évolution plus modérée que prévue, avec une croissance de 35%. Comme dans le scénario FOD, un résultat inattendu réside dans le fait qu'Esch-sur-Alzette n'accueille aucun nouveau ménage, malgré un potentiel de plus de 5 000 cellules urbanisables, probablement pour les raisons évoquées pour les scénarios IVL et FOD. Rumelange perd elle, de la population du fait des dynamiques naturelles de la population alors que les cellules urbanisables créées par simulation pouvaient accueillir 1 200 ménages.

Selon ce scénario, la population du Luxembourg en 2030 résidera dans 20 des 116 communes. Avec une structure spatiale aussi marquée, il semble légitime de s'interroger sur les comportements de mobilité qui en découleront. Les résultats des mesures d'accessibilité spatiale ont été meilleurs pour ce scénario du fait du caractère spatialement limité du développement résidentiel. Il importe maintenant de mesurer les conséquences des scénarios sur les comportements de mobilité. , avec la présentation de la plateforme MobiSim - MQ⁵, puis des résultats de simulation obtenus.

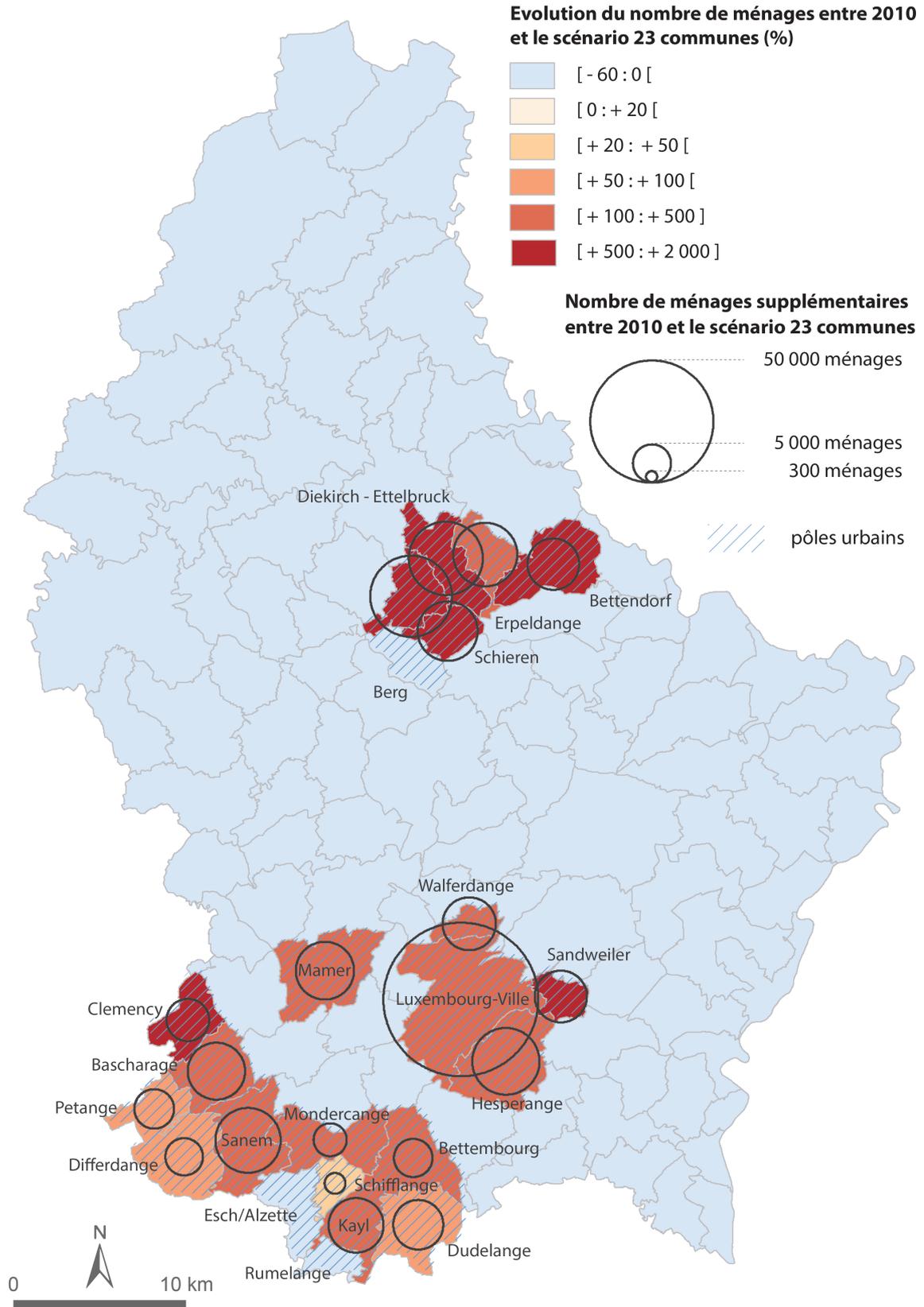


FIGURE 8.8 – Résultats de l'allocation résidentielle à l'échelle communale pour le scénario des 23 communes

3. Application d'un modèle de simulation des mobilités quotidiennes, MobiSim - MQ

Le modèle de mobilité quotidienne permet de ré-interroger, à une échelle désagrégée, le potentiel d'offre urbaine, tel qu'exploré au travers des mesures d'accessibilité aux aménités. L'application d'un modèle de mobilité quotidienne permet de vérifier et de valider l'accessibilité potentielle aux aménités. Autrement dit, est-ce que les normes d'aménagement appliquées dans la définition des scénarios de croissance résidentielle influencent les pratiques de mobilité dans le sens désiré ?

La modélisation de la mobilité quotidienne des individus se base sur plusieurs étapes qui se réfèrent en premier lieu aux activités des individus et des ménages. À partir de ces activités, un « programme d'activités » peut être construit pour chaque agent. Les déplacements associés à ce programme d'activités sont alors simulés avec un modèle qui se rapproche des modèles à quatre étapes (voir figure 8.9), classiques pour ce genre d'opérations. Cette modélisation permet d'introduire dans MobiSim - MQ la génération et de la distribution des déplacements, du choix modal et de l'affectation du trafic sur les différents réseaux. Le calibrage et la validation du modèle ne s'effectue que pour la situation initiale en 2010 à partir des données connues.

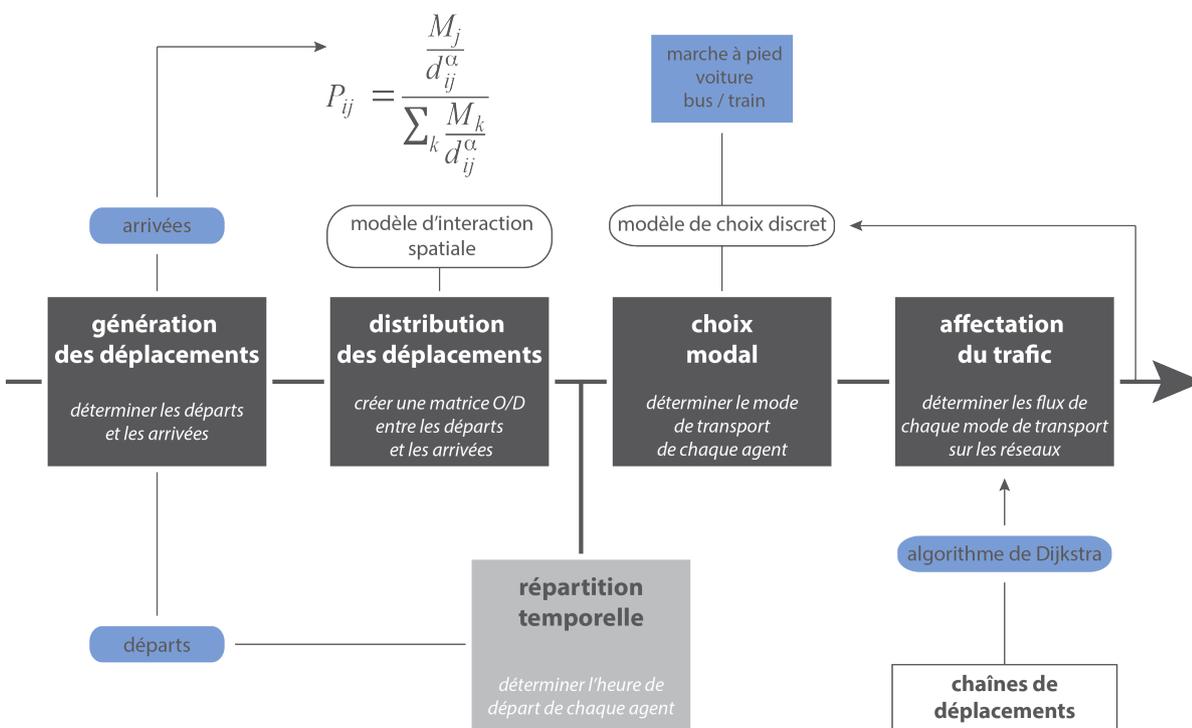


FIGURE 8.9 – Fonctionnement du modèle de simulation des mobilités quotidiennes de MobiSim, d'après Antoni (2010)

3.1. Génération, répartition temporelle et distribution des déplacements

D'un point de vue technique, la distribution des flux de déplacements dans MobiSim s'effectue en deux étapes : 1) la génération du programme d'activités des agents pour une journée, sachant que chacune de ces activités est soumise à un certain nombre de contraintes horaires ; 2) la distribution des déplacements en reliant le lieu de départ des agents (leur domicile par exemple), au lieu d'arrivée (le travail, un commerce, un loisir...) dans le cadre de ce programme. Le calcul se fonde sur un modèle d'interaction spatiale.

Ces deux étapes ne sont pas indépendantes du temps : elles sont calculées pour un jour ouvré standard (le mardi 17 septembre 2013 dans notre cas) et se succèdent au cours de cette journée selon une logique qui permet aux agents d'optimiser leurs activités et leurs déplacements en termes d'origine et de destination. L'ensemble des activités sont intégrées à une chaîne de déplacements, qui tient compte des pérégrinations, c'est-à-dire la prise en compte d'activités secondaires au cours d'un trajet entre deux activités principales de la journée, comme effectuer un achat entre le travail et le retour au domicile. Huit motifs de déplacements principaux ont été intégrés dans le programme d'activités des agents : le travail, la recherche d'emploi, les études, le recours à des commerces ou services, les loisirs, le réseau social, l'accompagnement scolaire et le travail frontalier⁶. La probabilité de réaliser une activité dépend des caractéristiques des agents. Une activité est également caractérisée par sa durée (plus ou moins un écart-type de temps), une priorité de réalisation (le travail, accompagnement des enfants et seulement après, si c'est possible, des achats ou des loisirs), et une heure de départ.

Les programmes d'activités simulés permettent de répondre aux questions suivantes : quels agents font quoi, quand, comment et pendant combien de temps ? Il reste toutefois la question primordiale du où ? C'est l'étape de distribution des déplacements. Cette distribution repose sur un modèle d'interaction spatiale, tel que proposé par Huff (1964), et construit autour de trois postulats : la complémentarité (entre les lieux), la friction de la distance (avec une pondération possible en fonction du motif de déplacement) et l'absence de substitution (qui nécessite de tester toutes les combinaisons de complémentarité et de distances entre les lieux). Les destinations des déplacements sont différenciées par motifs, et agrégés selon une grille de 100 mètres de côté dans l'optique de définir des polarités en limitant le nombre de destinations possibles.

6. Afin de tenir compte des flux de frontaliers et donc de charger le réseau routier aux heures de pointe, les flux automobile en provenance d'Allemagne, de Belgique et de France sont pris en compte. Cependant, les pérégrinations de cette main d'œuvre ne sont pas incluses dans le modèle, sachant que plus de 54% d'entre eux se contentent d'un simple trajet domicile-travail (Schmitz et al., 2012).

3.2. La distribution des déplacements selon les motifs

3.2.1. Le travail

Le motif *travail* concerne les actifs ayant un emploi. D'après une enquête du CERTU sur les temps de la ville et les modes de vie (2001), 20% des actifs ne se rendent pas quotidiennement au travail (maladie, congés ou déplacement professionnel). La règle est donc que 80% des actifs se rendent au travail, partent entre 4h et 10h avec une pointe à 7h, pour une durée de 9h (les 8h de travail réglementaire, plus la pause déjeuner). Le travail peut intégrer ou non un retour au domicile au cours de la pause déjeuner. Au Luxembourg, 20% des actifs rentrent chez eux le midi pour déjeuner, la journée est donc découpée en deux selon le même principe. Il peut également être réalisé à temps partiel (30% des femmes au Luxembourg, d'après Boush et Gerber (2001)) et finir plus tôt dans l'après-midi, avec un retour vers 15h.

Les destinations du travail sont les zones d'emplois, les zones mixtes et les zones publiques telles que définies dans les Plans d'Aménagement Généraux. Le nombre d'emplois par commune (STAT-TEC, 2010) a été ventilé dans ces zones, de sorte que le passage par le carroyage à 100 mètres de résolution rende compte de la structure spatiale des emplois à l'échelle communale.

3.2.2. La recherche d'emploi

La *recherche d'emploi*, pour les actifs sans emploi, représente les mobilités quotidiennes effectuées par les personnes en recherche d'un emploi, comme se rendre à l'Agence pour le Développement de l'Emploi ou en entretien dans les lieux d'emplois. Les départs ont lieu tout au long de la journée, pour une durée moyenne de 3h.

Les destinations des recherches d'emploi sont les mêmes que pour le motif travail.

3.2.3. Les études

Les *études* concernent les lycéens et les étudiants à l'Université, pour se rendre à leur établissement de façon autonome lorsqu'ils résident encore chez leurs parents. Les départs s'effectuent en matinée (de 6 à 10h), pour une durée de 8 heures, plus ou moins une heure.

Les destinations pour les études sont les lycées et les établissements de l'Université. Les effectifs de 2013 permettent de pondérer les établissements en fonction de leur taille, de manière à les

prendre en compte de façon assez réaliste dans le modèle d'interactions spatiales.

3.2.4. Le recours aux commerces et services

Les *achats*, ou le recours à des services, concernent l'ensemble des individus. La fréquence de recours est quotidienne, hebdomadaire ou mensuelle selon l'aménité en question. Au Luxembourg, certains établissements fermant tôt, deux horaires de fermetures ont été intégrés afin de contraindre le programme d'activité, 18h30 et 20h30. N'ayant aucune information sur les horaires de fréquentation des commerces au Luxembourg, les règles existantes de MobiSim ont été utilisées (paramétrées selon l'Enquête Ménage Déplacements de Besançon), en adaptant les horaires aux fermetures des magasins au Grand-Duché. Trois pics de départ peuvent être observés, à 10h, 12h (pour le déjeuner) et entre 17h et 19h après le travail pour les actifs. Cette activité dure 30 minutes plus ou moins 25 minutes.

Les données de commerces et services utilisées précédemment dans la thèse ont permis de créer la carte des destinations, carroyée à 100 mètres de résolution, pour ce motif. Des masses ont été attribuées à ces commerces ou service, sur la base de leur rayonnement (local ou global), leur fréquence de recours et leur attractivité intrinsèque⁷. La méthode de calcul des masses de commerces et services est présentée en annexe.

3.2.5. Les loisirs

Concernant les *loisirs*, les règles de fonctionnement sont les mêmes que pour les achats, mais la probabilité de réaliser cette activité est un peu plus faible. Le paramétrage de cette activité est issu de l'enquête sur les pratiques culturelles au Luxembourg (Culture 2009, LISER) qui comprend de nombreuses questions sur les loisirs des Luxembourgeois (sports, culture, sorties...). Un arbre de décision a été appliqué sur ces données et trois règles de déplacements ont pu être ainsi définies, en fonction des caractéristiques socio-économiques des ménages. Le détail des arbres de décision figure en annexe. Ainsi, les retraités ont une probabilité journalière de 43% de pratiquer un loisir, les salariés et actifs sans emplois 52% et les étudiants 79%.

7. « Il s'agit du pouvoir d'attraction d'un commerce sur la clientèle, indépendamment de l'attraction exercée par le noyau commercial dont fait partie ce commerce. Les "locomotives" en particulier (gros hypermarchés, grandes surfaces spécialisées [...]) sont des établissements bénéficiant d'une forte attractivité intrinsèque. C'est aussi le cas des maxi-discomptes et de certains magasins particulièrement réputés ou très spécialisés. » (Tannier, 2003)

Les données d'aménités vertes et de loisirs utilisées précédemment dans la thèse ont servi à créer la carte des destinations, carroyée à 100 mètres de résolution, pour ce motif. Des masses d'attractivité différenciées ont été appliquées aux différents types de loisirs (voir annexes).

3.2.6. Le réseau social

La fréquentation du *réseau social* permet à chaque agent de visiter sa famille ou ses amis, dans le cadre d'activités qui pourraient s'assimiler aux commerces, services ou loisirs, mais qui ont lieu au domicile des personnes visitées. La base Culture 2009 a également été employée pour définir les profils de déplacements. Les moins de 25 ans (étudiants pour une partie) ont une probabilité de déplacement quotidienne de 36% contre 21% pour les autres agents. Les destinations du réseau social correspondent à la carte de population totale issue du modèle d'allocation résidentielle, carroyée à 100 mètres de résolution. Il en ressort des zones plus ou moins denses en habitants, donc en possibilités d'interactions sociales.

3.2.7. L'accompagnement scolaire

L'*accompagnement scolaire* désigne le fait que les parents conduisent leur(s) enfant(s) à l'école le matin et viennent les chercher le soir. Ce motif de déplacement concerne bien sûr uniquement les ménages avec enfants. Si les enfants ont moins de 12 ans, alors la probabilité des parents de les accompagner est de 30%, sinon elle est de 15% (Bousch et Gerber, 2001). L'âge de 12 ans représente la rentrée au collège / lycée pour les élèves luxembourgeois⁸. Les élèves bénéficient alors d'un ramassage scolaire qui n'est pas simulé, puisqu'indépendant des lignes régulières de transports en commun.

Les crèches et les écoles fondamentales (primaires) sont les destinations de l'accompagnement scolaire. Il n'y a pas de masses d'attractivité pour ce motif. Pour le choix d'une destination, on se base sur le plus proche voisin de l'origine du déplacement.

3.2.8. Le travail frontalier

Le motif *travail frontalier* permet d'attribuer aux agents frontaliers un programme d'activité spécifique qui est de venir travailler au Luxembourg sans effectuer d'autres activités. On dénombre 64 131 frontaliers qui : 1) utilisent leur voiture pour se rendre au travail ; 2) se rendent au travail, hors

8. Au Luxembourg, la scolarité du collège et du lycée s'effectue généralement au sein du même établissement.

maladie, congés ou déplacement professionnel (80% des actifs) ; 3) partent entre 5h et 9h (Schmitz et al., 2012). Les frontaliers se rendent dans les mêmes zones d'emplois que les résidents, telles que définies précédemment. La population des frontaliers a été ajoutée à ce moment de la démarche, puisqu'ils n'ont pas participé au processus d'allocation résidentielle. Les agents frontaliers ont tous les mêmes caractéristiques socio-démographiques, d'âge, de CSP, de revenus... Ils résident dans les centroïdes des communes frontalières conformément à la répartition observée dans le cadre de l'Enquête Mobilité Frontaliers (Schmitz et al, 2012).

La figure 8.10 présente les boîtes de dialogues de MobiSim qui permettent de générer les programmes d'activités des agents. Chaque activité (première boîte en haut à gauche) fait l'objet de règles (deuxième boîte), en fonction des caractéristiques des agents ou des ménages. Ces règles sont des probabilités conditionnelles de réaliser ou non cette activité. Dans notre exemple, les actifs (activités comprises entre 1 et 6) ont 20% de probabilité de réaliser une activité *réseau social* au cours de la journée. La dernière étape (troisième boîte en bas à droite) sert à définir les modalités temporelles de cette activité, qui peut dans cet exemple se dérouler entre 9h et 20h, pour une durée moyenne d'une heure trente, avec un écart-type d'une demi-heure.

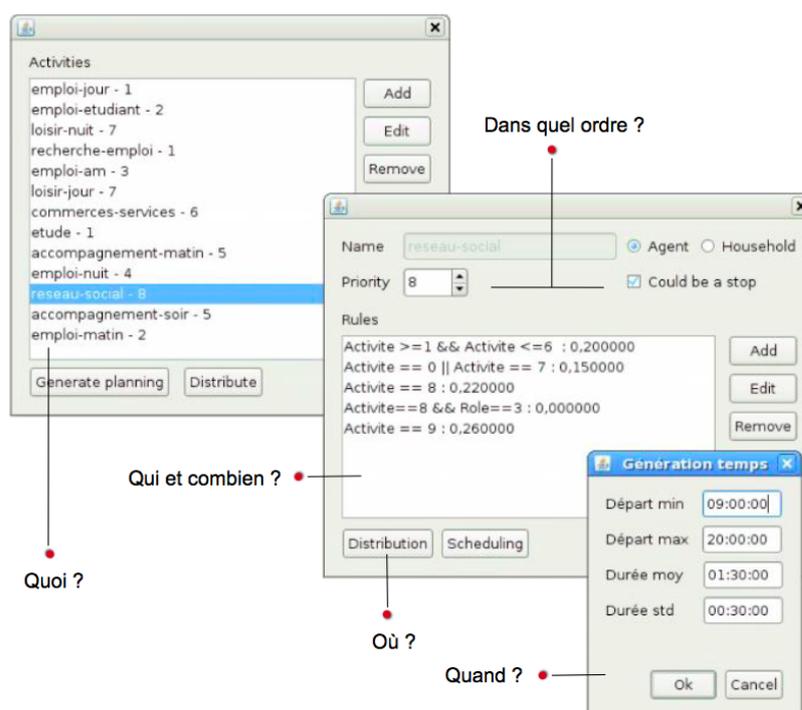


FIGURE 8.10 – Boîtes de dialogue pour la construction des programmes d'activité, Antoni (2012)

Le résultat de la génération des programmes d'activités est représenté pour exemple sur la figure 8.11. Les heures de départ sont représentées pour chaque motif des 1,68 millions de déplacements

simulés pour l'année 2010. Dans la première moitié de la journée, le plus grand nombre de départs concernent les actifs (ici ceux qui partent la journée sans coupure le midi), avec plus de 100 000 départs entre 7h et 9h à l'heure de pointe. Les agents qui partent faire des achats sont également assez nombreux, avec plus de 67 000 départs avant midi. On y trouve les retraités mais également des actifs qui réalisent un achat avant de se rendre sur leur lieu de travail. De la même manière, plus de 33 000 départs pour effectuer des loisirs sont effectués en matinée. Les étudiants, conformément à la règle définie dans le modèle, partent tous entre 6 et 10h, soit près de 3 000 déplacements au cours de cette période. L'accompagnement scolaire implique 10 000 départs le matin, mais près de 37 000 l'après-midi au retour de l'école. Cette deuxième moitié de la journée est d'ailleurs plus propice aux loisirs, avec 124 000 départs, ou aux achats, avec 147 000 déplacements, notamment effectués après la pause déjeuner ou à la sortie du travail aux alentours de 18h. Les visites à la famille ou des amis sont également faites majoritairement en fin de journée (près de 72 000 déplacements contre 20 000 avant midi). Enfin, les retours au domicile, s'ils commencent dès 9h pour les agents les plus matinaux, s'étalent tout au long de la deuxième moitié de la journée avec un pic de déplacements entre 19 et 21h.

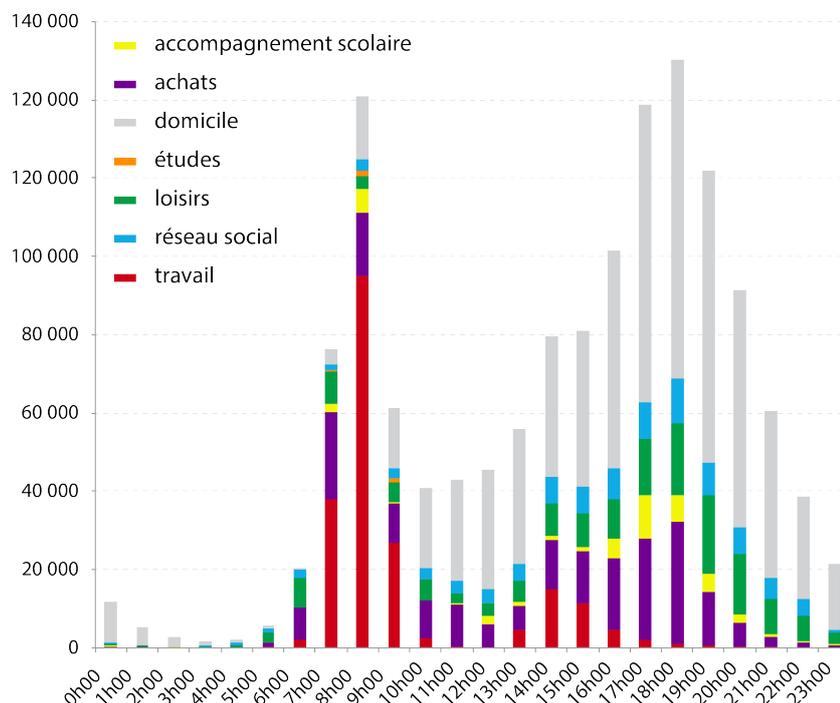


FIGURE 8.11 – Répartition horaire des motifs de départ des déplacements au Luxembourg en 2010 (simulation MobiSim)

La carte 8.12 représente le résultat général de l'étape de distribution des déplacements qui fait suite à la génération des programmes d'activités. Cette carte des flux illustre le volet spatial de la matrice origine / destination entre les activités des agents. Tous les déplacements de la journée qui se-

ront simulés pour l'année 2010 de référence y figurent. Les déplacements frontaliers sont également pris en compte, on peut les deviner en clair aux abords des frontières. On retrouve bien la structure spatiale du Luxembourg, avec une très grande majorité de flux à destination de Luxembourg-Ville, du bassin minier au sud et de la Nordstad. Quelques pôles urbains secondaires (Wiltz, Echternach...) apparaissent également. Ces flux de déplacements sont à cette étape de la modélisation déconnectés des réseaux de transports. Ils vont faire l'objet d'un choix modal dans le but d'être affectés sur les réseaux (routiers et de transports en commun) et de représenter ainsi des comportements réalistes de mobilités quotidiennes pour les agents.

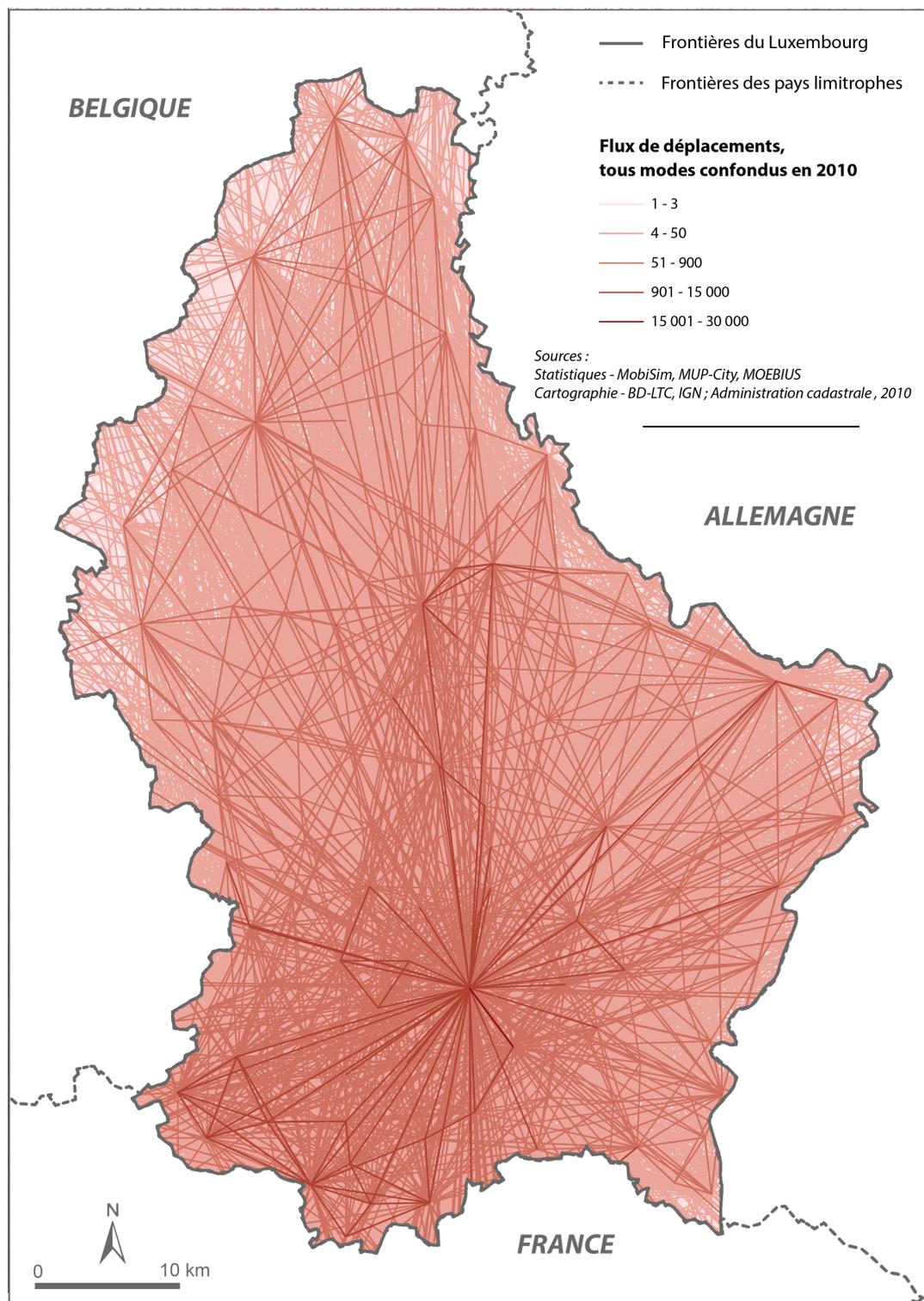


FIGURE 8.12 – Ensemble des flux issus de la distribution des déplacements sur une journée au Luxembourg en 2010 (simulation *MobiSim*)

3.3. Choix modal

Dans la version de MobiSim utilisée pour cette thèse, les agents disposent d'un choix entre trois modes de transport : la marche à pied, les transports en commun (bus ou train) ou la voiture. Une fonction de coût généralisé est définie, puisque les coûts de déplacements ne sont pas uniquement liés au prix du carburant (pour l'automobile) ou à celui du titre de transport (pour les modes collectifs), mais intègrent l'ensemble des coûts supportés par les usagers (Gaudry, 2007). Le coût généralisé est calculé en deux étapes dans MobiSim :

1. Pour chaque tronçon k à emprunter, on calcule un coût d'emprunt (CT) du tronçon, pour un agent a , utilisant un mode de transport m , de sorte que CT soit égale à la somme des coûts de la distance d et du temps t nécessaire pour parcourir le tronçon k , en lien avec la vitesse de déplacement (dépendante du mode) :

$$CT_{a,m,k} = (Cd_m \times d_k) + (Ct_a \times t_k)$$

2. en faisant la somme de tous les tronçons que l'agent doit emprunter pour effectuer son trajet de i à j , on obtient C, Cf_m le coût fixe de déplacement, alors le coût généralisé total pour un trajet est :

$$C_{a,i,j,m} = Cf_m + \sum_{k=i}^j CT_{a,m,k}$$

Par la suite, on transforme ce coût généralisé en probabilité de choix modal, d'abord en déterminant le coût minimum :

$$c_{a,i,j} = \min\{C_{a,i,j,m}\}$$

Ce coût minimum permet de calculer l'écart relatif entre le mode m et le coût minimum :

$$\Delta_{a,i,j,m} = \frac{C_{a,i,j,m} - c_{a,i,j}}{c_{a,i,j}}$$

Le coût relatif pour chaque mode est ensuite rapporté au paramètre de coût maximum :

$$P_{a,ij,m} = \begin{cases} 1 - \frac{\Delta_{a,ij,m}}{\Delta_{max}} & \text{si } \Delta_{a,ij,m} < \Delta_{max} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

On obtient une loi de probabilité discrète $p_{a,ij,m}$, pour un agent a , se déplaçant de i à j par le mode m :

$$p_{a,ij,m} = \frac{P_{a,ij,m}}{\sum_k P_{a,ij,k}}$$

Les variables du choix modal (voir figure 8.2) permettent de paramétrer le modèle puis de le calibrer en fonction des données obtenues en sortie du modèle et des données observées du Luxembourg.

3.4. Affectation des déplacements et calibrage du modèle de mobilité quotidienne

L'étape de calcul d'itinéraires consiste à déterminer le nombre de véhicules sur chaque tronçon routier ainsi que la charge en usagers du système de transports en commun. L'étape d'affectation des déplacements dépend des programmes d'activités simulés ainsi que du choix modal. Pour les utilisateurs des modes de transports individuels (la voiture et la marche à pied dans notre cas), le calcul de l'itinéraire entre le point de départ et le point d'arrivée de chaque agent utilise l'algorithme de Dijkstra, autrement appelé algorithme du plus court chemin. Cette étape est complétée par le calcul des chaînes de déplacements, spécifiques aux agents qui profitent de leur trajet initial (domicile-travail) pour satisfaire d'autres motifs (achats, loisirs, accompagnement, réseau social). Les résultats obtenus (en nombre de véhicules ou de personnes sur les tronçons) permettent de déterminer le niveau de congestion des réseaux (embouteillages sur les routes) et peuvent influencer l'itinéraire que choisiront les agents pour réduire leurs temps de trajets ou le mode de transport qu'ils utiliseront pour se déplacer. Il y a donc ici une rétroaction avec l'étape de détermination du choix modal, comme le montre la figure 8.9.

Le réseau routier utilisé dans les premières parties de la thèse a fait l'objet de corrections au niveau de sa topologie et des attributs de vitesse (calculés à partir des vitesses théoriques), de capacités (obtenus dans le cadre d'autres travaux au LISER) et de direction (repérage des sens de circulation). Pour la marche à pied, le même réseau a été utilisé avec une valeur de vitesse fixe, définie à 4km/h (Julien et Carré, 2003).

Pour les usagers des transports en commun, le calcul d'itinéraire est contraint par la structure du réseau de transports publics, tel qu'il est intégré dans le modèle. On distingue le réseau de bus du réseau ferroviaire, les deux types véhicules n'empruntant pas les mêmes infrastructures. Toutefois, les fiches horaires permettent d'établir des correspondances entre les deux modes de transports et de les considérer comme un seul mode. Les horaires de circulation des transports en commun sont issues d'une base constituée par la *Verkéiersverbond* (Communauté des Transports au Luxembourg), selon un système standardisé. L'utilisation d'un script d'extraction réalisé par Sylvain Klein au Liser, a permis de rendre cette base compatible avec les pré-requis techniques de MobiSim. Il y a près de 400 lignes de transports (2 000 parcours, avec les allers-retours et variantes de desserte) au Luxembourg. Pour rappel, nous utilisons une journée type de circulation, ici le 17 septembre 2013, pour éviter vacances scolaires, week-end et jours fériés. La figure 8.13 présente un extrait de fiche horaire, pour la ligne CFL 60-318 du train entre Luxembourg-Ville et Esch-sur-Alzette. Ce train circule le matin à 5h50 au départ de la capitale, les lundi et mardis. Ce n'est pas une course scolaire (non gérée dans le cadre de la thèse).

ID_Station	Nom de la station	courses scolaires	Im-----
200405035	Luxembourg Gare	0	05:50
221101001	Berchem Gare	0	05:56
220102005	Bettembourg Gare	0	06:02
220105002	Noertzange Gare	0	06:06
221401002	Schifflange Gare	0	06:10
220402034	Esch/Alzette Gare	0	06:13

FIGURE 8.13 – Exemple de fiche horaire, la ligne 60 du train entre Luxembourg-Ville et Esch-sur-Alzette (extrait)

En l'absence de données exhaustives sur les pratiques de mobilités quotidiennes au Luxembourg⁹, le calibrage des résultats issus des simulations de MobiSim a été effectué à l'aide des données existantes à l'échelle nationale. Le tableau 8.2 établit une synthèse des données utilisées et leurs sources.

Le premier objectif était d'obtenir un nombre de déplacements quotidiens en cohérence avec les pratiques observées de mobilités au Luxembourg. En 2012, dans son document sur une *Stratégie durable pour une mobilité durable*, le ministère publie un chiffre de 1,66 millions de déplacements quotidiens au Luxembourg. Avec 1,68 millions en sortie du modèle, et sans une connaissance exhaustive des comportements de mobilité (notamment pour les autres déplacements que le domicile

9. Une enquête ménages - déplacements a été effectuée en 1995 par le Grand-Duché, mais ces données sont indisponibles et ces statistiques sont aujourd'hui obsolètes.

- travail), ce résultat est satisfaisant, d'autant plus que le chiffre de 1,66 millions de déplacements est également le fruit d'une simulation par la Cellule Modèles de Transport.

Les données connues sur lesquelles nous nous sommes appuyées concernent principalement le motif travail. En 2009, Carpentier et Gerber publiaient les résultats provenant d'une enquête sur un échantillon représentatif de la population luxembourgeoise, le PSELL (Panel Socio-Économique sur la vie au Luxembourg). Les résidents déclaraient alors une distance moyenne de 12 kilomètres pour se rendre sur leur lieu de travail, 16 kilomètres pour ceux utilisant la voiture pour un parcours de 23 minutes. Avec des distances simulées de 12,5 kilomètres et 14 kilomètres pour la voitures (26 minutes), il est possible de noter une certaine proximité des résultats de simulation issus de *MobiSim* pour 2010 avec les réalités du Grand-Duché. Les parts modales entre la voiture, 78% simulées (76% pour le panel) et les transports en commun, 17% simulées (13% pour le panel, auxquels il est possible d'ajouter près de 2% de la catégorie « voiture et autre mode ») confirment ces observations, même si la part des transports en commun peut paraître élevée.

En 2010, 1,68 millions de déplacements ont été simulés, pour une population de 505 200 habitants, ce qui représente 3,33 déplacements en moyenne par résident. À titre de comparaison, d'après l'enquête nationale transports en déplacements de 2008, les Français effectuent 3,15 déplacements quotidiens en moyenne.

Enfin, pour compléter ces données, l'Enquête Mobilité Frontaliers dont les résultats ont été publiés en 2012, apporte un éclairage supplémentaire sur les déplacements des actifs en provenance d'Allemagne, Belgique et France (Schmitz et al 2012). La distance moyenne de trajet est identique entre les résultats de simulation *MobiSim* et le chiffre de l'enquête, même si les frontaliers semblent circuler un peu plus rapidement dans le modèle que de façon empirique (mais il n'y a pas de congestion simulée de l'autre côté de la frontière luxembourgeoise).

Maintenant que la simulation des mobilités quotidiennes fournit des résultats satisfaisants pour l'année de référence (2010), nous pouvons passer à la dernière étape de la démarche, la comparaison de trois scénarios de développement résidentiels à l'horizon 2030. Bien sûr, aucune validation des résultats n'est envisagée, le modèle de simulation est employé ici de façon exploratoire.

Paramètre	Explication et valeurs possibles
Coût fixe TC	C'est le prix d'un voyage en transports en commun. Partant des différents abonnements annuels existants au Luxembourg ^a , pour les écoliers : 0€ ; les étudiants : 0,15€ ; les retraités : 0,20€ ; pour les autres agents : 0,65€.
Coût kilométrique par mode	Le coût kilométrique d'une voiture était de 0,34€ en moyenne au Luxembourg en 2013, d'après la législation grand-ducale. Les autres modes ont un coût nul.
Coefficient de confort par mode	Égal à 1 pour tous les modes, non utilisé dans le cas présent.
Propension maximale	Variable qui permet d'ajuster le choix modal en réglant l'arbitrage entre deux modes, construit sur la différence de coût. Par défaut dans MobiSim, cette valeur est de 2.
Valeur du temps	Autre variable qui permet d'ajuster le choix modal, notamment l'utilisation des modes les moins rapides. En donnant une plus grande valeur au temps des agents, ceux-ci sont moins susceptibles d'utiliser les transports en commun ou la marche à pied et préféreront la voiture.
Temps de correspondance	Nombre de minutes nécessaires à l'agent pour passer du bus au train et inversement, puisque les deux réseaux sont gérés séparément dans MobiSim (par défaut : 2 minutes, ajustable).
Temps de stationnement	Temps à rajouter au temps de déplacement en voiture dans l'optique de trouver une place de stationnement (par défaut : 5 minutes, ajustable).
Temps de marche à pied pour rejoindre le réseau	Lorsque l'origine ou la destination est légèrement éloignée du réseau, temps nécessaire pour le rejoindre (par défaut : 2 minutes, ajustable).

^a. Exemple de calcul pour un retraité, l'abonnement annuel est de 100€, divisé par les deux fois (aller-retour) 255 jours ouvrés de 2013, $\frac{100}{255 \times 2} = 0,20\text{€}$

Tableau 8.1 – Les variables susceptibles d'influencer le choix modal d'un agent

Variable utilisée	Résultat obtenu	Résultat observé
Nombre total de déplacements	1,68 millions	1,66 millions (Cellule modèle de Transport, MoDu, 2012)
Distance moyenne parcourue pour le motif travail (tous modes confondus)	12,5 km	12 kilomètres (Carpentier et Gerber, 2009)
Distance moyenne parcourue en voiture pour le motif travail	14 km	16 km (Carpentier et al, 2011)
Temps moyen d'un déplacement en voiture pour le motif travail	26 minutes	23 minutes (Carpentier et al, 2011)
Part d'utilisation de la voiture pour le motif travail	78%	76% (Carpentier et Gerber, 2009)
Part d'utilisation des transports en commun pour le motif travail	17%	13% (Carpentier et Gerber, 2009)
Distance moyenne parcourue en voiture pour le motif travail - frontalier	44 km	44 km (Schmitz et al, 2012)
Temps moyen d'un déplacement en voiture pour le motif travail - frontalier	50 minutes	53 minutes (Schmitz et al, 2012)

Tableau 8.2 – Calibrage du modèle de simulation MobiSim en 2010 à l'aide de données observées

4. Les résultats de la comparaison des scénarios en matière d'indicateurs de mobilité quotidienne

4.1. Le nombre de trajets

En 2030, le nombre de déplacements est presque identique pour chaque scénario, avec une différence maximale de 1 944 déplacements simulés entre le scénario FOD et le scénario des 23 communes. Pour chaque scénario, 2,88 millions de trajets ont été simulés, sans qu'il y ait de changements dans le programme d'activités des 720 738 agents. Avec une croissance de 43% de la population, le nombre absolu de déplacements a augmenté de 72% ; rapporté au nombre d'agents, cela conduit à 4 déplacements par jour contre les 3,33 de la situation initiale. Le graphique 8.14 détaille le nombre de déplacements quotidiens effectués en moyenne par chaque agent en fonction des modes de transports utilisés. Le nombre de déplacements par agent augmente entre 2010 et les trois scénarios puisque dans le même temps la taille de la population croît. La part des déplacements en voiture croît moins fortement que pour les deux autres modes de transports, le scénario FOD permet même de maintenir le nombre moyen de déplacements quotidiens effectués en voiture par rapport à la situation initiale de 2010. Dans le cadre des 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. Pourtant l'objectif de 25% en marche à pied visé par le gouvernement luxembourgeois (voir chapitre 2) n'est pas atteint, alors que les règles de construction des scénarios étaient relativement strictes sur cet aspect.

Il importe ensuite de considérer la nature de ces déplacements. Sont-ils le fruit de l'amélioration généralisée de l'accessibilité à une grande variété d'aménités ? Existe-t-il une redéfinition du partage modal en faveur des transports en commun et des modes doux, conformément aux hypothèses générales de la thèse ?

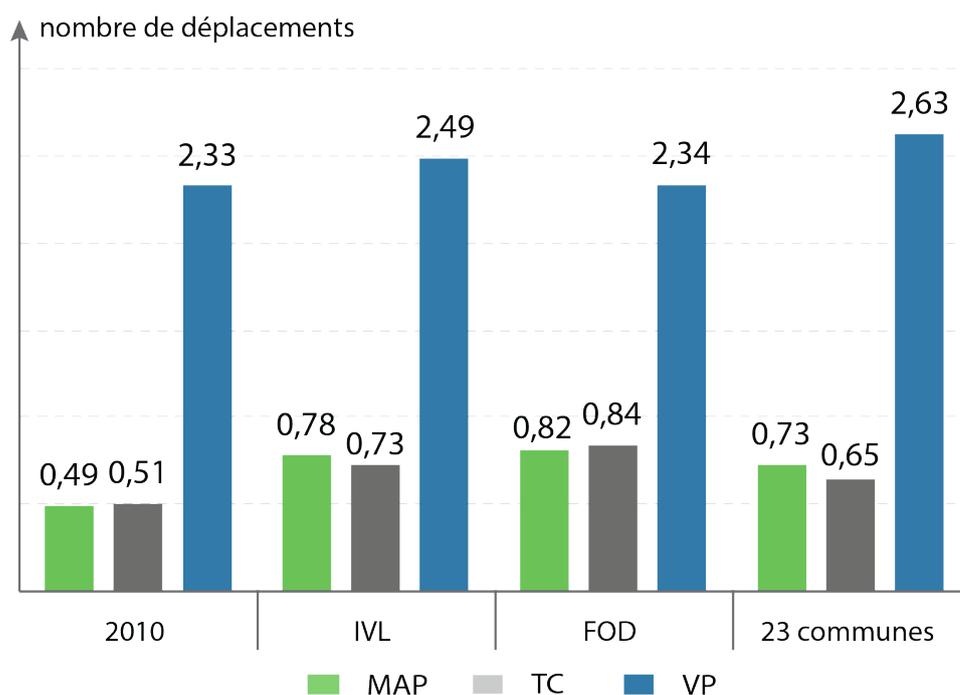


FIGURE 8.14 – Comparaison du nombre de déplacements quotidiens par agent et par modes entre la situation de référence en 2010 et les scénarios en 2030

4.2. Le partage modal

4.2.1. Le partage modal à l'échelle nationale

Le graphique 8.15 présente la répartition par modes de l'ensemble des déplacements, pour la situation initiale en 2010 et pour chacun des trois scénarios simulés. Le partage modal entre la situation initiale et les scénarios fait l'objet de changements conséquents. Pour l'ensemble des scénarios, on constate : 1) un recul de la part liée à la voiture ; 2) une augmentation de la part des déplacements en transports en commun et en modes doux. Le scénario FOD (*Fractal-Oriented Development*) 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%. Parallèlement, la part liée aux transports en commun augmente de 38% tandis que la part liée à la marche à pied augmente de 39%. Les résultats obtenus pour les deux autres scénarios sont assez similaires, le scénario IVL arrive en deuxième position en matière de partage modal alors que le scénario des 23 communes, pourtant plus compact d'un point de vue global, voit la part des déplacements liés à la voiture passer de 70% à 65,6%.

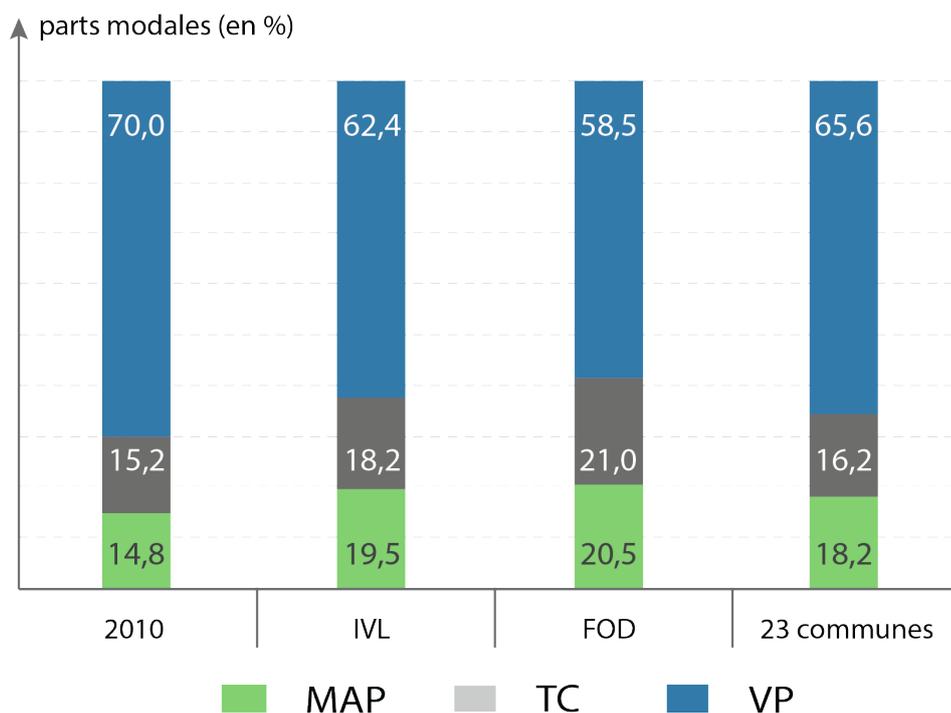


FIGURE 8.15 – Comparaison des parts modales entre la situation de référence en 2010 et les scénarios en 2030

4.2.2. Le partage modal à l'échelle communale

Les cartes 8.16 nous renseignent sur la répartition spatiale des évolutions du partage modal. Pour chaque scénario, l'évolution de chaque mode à partir de la situation initiale a été calculée, de sorte à obtenir neuf cartes à l'échelle communale de l'évolution des trois modes de déplacements. La même discrétisation, construite à partir de la distribution statistique des valeurs d'évolution, permet la comparaison entre les modes et entre les scénarios. Les cartes à l'échelle communale confirment les tendances observées pour l'évolution globale des parts modales présentées précédemment. Les tendances générales d'augmentation de la marche à pied et des transports en commun au détriment de la voiture apparaissent clairement. Toutefois, des contrastes locaux et de subtiles différences entre les scénarios existent, faisant bien apparaître l'intérêt d'une telle démarche désagrégée.

L'augmentation de la part des déplacements effectués en marche à pied est généralisée sur l'ensemble du territoire luxembourgeois pour les trois scénarios. Dans la capitale, la plus grande évolution intervient dans le scénario FOD, avec une augmentation de 49%, en passant de 17% en 2010 à plus de 25% en 2030. Ce ne sont pas dans les plus grands centres urbains que cette croissance est la plus forte, mais plutôt dans de petites communes rurales où la marche à pied en 2010 était relativement faible. Ainsi, pour le scénario IVL, les taux d'évolution les plus conséquents ont lieu

davantage dans le nord du pays. À Neunhausen à l'est de la Nordstad, le taux de marche à pied était de 2,6% en 2010 et dépasse les 14% dans le scénario IVL, soit une évolution positive de 445%! À l'inverse, quelques communes ont une évolution négative de la pratique de la marche à pied. Il s'agit de communes de taille relativement importante, bénéficiant d'une certaine centralité et qui possédaient une part de marche à pied élevée en 2010 : Mondorf-les-Bains, Dudelange, Mertert, Diekirch, Echternach et Grevenmacher. Dans le cadre du scénario des 23 communes, l'évolution de la part accordée à la marche à pied diminue de 28% à Diekirch et de 18% à Ettelbruck.

En ce qui concerne les évolutions de la part des transports en commun par rapport à la situation initiale, les résultats sont davantage contrastés entre les communes. Les croissances les plus importantes ont une nouvelle fois lieu dans les communes modestes où ce mode ne dépasse pas les 15% en 2010. Les communes plus centrales de Grevenmacher (+54%), Wiltz (+51%), Mertert (+50%), Echternach (43%) ou Mersch (33%) connaissent des évolutions marquées dans le cadre du scénario IVL. Conformément aux hypothèses, les évolutions sont plus importantes dans le cadre du scénario FOD. Au regard de la carte située juste au centre de la figure 8.16, une certaine analogie avec l'organisation radiale du réseau ferroviaire luxembourgeois apparaît. Les communes qui connaissent une croissance marquée sont localisées à proximité immédiate des stations de train. Parmi elles, quatre communes doublent la part modale des transports en commun : Reckange/Mess et Garnich proches de la capitale, Nommern près de la Nordstad et Neunhausen à côté de Wiltz. On retrouve également une forte évolution sur l'axe en direction de l'est et traversant les communes de Sandweiler, Biwer, Schuttrange, Betzdorf et Mertert. Dans le cadre du scénario des 23 communes, les évolutions sont moins marquées spatialement : seules quatre communes, déjà présentes dans les deux autres scénarios ressortent avec une évolution supérieure à 40% : Garnich, Neunhausen, Schuttrange et Consthum. Par contre, c'est dans le cadre du scénario des 23 communes que la baisse de la part modale accordée aux transports en commun semble la plus forte, elle touche 45 communes (contre 18 pour l'IVL et 28 pour le FOD), localisées notamment aux abords des espaces frontaliers, au sud, à l'est, et dans le nord du pays. À Mamer et Strassen, à l'ouest, tout comme à Schifflange et Tandel, la baisse dépasse les 20% dans le cadre du scénario des 23 communes. Malgré une augmentation de 1% pour le scénario FOD, Luxembourg-Ville voit l'utilisation des transports en commun diminuer dans les deux autres scénarios, moins 6% (IVL) et moins 10% (23 communes). Il apparaît toutefois nécessaire de relativiser ces diminutions de la part des transports en commun, qui est probablement à mettre au profit de la marche à pied dans le cas des très courtes distances.

La dernière série de comparaisons aborde l'évolution à l'échelle communale de la part modale liée à la voiture dans les déplacements quotidiens. Selon les résultats obtenus à l'échelle nationale,

une diminution générale de la part de la voiture est observée dans les trois scénarios. Dans le cadre du scénario IVL, les diminutions les plus fortes prennent place dans une large moitié nord du pays, notamment dans les communes frontalières de la Belgique, où la marche à pied a augmenté, en devenant concurrentielle à la voiture pour certains déplacements. Toujours dans le scénario IVL, seules deux communes ont une croissance de la part des déplacements en voiture : Grevenmacher (+1%) à l'est, et Diekirch (+2,5%) dans la Nordstad. Dans le cadre du FOD, aucune commune n'est dans cette configuration. La commune de Nommern connaît une baisse de 47% de la part de déplacement en automobile en passant de 70% en 2010 (la moyenne nationale) à 37%. D'après ce scénario en faveur des transports en commun, 29 communes, soit le quart des communes du Grand-Duché, seraient en mesure de diminuer de 20% la part modale de la voiture en 2030. Le scénario des 23 communes fournit des résultats plus mitigés quant à une baisse de l'utilisation de la voiture. Six communes faisant partie des trois pôles, donc où une grande partie de la nouvelle population s'est localisée, voient la part de la voiture augmenter : Bettembourg (1%), Ettelbruck (1,9%), Mamer (2,3%), Dudelange (3,7%) et surtout Diekirch (11,7%).

À Esch-sur-Alzette, suite au modèle d'allocation résidentielle, nous avons constaté une faible augmentation de la population dans le cadre du scénario IVL et une diminution de la population dans les scénarios FOD et 23 communes. Dans le premier cas, la part des déplacements effectués en marche à pied augmente (+15%) tandis que les parts en transports en commun et en voiture diminuent (respectivement -12% et -3%). Ceci est sûrement dû à la localisation des nouveaux ménages, relativement éloignée des deux gares, mais suffisamment à proximité d'un certain nombre d'aménités pour susciter le report modal vers la marche à pied pour quelques déplacements. Lorsqu'il n'y a pas d'augmentation de la population, comme à Esch-sur-Alzette dans le scénario FOD, la situation tend vers une forte augmentation de la marche à pied (+34%), et une diminution des transports en commun (-12%) et de la voiture (-11,5%). Dans le scénario des 23 communes, la part de la voiture s'intensifie même légèrement (+1,5%).

4. Les résultats de la comparaison des scénarios en matière d'indicateurs de mobilité quotidienne

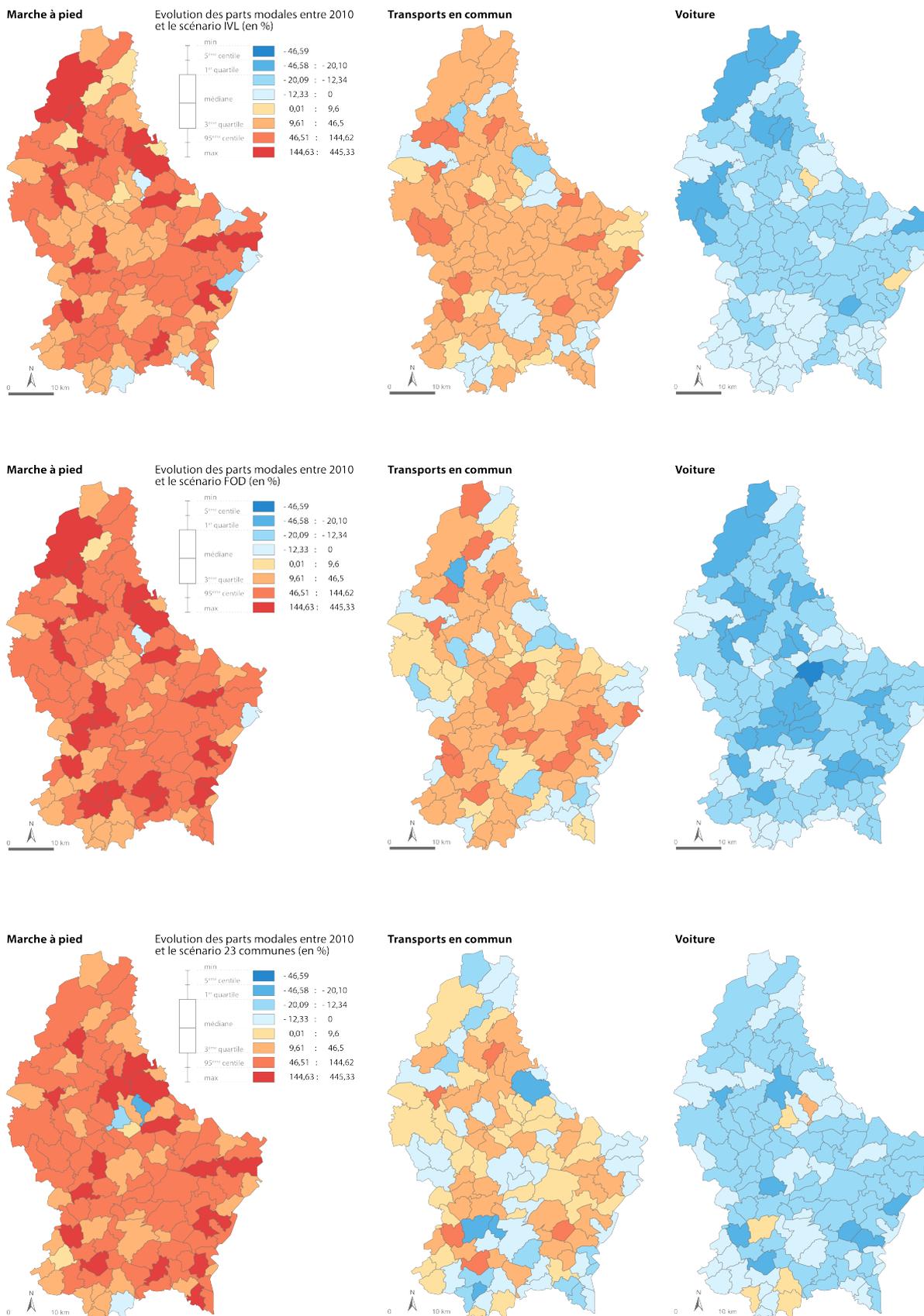


FIGURE 8.16 – Evolution des parts modales (marche à pied, transports en commun et voitures) pour chaque scénario (IVL, en haut ; FOD, au centre ; 23 communes en bas)

4.2.3. Le partage modal par motif de déplacements

Le tableau 8.3 présente l'évolution du partage modal entre la situation initiale de 2010 et chacun des trois scénarios, et ce, pour sept motifs de déplacements : accompagnement scolaire, achats (ou service), études, loisirs, réseau social, retour au domicile et travail.

En ce qui concerne l'accompagnement à l'école des enfants, pour tous les scénarios, il s'agit d'un basculement de l'ordre de 10 à 17% depuis la voiture et en faveur de la marche à pied. Les nouveaux ménages, qui constituent une masse critique importante sont localisés à proximité de nombreuses aménités, dont les établissements scolaires font partie. De plus, le modèle gravitaire force la « carte scolaire » (inexistante au Luxembourg), en conduisant les parents à emmener leurs enfants à l'école la plus proche de leur domicile, facilitant ainsi la pratique de la marche.

Les achats (accès à des commerces ou services), les loisirs et le retour au domicile connaissent les mêmes dynamiques, qui diffèrent légèrement selon les scénarios. Dans le cadre du scénario IVL, la part de la voiture recule de 7% tandis que la marche à pied croît de 4 ou 5% et les transports en commun de 2%. Ces tendances s'accroissent dans le cadre du scénario FOD, où la voiture baisse de 11% et la hausse se répartit à peu près uniformément entre la marche et les transports en commun. À l'inverse, avec le scénario des 23 communes, si le sens des tendances demeure similaire, les proportions sont plus restreintes, avec des variations de quelques points seulement. Une fois encore, ces changements peuvent être dus à la proximité des commerces, services, aménités vertes ou de loisirs à proximité des nouvelles extensions du tissu résidentiel. Ceci qui explique aussi les variations du retour au domicile qui intègre le retour de ces deux activités, relativement prépondérantes dans l'emploi du temps des ménages.

Dans le cadre du motif travail, le report modal s'oriente davantage vers les transports en commun, plus 9% pour l'IVL, 14% pour le FOD et 5% pour le scénario des 23 communes. Pour les deux premiers scénarios, la localisation des nouveaux ménages à proximité des stations de transports en commun, notamment dans le cadre du scénario FOD favorise les transports ferroviaires et en bus, quand bien même, nous le verrons par la suite, ces derniers sont plus longs. Le motif travail reste l'un des plus contraints sur le plan des horaires, avec une heure de pointe très forte entre 7h et 9h, aussi la congestion peut entraîner un changement de mode les transports en commun devenant davantage concurrentiel du fait de la congestion.

Les déplacements des étudiants connaissent les variations les plus conséquentes du tableau. Quel que soit le scénario, près d'un agent sur trois allant étudier délaisse la voiture au profit des

4. Les résultats de la comparaison des scénarios en matière d'indicateurs de mobilité quotidienne

Motif	Ecart 2010 - IVL			Ecart 2010 - FOD			Ecart 2010 - 23 communes		
	MAP	TC	VP	MAP	TC	VP	MAP	TC	VP
accompagnement scolaire	14%	0%	-14%	15%	2%	-17%	11%	-1%	-10%
achats	5%	2%	-7%	5%	6%	-11%	3%	1%	-3%
études	14%	20%	-34%	14%	23%	-37%	16%	13%	-28%
loisirs	4%	2%	-7%	6%	5%	-11%	3%	1%	-4%
réseau social	5%	-6%	1%	9%	-4%	-5%	3%	-7%	5%
retour au domicile	5%	2%	-7%	6%	5%	-11%	3%	0%	-4%
travail	4%	9%	-12%	4%	14%	-18%	3%	5%	-8%

Tableau 8.3 – Comparaison des parts modales (marche à pied, transports en commun et voiture) entre la situation initiale en 2010 et les scénarios IVL, FOD et des 23 communes en 2030, en fonction de plusieurs motifs de déplacements

modes doux ou des transports en commun. On peut rappeler que ce motif concerne seulement 3 700 mouvements quotidiens. Pour les scénarios IVL et FOD, il semblerait une nouvelle fois que la proximité aux arrêts de bus et de train joue un rôle important, tandis que pour le scénario des 23 communes, la localisation dans les trois pôles du pays intègre nécessairement une proximité aux lycées et surtout aux établissements universitaires.

Le motif réseau social est le seul pour lequel les dynamiques semblent moins nettes ; dans le scénario IVL et le scénario des 23 communes, la voiture progresse légèrement, respectivement de 1 et 5%, au détriment des transports en commun (-6 et -7%) mais non de la marche à pied (+5 et +3%). Pour le scénario FOD, les deux modes motorisés reculent (-4% pour les transports en commun et -5% pour la voiture) alors que la marche augmente de 9%. Les destinations des visites aux familles et aux amis (un des motifs de déplacements les moins étudiés) sont constituées de la carte de population dans le modèle de distribution des activités. Dans le cadre du FOD, il y aurait donc davantage d'adéquation entre la localisation des nouvelles extensions résidentielles et la localisation de l'ensemble de la population, ce qui pourrait être moins le cas des scénarios IVL et des 23 communes.

Ces résultats résultent donc principalement de concordance entre la localisation des ménages et celle des aménités, sans pour autant négliger les aspects temporels des emplois du temps des ménages. Il faut tout de même disposer d'un temps raisonnable pour cumuler plusieurs activités dans une journée, surtout en pratiquant les modes doux ou les transports collectifs, ce que semble permettre davantage l'IVL et plus encore le FOD, que le scénario des 23 communes.

4.3. Les distances parcourues

Le graphique 8.17 présente les distances kilométriques parcourues, par mode et rapportées au nombre d'agents entre la situation initiale de référence et les scénarios. Deux tendances se dégagent : 1) les distances en marche à pied et en transports en commun augmentent fortement ; 2) les distances parcourues en voiture diminuent légèrement.

Entre 2010 et les trois scénarios, les distances parcourues par agent triplent. Elles sont légèrement supérieures dans le cadre du scénario IVL que dans les deux autres scénarios. Ce résultat est à mettre au regard des résultats obtenus précédemment à propos des parts modales. Dans les espaces nouvellement urbanisés des scénarios, il semblerait que la marche à pied soit une alternative à la voiture et peut-être aux transports en commun pour les distances de moins de deux kilomètres. Une explication réside dans la localisation de ces extensions urbaines, qui du fait des normes de développement résidentiel à proximité des aménités, permettent d'accéder à une offre plus rapprochée.

Les distances parcourues en transports en commun doublent dans le cadre des scénarios IVL et FOD, ce qui s'explique en partie par les évolutions positives des parts modales. Les fortes évolutions de cette part modale sont notamment réparties dans des communes assez éloignées des centres d'emplois, ce qui explique également l'allongement des distances en transports en commun. Le scénario des 23 communes, qui fait l'objet de moindres changements dans le partage modal, conduit tout de même à une augmentation de 55% des distances parcourues en transports en commun, malgré des développements résidentiels concentrés dans une vingtaine de communes et à proximité des grandes zones d'emploi.

En revanche, les distances parcourues quotidiennement par chaque agent en voiture diminuent : de 1,4% pour le scénario IVL (le plus dispersé spatialement au niveau du développement résidentiel) ; de 10% pour le FOD et de 7% pour le scénario des 23 communes. Ces évolutions, bien qu'inférieures comparativement aux autres modes, sont tout de même considérables, avec près de 2,5 kilomètres de voiture parcourus en moins quotidiennement par chaque agent utilisant leur automobile. En multipliant 2,5 kilomètres, par les 720 738 agents et les 365 jours d'une année, on obtient une économie potentielle de 660 millions de kilomètres. Avec un parc automobile luxembourgeois émettant en moyenne 161 grammes de CO₂ par kilomètre (Hansen, 2012), cette distance représente une émission en moins de 106 000 tonnes de CO₂, soit les rejets effectués annuellement par les habitants d'une ville de 9 000 habitants dans tous les domaines de la vie quotidienne.

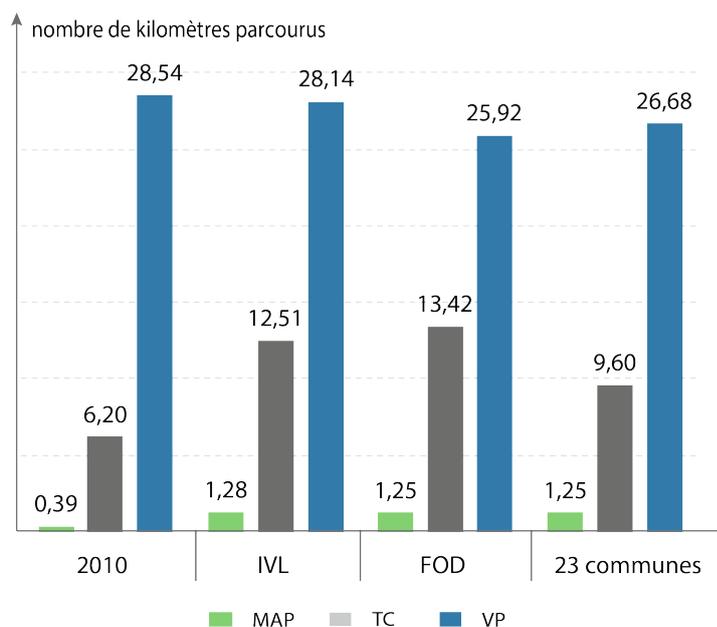


FIGURE 8.17 – Comparaison des distances moyennes parcourues par modes et par agent, entre la situation de référence en 2010 et les scénarios en 2030 (en kilomètres)

4.4. Le budget-temps moyen (par agent)

Le graphique 8.18 présente par mode et en fonction de chaque scénario le nombre de minutes que dure en moyenne un déplacement. Avec un fort allongement des distances parcourues en marche à pied et en transports en commun, il est fort logique que les temps moyens de déplacements augmentent également fortement, ces temps étant ni compressibles ni extensibles (en théorie, il n'y a pas de congestion en marche à pied ou en transports en commun). Toutefois, il est curieux de noter que les temps moyens des déplacements automobiles restent constants et identiques entre la situation initiale et les trois scénarios, avec 21 minutes en moyenne. Alors que les distances parcourues diminuent, les temps de déplacements sont identiques, ce qui induit une diminution des vitesses de déplacement et de la congestion sur le réseau routier.

Les graphiques 8.19 et 8.20 précisent les résultats précédents en fonction des motifs de déplacements. Le premier constat réside dans le fait que les variations des temps moyens de déplacements quotidiens par agent dépendent des motifs, certains entraînant davantage de changements que d'autres qui ont une inertie plus forte. Ces écarts dépendent également des modes de transports utilisés, d'autant qu'une minute de différence en marche à pied n'a pas la même valeur qu'une minute en bus, train ou encore en voiture, où le confort de déplacement est plus important.

En marche à pied comme en voiture, les temps de déplacements les plus courts sont ceux des étudiants se rendant au lycée ou à l'université, avec des temps compris entre 12 et 19 minutes. C'est

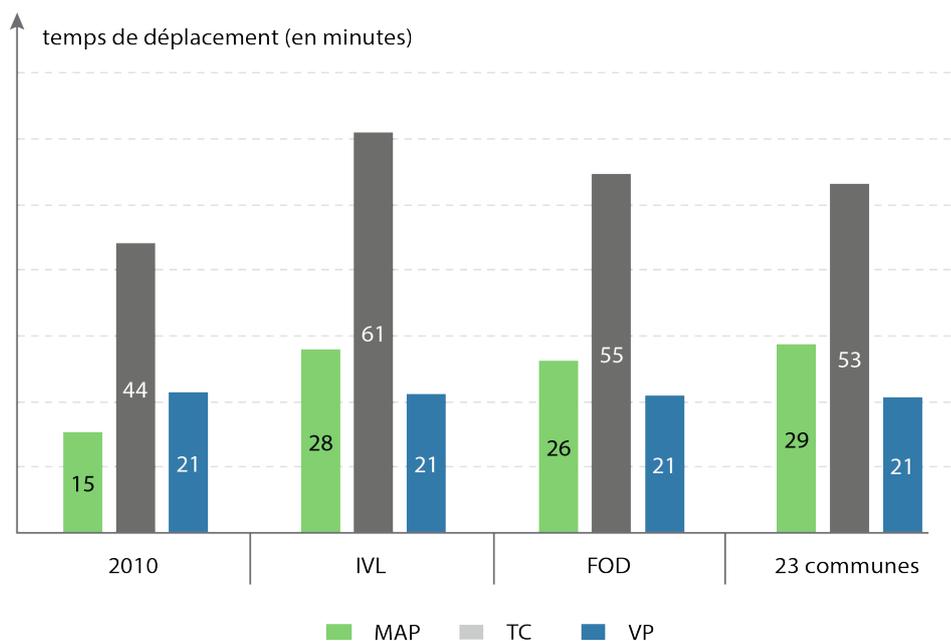


FIGURE 8.18 – Comparaison des budgets-temps moyens par déplacement et par mode entre la situation de référence en 2010 et les scénarios en 2030 (en minutes)

le scénario FOD qui permet de minimiser ces temps de déplacements. En transports en commun, le scénario des 23 communes rapproche davantage les étudiants de leur destination, avec un temps moyen de 38 minutes, contre 42 minutes pour le FOD et 46 minutes pour l'IVL ; en 2010, le temps moyen était de 31 minutes. D'ailleurs, quelque soit le motif de déplacement, les temps passés dans les transports en commun augmentent du fait d'un éloignement entre les lieux de destinations et les lieux de développement résidentiel, d'autant qu'il n'y a pas d'extension du réseau de transports collectifs intégrés à la présente démarche de simulation.

Si les distances moyennes parcourues en marche à pied ont triplé, des écarts non négligeables existent en fonction des motifs de déplacement. Comme nous l'avons vu lors de l'analyse des parts modales, le scénario FOD permet de minimiser les temps de parcours afin d'effectuer une visite à des amis ou de la famille : de 19 minutes en 2010 à 24 minutes pour ce scénario contre 30 minutes dans le scénario des 23 communes. Là aussi, quel que soit le motif, le scénario FOD obtient les meilleurs résultats pour la marche à pied.

Nous venons de voir que les temps de déplacements en voiture entre 2010 et les trois scénarios restaient identiques avec 21 minutes en moyenne. De subtiles variations existent en fonction des activités à réaliser. Pour l'accompagnement scolaire, le temps moyen de 14,6 minutes en 2010 passe à 14,3 minutes pour l'IVL, 14,4 minutes pour le FOD et 15 minutes pour le scénario des 23 communes. Pour le motif achat, quel que soit le scénario, le temps de déplacement en voiture augmente

d'environ un demi point de pourcentage. Afin de se rendre au travail, le temps passé dans la voiture croît d'une minutes entre 2010 et 2030 et même d'une minute trente environ pour le scénario IVL. Des écarts semblables peuvent être observés dans le cadre des loisirs. La fréquentation du réseau social en voiture ne génère pas de temps de déplacement supplémentaire, à l'exception une nouvelle fois du scénario IVL.

Les résultats obtenus dans l'analyse des temps de déplacement assoient les hypothèses explicatives émises sur des indicateurs précédents. La mobilité quotidienne simulée dépend fortement de l'interaction spatiale entre les espaces résidentiels, notamment ceux issus des scénarios de développement et de la localisation des aménités, des emplois et de la population. Sans générer de nouvelles aménités ni d'étendre les réseaux routiers et de transports publics, une amélioration des conditions de mobilités quotidiennes reste possible. Toutefois, avec un nombre conséquent de résidents, générant de nouvelles circulation, il existe une certaine dégradation des conditions de circulation, notamment en voiture. L'étude de la congestion associée aux scénarios, vue par les baisses de vitesses des déplacements, devrait permettre de confirmer ces affirmations.

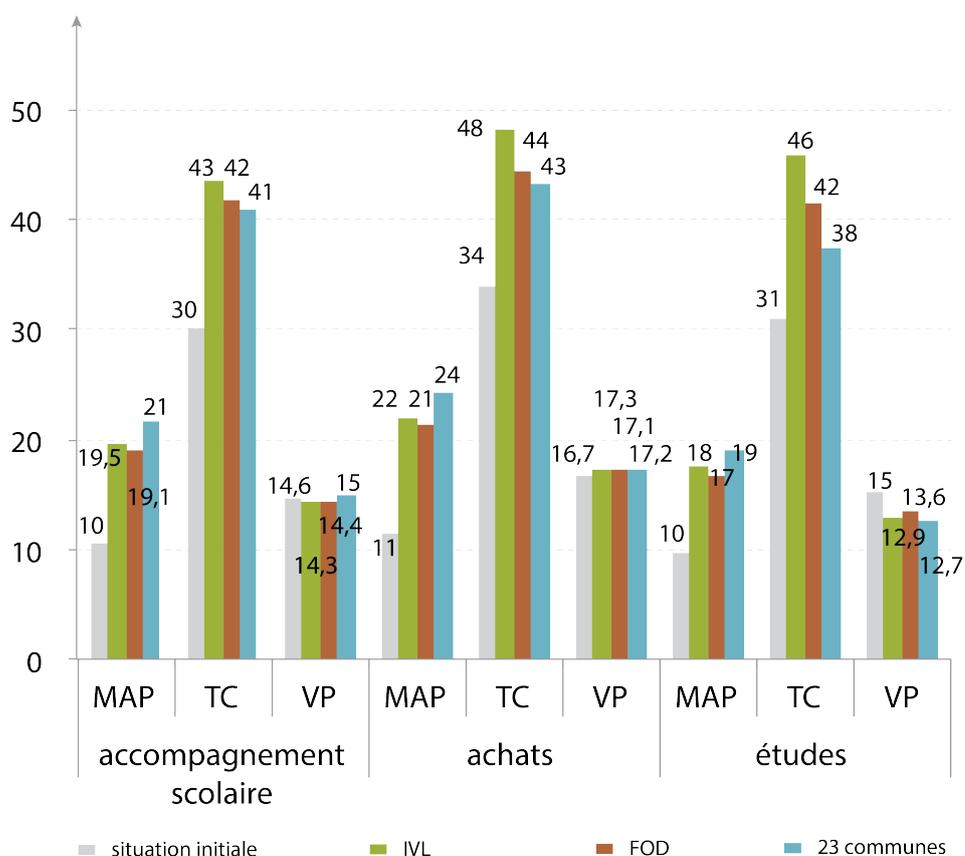


FIGURE 8.19 – Comparaison des budgets-temps moyens par déplacement, par motif et par mode entre la situation de référence en 2010 et les scénarios en 2030 (en minutes)

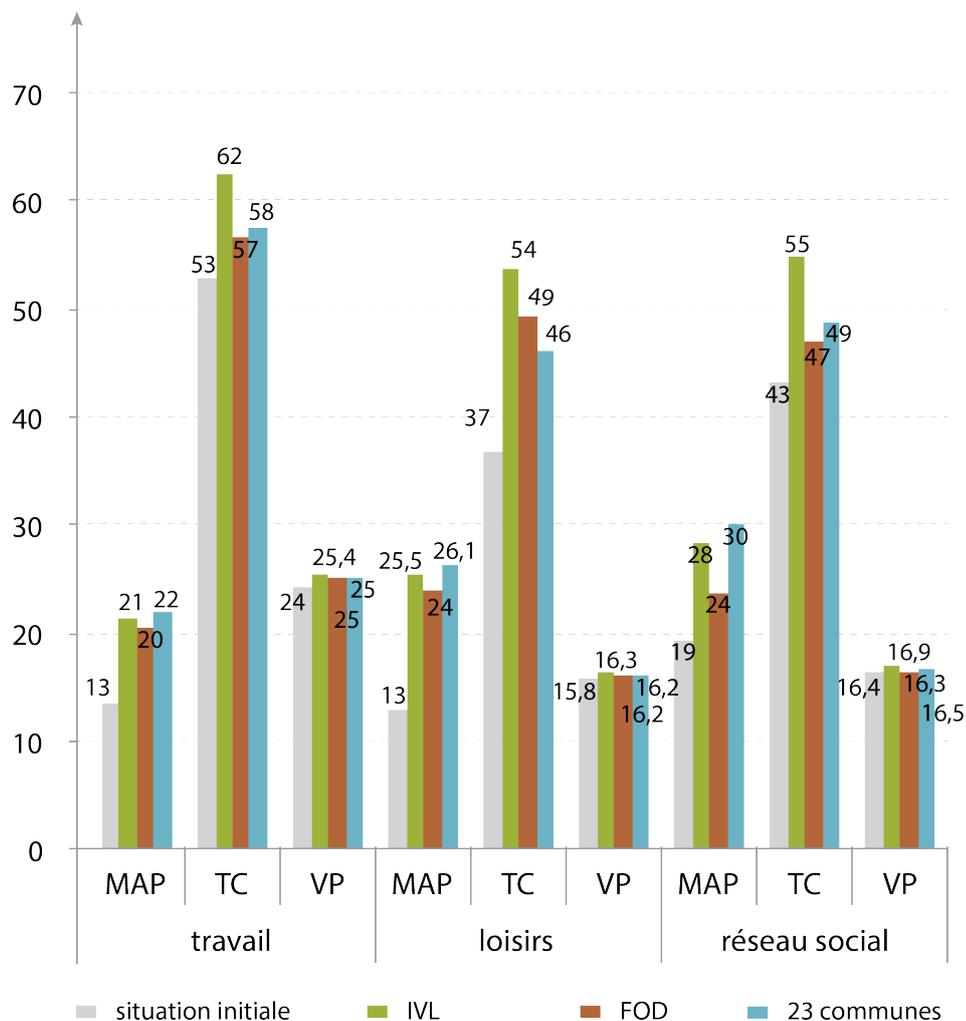


FIGURE 8.20 – Comparaison des budgets-temps moyens par déplacement, par motif et par mode entre la situation de référence en 2010 et les scénarios en 2030 (en minutes)

4.5. La vitesse moyenne en voiture

La figure 8.21 présente le calcul des écarts de vitesses constatés entre la situation initiale et chaque scénario, par tronçon de route et concernant la circulation automobile. Les vitesses sont mesurées entre 8h et 9h, à l'heure de pointe, où la circulation est la plus importante. Les pertes de vitesses, conséquences de la congestion, nous intéressent principalement ; il s'agit des tronçons représentés en rouge par un trait plus épais. On constate que la distribution spatiale de ces pertes de vitesses sont liées aux formes du développement résidentiel.

Le scénario IVL est le plus dispersé à l'échelle globale, les tronçons les plus touchés par le phénomène de congestion sont répartis sur le territoire à l'échelle nationale. Des baisses importantes de vitesse (supérieures à 10km/h) peuvent être constatées autour de la capitale, où de nombreux résidents et frontaliers se rendent pour travailler. Les échangeurs autoroutiers du sud du pays sont également concernés. On constate également des diminutions des vitesses de circulation en provenance du nord du pays, aux abords des agglomérations de Wiltz, Clervaux et de la Nordstad. Pour les 56 000 tronçons étudiés, la vitesse moyenne diminue de 0,4km/h.

Les baisses de vitesses aux heures de pointe dans le scénario FOD suivent également les formes du développement résidentiel simulées. On retrouve trois grands axes de congestion, où la nouvelle population est concentrée. Comme pour le scénario IVL, les abords de la capitale et le sud du pays sont plus difficiles d'accès pour se rendre au travail le matin. C'est également le cas depuis l'axe de développement en direction de l'est du pays, avec les communes de Mersch, Biwer, Betzdorf, et Niederaven à proximité de Luxembourg-Ville. Le troisième axe concerne les mobilités en voiture dans le nord du pays. Dans le cadre du scénario FOD, les communes le long de la voie ferrée à destination de Troisvierges ont fait l'objet de nombreuses constructions dont on observe ici une des conséquences. Toutefois, contrairement au scénario IVL, les gains de vitesse sur d'autres tronçons (en vert) semblent plus importants. Il semblerait également que la circulation au sein de Luxembourg-Ville soit légèrement plus rapide. Dans ce scénario, la vitesse moyenne baisse de 0,3%.

Le scénario des 23 communes est le plus concentré au niveau global, les baisses des vitesses de circulation le sont également. La circulation autour (et à l'intérieur) de la capitale et dans le bassin minier semble fortement ralentie, avec une forte présence de tronçons où la baisse dépasse les 10km/h mais aussi de nombreuses routes où cette baisse est comprise entre 5 et 10km/h (en orange) ce qui, en moyenne, est déjà considérable. Comme nous l'avons vu lors de l'allocation résidentielle, la localisation d'une grande partie du développement résidentiel dans la Nordstad entraîne des conséquences majeures sur la circulation, avec de nombreux tronçons souffrant de congestion

autour de l'agglomération septentrionale du pays. En dehors des trois pôles, les vitesses de circulation augmentent. La baisse de vitesse moyenne est la plus importante dans ce scénario, avec une diminution de 0,5km/h.

La figure 8.21 fournit en complément une synthèse statistique de ces variations de vitesse en fonction des trois scénarios, du nombre et de la longueur des tronçons concernés. Si le scénario des 23 communes semble être celui où les pertes de vitesse touchent le moins de tronçons et mécaniquement le moins de kilomètres, les conditions de circulation les plus lentes sont atteintes dans le cadre de ce scénario. Le matin entre 8h et 9h, 108 kilomètres de route connaissent de forts ralentissements, dépassant les 10 km/h en moyenne et atteignant parfois plus de 30 km/h. Dans le même temps ce sont seulement 73 kilomètres qui sont touchés pour le scénario FOD et 43 kilomètres pour le scénario IVL. Comme l'illustre la carte correspondante, les tronçons routiers du scénario IVL subissent le plus de pertes de vitesses, avec près de 10 000 kilomètres de route en ralentissement (une bonne partie étant minimales), soit 22% du total. Dans l'autre sens, le scénario des 23 communes induit une augmentation des vitesses de circulation sur près de 14% du réseau, situé à l'écart des grands axes de circulation entre la Nordstad, le bassin minier et l'agglomération de Luxembourg-Ville. Pour chacun des trois scénarios, près de deux tiers des routes, notamment le réseau secondaire beaucoup moins emprunté, ne fait pas l'objet de pertes de vitesse.

4. Les résultats de la comparaison des scénarios en matière d'indicateurs de mobilité quotidienne

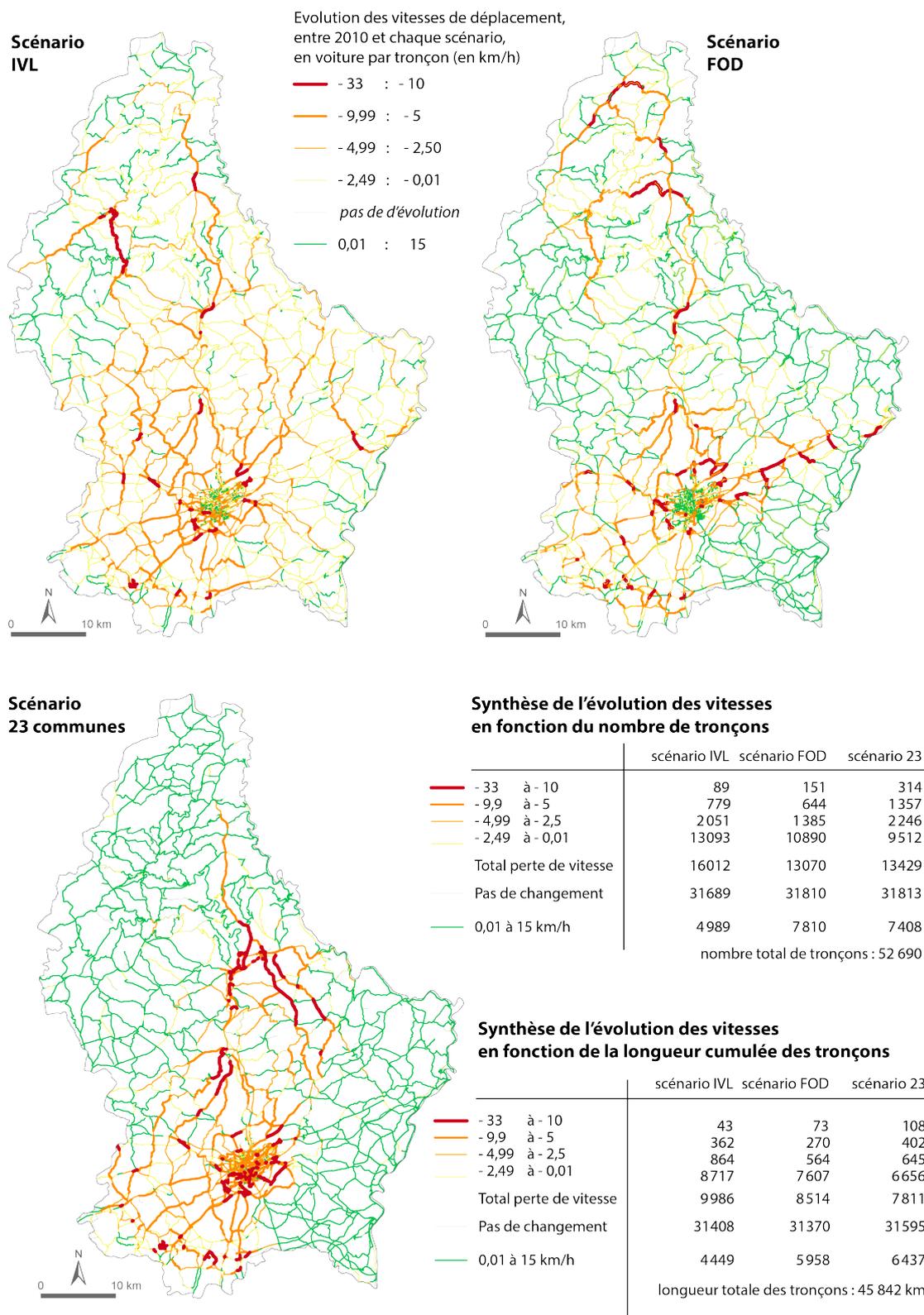


FIGURE 8.21 – Comparaison des vitesses de circulation en voiture par tronçon, de 8h à 9h, entre la situation de référence en 2010 et les scénarios en 2030 (en km/h)

5. Conclusion du chapitre 8

L'objectif principal de ce huitième et dernier chapitre était de comparer les scénarios de développement résidentiel à l'aide d'indicateurs de mobilité quotidienne. En d'autres termes, il importait de voir comment, au travers de la simulation des comportements de mobilité quotidienne, les agents pouvaient bénéficier ou non des potentialités induites par les nouvelles formes de développement résidentiel.

Dans ce contexte, l'allocation résidentielle formait un pré-requis afin de localiser la population composée de ménages, dans les logements simulés par les scénarios. Les résultats issus de cette partie du travail de thèse ont fait l'objet d'une rapide description, même si d'autres aspects de ce volet auraient pu être développés, comme la répartition spatiale des rentes foncières et des utilités par exemple.

Nous l'avons vu en conclusion du chapitre 7, les mesures d'accessibilité spatiales à différentes aménités et à l'aide de plusieurs types d'indicateurs n'ont pas permis d'identifier un scénario qui soit clairement le meilleur parmi les huit qui ont été simulés, même si un petit groupe de scénarios font l'objet de meilleures évaluations. À l'aune des simulations de mobilités quotidiennes pour trois scénarios (IVL, FOD et 23 communes), il devient cependant possible d'apporter quelques précisions.

Le report modal en faveur des transports en commun et de la marche à pied au détriment de la voiture, quel que soit le scénario, est un premier résultat très encourageant. De plus, les évolutions de ces changements de modes de transports entre 2010 et 2030 sont de l'ordre d'une dizaine de points, soit 30 à 40% supplémentaires de déplacements à pied, en bus ou en train et environ 15% de déplacements en voiture de moins. Les meilleurs résultats obtenus avec le scénario FOD confirme le lien entre la proximité des espaces résidentiels au réseau de transports publics et leurs utilisation (Kitamura *et al.*, 1997 ; Cervero, 2002). L'analyse au niveau communal des évolutions de parts modales apporte une information supplémentaire aux indicateurs agrégés, dans la mesure où de réels contrastes apparaissent à l'échelle nationale même si certaines dynamiques restent difficiles à expliquer, comme les variations dans les distances ou les temps de déplacement en fonction de certains motifs, où les différences locales entre deux communes pourtant voisines et partageant des caractéristiques similaires (éloignement à la capitale, équipements en commerces...).

Le lien entre forme urbaine et distance moyenne parcourue quotidiennement doit passer par

une lecture modale. Entre la situation initiale et les scénarios, il semblerait que les agents parcourent de plus longues distances. 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 aménités de proximité conséquente (voir chapitre 7), 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.

Enfin, l'analyse des budget-temps et des vitesses de congestion établit un lien entre saturation des réseaux de transports (ici routiers) et report modal. Les transports en commun et la marche à pied étant beaucoup plus utilisées 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 vitesses de circulation apporte une information supplémentaire, avec la répartition spatiale de la congestion due aux nouvelles extensions résidentielles. La concentration du développement résidentiel induit une corrélation spatiale avec la congestion sur les routes voisines, avec des ralentissements de plus en 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 plus à pied, en bus ou en train, ou l'inverse ?

Conclusion de la troisième partie

CETTE TROISIÈME et dernière partie a été l'occasion de confirmer l'hypothèse générale de la thèse concernant le lien entre les formes du développement résidentiel et les mobilités quotidiennes qui y sont associées. Deux étapes de travail ont été nécessaires avec d'abord les calculs d'accessibilité spatiale puis la simulation des mobilités quotidiennes.

Les différentes mesures d'accessibilité, distance à la plus proche aménité, comptage dans un voisinage, accessibilité à plusieurs types d'aménités, ont fourni de nombreux résultats. La principale conclusion réside dans l'amélioration quasi systématique des accessibilités entre la situation initiale et les différents scénarios. Ce résultat de contrôle de la forme du développement résidentiel est un argument en faveur de la mise en place de règles strictes. La mise en place d'un modèle fractal de développement résidentiel couplé à quelques règles d'accessibilité permet d'améliorer nettement l'accessibilité à une variété d'aménités (Tannier et al, 2012b). Certains scénarios ont permis de diviser par deux voire par trois la distance minimale aux aménités les plus proches et la distance pour accéder à chaque type d'aménité d'une même fréquence de recours. La synthèse de ces résultats est difficile à effectuer, le classement des scénarios n'étant pas identique d'un indicateur à l'autre. La méthode de classement (Chakar, 2006) utilisée reste simple et discutable, d'autres indicateurs, pondérés et / ou composites auraient pu être développés. Quoiqu'il en soit, l'accessibilité spatiale à différentes aménités représente la traduction concrète d'une offre spatiale à destination de la population qui y réside.

Cependant, pour de multiples raisons, les individus profitent partiellement de cette offre. Personne ne fréquente l'ensemble des commerces de son quartier au retour de sa journée de travail, avant d'aller faire du sport, puis d'enchaîner sur une sortie au cinéma suivie d'une promenade en forêt. La journée n'est composée que de 24 heures. C'est pourquoi la simulation des mobilités quotidiennes, appuyée sur une approche comportementale des agents, apporte un élément nouveau dans la comparaison des scénarios. En faisant circuler, au cours d'une journée type, l'ensemble de la population luxembourgeoise suivant un programme d'activités potentiel et réaliste (fondé sur des

observations empiriques françaises et luxembourgeoises), il est possible d'approcher au mieux une partie du fonctionnement urbain. Même si tous les scénarios n'ont pas fait l'objet d'une telle simulation, des différences conséquentes sont apparues entre les scénarios IVL, FOD et des 23 communes. Alors que le scénario des 23 communes offre probablement le plus de potentialités en matière d'accessibilité spatiale aux aménités, les mobilités quotidiennes issues du scénario FOD permettent davantage de report modal vers la marche à pied et les transports en commun. Le scénario des 23 communes, avec son développement résidentiel très concentré à l'échelle globale, génère plus de congestion sans toutefois que celle-ci ne favorise nécessairement un changement de mode. Le scénario IVL, pourtant spatialement plus dispersé, représente sur la base des indicateurs retenus, une alternative plutôt intéressante.

De nombreuses étapes ont été nécessaires afin de parvenir à ces résultats mais le couplage entre les sorties de MUP-City, le modèle d'allocation résidentielle de MOEBIUS et MobiSim apparaît comme une approche intéressante et innovante, surtout dans le cadre d'une application au Luxembourg. Les dynamiques en vigueur au Grand-Duché lui confèrent un statut de laboratoire d'aménagement du territoire, sur le plan de la simulation tout du moins. À l'instar du projet VIL-MODEs, les outils de simulation à disposition permettent d'intégrer une grande partie des éléments qui composent le système morphologique de la ville et de son fonctionnement. L'outil ainsi mis en place permet un réel apport en matière d'aide à la décision tant sur le plan des politiques publiques que des techniques d'aménagement. Même avec une quantité de données limitée voire incomplète, une approche par des « faits stylisés », sur la base de solides expériences de recherche, permet l'utilisation d'une méthodologie désagrégée dont l'intérêt réside tant sur la possibilité de naviguer entre les échelles d'analyses, que l'intégration de subtilités (spatiales, comportementales) aux niveaux les plus fins.

CONCLUSION GÉNÉRALE

« Quand j'arrive dans une ville, je vais toujours sur le plus haut clocher ou la plus haute tour pour voir le tout ensemble, avant de voir les parties ; et, en la quittant, je fais de même pour fixer mes idées. »

Montesquieu, 1728

AU REGARD de ce travail de thèse, l'intérêt de l'approche normative en aménagement, telle que décrite dans l'introduction générale, réside dans le fait d'avoir pu évaluer, à l'aide de la simulation spatiale, l'impact de la forme urbaine sur les mobilités quotidiennes. Pour ce faire, une série de scénarios d'aménagements réalistes ont été construits en respectant des objectifs d'aménagement issus de normes et de règles concrètes, basées sur la littérature et tenant compte des aspects contextuels. Comme indiqué au cours du premier chapitre, bon nombre de préconisations de formes urbaines, modèles de villes ou utopies, intègrent des normes qui font ensuite l'objet d'une traduction sous forme de règles. Ces normes et ces règles peuvent être de nature différente et toucher à de multiples aspects de l'urbain, et ce, à différentes échelles : répartition au niveau global du développement résidentiel, localisation au niveau local, densité, accessibilité, intégration de la ville et de ses espaces avoisinants...

La proposition méthodologique de construction de scénarios d'aménagement faite dans la thèse intègre cinq aspects majeurs : les projections démographiques, la densité bâtie, la forme urbaine (locale et globale), l'accessibilité aux aménités et les restrictions de construction. Disposer de solides projections démographiques devrait former tout point de départ d'une telle démarche de simulation, afin de quantifier les besoins en logements. Cette demande de logements est ensuite convertie en potentiel de développement résidentiel, c'est-à-dire une quantité de surface à urbaniser en vue d'accueillir les nouveaux ménages. Dans ce sens, les normes de densité bâties jouent un rôle prépondérant. Par la suite, les normes de répartition globale et locale du développement résidentiel ainsi que l'accessibilité à des aménités variées servent à orienter les localisations des futurs logements afin d'atteindre le ou les objectifs fixés. Chacun de ces points nécessite la mise en place et la discussion de normes, puis leur transposition en règles. Le chapitre 5, dédié à l'évaluation de la pertinence des règles au regard des objectifs visés, a permis de mettre l'accent sur les difficultés pour l'aménageur de définir des règles strictes d'aménagement et de mesurer leurs impacts sur la démarche de construction des scénarios. Nous avons pu constater l'importance des seuils et des critères des règles d'aménagement sur les résultats de simulation. S'il semble important de se référer à la littérature et aux expériences antérieures dans la définition des règles, il n'empêche que le recours à la simulation permet de tester une grande variété de mesures *in-vitro* sans qu'il soit pos-

sible d'effectuer les mêmes tests de façon empirique (Antoni, 2003). De fait, la *ville d'essai* à même de « métamorphoser subitement le monde social » proposée par Fourier en 1822 semble s'éloigner. La démarche déductive proposée ici se fonde sur l'objectif à atteindre, celui de la ville durable, et la mise en place d'une méthode exploratoire afin d'identifier précisément les leviers afin d'y parvenir. Dans cette optique, la rétroaction entre les évaluations *ex-ante* et *ex-post* revêt un intérêt majeur.

Cette procédure implique cependant la multiplication de seuils, de règles, de tests et d'aller-retours qui ne facilitent pas la comparaison raisonnée de scénarios. Ainsi, au nombre de huit, puis de trois dans le huitième chapitre, ces scénarios de développement résidentiel ont tout de même fait l'objet de comparaisons plus ou moins systématiques. D'abord, les mesures d'accessibilité spatiale nécessitent d'effectuer une succession de choix sur les indicateurs retenus et sur la façon de hiérarchiser les scénarios. La prédominance des scénarios des 23 communes, de la densité ou du *Fractal-Oriented Development* dans ces résultats, révèlent un caractère évident mais essentiel du développement résidentiel : celui-ci doit-être contenu, confiné spatialement au risque de constater des baisses généralisées de l'accessibilité. Néanmoins, le développement résidentiel possède un caractère inéluctable (Lord et al., 2015). La forme urbaine globale, autrement dit la répartition spatiale du développement résidentiel dans certaines communes plutôt que d'autres tient une place prépondérante (Tannier et al., 2012a). En sélectionnant trois scénarios relativement contrastés pour la simulation des mobilités quotidiennes, les résultats devaient laisser apparaître de forts contrastes. Si des différences ont clairement été identifiées au sein du dernier chapitre, il n'en demeure pas moins que le sens des dynamiques observées est assez similaire entre les scénarios IVL, FOD et des 23 communes, avec une baisse de l'usage de la voiture et une augmentation de la marche à pied et des transports en commun, malgré des formes globales assez opposées.

La relative proximité des résultats tient sur plusieurs aspects. Premièrement, le territoire est sujet à une certaine inertie ; en l'absence de nouvelles extensions des voies de communications (routières et ferroviaires) ou d'intégration de nouvelles formes de mobilités, la circulation de la population en 2030 s'effectue sur les mêmes supports qu'en 2010, ce qui a pour conséquence de faciliter les comparaisons mais de restreindre des comportements alternatifs ou innovants. Par exemple, dans les préceptes qui accompagnent le concept urbanistique du « TOD » (Calthorpe, 1993) figurent d'une part la localisation des habitations à proximité des nœuds de transports en commun, mais aussi le développement de cheminements piétons, de forme globalement maillée, afin d'améliorer la connectivité des fonctions urbaines en privilégiant des modes doux. Dans ce sens, et pour compléter la démarche de construction des scénarios, la génération de réseaux pédestres aurait pu s'envisager. Le développement urbain doit aussi s'accompagner d'un développement commercial

de proximité, avec des aménités urbaines à proximité de ces nœuds de transports (notamment aux intersections avec le réseau pédestre) ce qui pose la question de la localisation des commerces ou services, voire des emplois. En effet, d'un scénario à l'autre, les lieux de destinations des activités sont identiques. Sans générer de nouvelles aménités (ou de les relocaliser), il existe une forme de dépendance des comportements de mobilités, comme des mesures d'accessibilité, à la répartition spatiale des aménités. La question de la localisation des aménités a d'ailleurs fait l'objet de nombreuses réflexions au sein du projet VILMODEs, sans qu'aucune réelle solution ne soit apportée en matière de simulation spatiale des évolutions du tissu économique, notamment en ce qui concerne les commerces, services, aménités vertes ou de loisirs. Une réflexion similaire a été menée dans le cadre du projet MOEBIUS où un scénario tentait de prendre en considération le développement économique de Belval, avec un nombre d'emplois augmentant fortement. Des changements au niveau de la répartition des parts modales ont alors été observées pour les déplacements domicile-travail. Dans notre cas, les phases de scénarisation se sont davantage focalisées sur les formes du développement résidentiel.

Ainsi, l'un des aspects prépondérants de la démarche de scénarisation réside dans l'utilisation du modèle fractal de croissance résidentielle, qui passe par la génération de formes fractales semi-aléatoires. Cet aléa constitue un atout non négligeable dans la forme locale du tissu résidentiel, mais pose la question de la reproductibilité des résultats d'une simulation à l'autre. En considérant les mêmes entrées (paramétrage du modèle, terrain d'étude, dimension fractale identique) et les mêmes critères de constructions de scénario, il reste impossible d'obtenir exactement les mêmes formes en sortie du modèle. En ce sens, comme évoqué lors du chapitre 4, MUP-City, qui reste un outil d'aide à la décision, ne sert pas à identifier une solution optimale unique, mais permet de parcourir un éventail de solutions possibles. MUP-City est un modèle multi-échelle dont l'ensemble du fonctionnement général repose sur la décomposition des règles, y compris fractale selon une grille à chaque niveau d'échelle. Le positionnement de la grille, s'effectuant au plus haut niveau d'analyse jusqu'à ce que l'ensemble de la zone étudiée soit comprise dans une seule cellule, devient alors prépondérant. Un décalage de cette grille, de quelques centaines de mètres seulement, couplé au caractère aléatoire du générateur de fractales, peut alors produire des résultats localement très différents (Gruson et al., 2010).

Le modèle d'allocation résidentielle, employé d'abord pour une simple raison méthodologique ayant pour finalité la localisation de la population synthétique dans les espaces de développement résidentiel des différents scénarios, montre des aspects intéressants. Dans le cadre de la thèse, les analyses en sortie du modèle se concentrent sur la répartition spatiale de la population au niveau

communal. Toutefois, ce modèle est également totalement désagrégé, et aurait pu servir à des approfondissements à des échelles encore plus locales tout en intégrant les caractéristiques socio-économiques des ménages (âge, type de ménage, revenus...). De même, d'un point de vue d'économiste (ou de géographe économiste), il pourrait exister un fort intérêt dans le croisement de la démarche de construction des scénarios d'aménagement et de la distribution spatiale des valeurs d'utilités et de rentes foncières, telles que disponibles en sortie du modèle. Ces aspects avaient déjà été relevés au sein du projet MOEBIUS (Gerber et al., 2013), démontrant des différences nettes en matière d'utilité et de « bien-être économique » entre les scénarios *Inner City Development* et *Business as Usual*.

L'application d'un modèle de mobilité quotidienne, tel que MobiSim, induit également un certain nombre de choix de paramétrage. En l'absence de données fines ou du moins détaillées sur les comportements existants de mobilité quotidienne au Luxembourg, il semblait néanmoins difficile d'approfondir ces aspects, même s'il a été possible d'envisager certains calages à partir de données d'enquêtes ad hoc. Dans la thèse, le choix modal n'est composé que de trois modes (marche à pied, transports en commun et voiture) alors que la plateforme permet d'en utiliser jusqu'à neuf (marche à pied, cycles non-motorisés, bus, bus à haut niveau de service, tramway, métro, cyclomoteurs, motos, voitures). L'intégration du projet de Tramway à Luxembourg-Ville, dont l'arrivée est prévue pour 2018, sur le même principe que celui de Besançon dans le cadre de VILMODEs (arrivé en 2015), aurait pu constituer un déterminant de l'évolution des conditions de mobilité. Toutefois, la problématique de la thèse étant concentrée sur le lien entre forme urbaine et mobilité quotidienne, le choix effectué a été de restreindre les variations entre les scénarios aux normes et règles du développement résidentiel. Dans cette démarche, la mobilité quotidienne, a fortiori durable, est un objectif résultant des scénarios et non un levier d'action principal. Aussi, l'évolution du prix des carburants dans le coût kilométrique en voiture ou encore les destinations d'activités pour le modèle gravitaire n'ont pas évolué.

Le choix du Grand-Duché du Luxembourg comme terrain d'application, conditionné en partie par le cadre du projet MOEBIUS, possède un intérêt scientifique indéniable. Le pays possède des caractéristiques géographiques telles qu'elles permettent l'application de notre démarche : une surface de 2 500 km², une capitale métropole d'à peine plus de 100 000 habitants, un nombre de grandes communes restreint. Petit par la taille, il n'en demeure pas moins un laboratoire, presque un incubateur, idéal pour mener ce genre d'expérimentation. Comme nous l'avons vu lors du deuxième chapitre, le Luxembourg est confronté à des dynamiques relativement exceptionnelles pour un pays d'Europe occidentale, avec une croissance démographique soutenue, fortement cor-

réglée à une croissance économique marquée et finalement assez peu touchée par la crise financière de 2008. De ces dynamiques découlent trois objectifs majeurs que sont : i) la localisation de cette croissance démographique ; ii) la réduction de la consommation foncière induite par la demande croissante en logements et iii) la réduction de la dépendance automobile. Par ces tendances, on évite aussi l'inertie de certains scénarios, tels qu'observés dans le cadre du projet VILMODEs. Du fait de la démarche de scénarisation, plusieurs normes d'aménagement ont ainsi pu être évaluées. Les modifications du contexte global ont appuyé ou non la hiérarchie des centres et le polycentrisme existant. Certains scénarios ont servi à simuler une politique de densification résidentielle par la mise en place de règles strictes de densités de construction. L'amélioration de l'accessibilité à une grande variété d'aménités a constitué une partie centrale du questionnement, tout comme une réflexion sur le fait d'identifier des leviers visant à favoriser les déplacements en modes doux ou en transports en commun. Certains objectifs du gouvernement luxembourgeois, identifiés dans les documents stratégiques, n'auront pas forcément été atteints lors des différentes simulations, comme le report modal de la voiture vers les transports en commun à une hauteur de 25% et les modes doux à un niveau de 25% également. Pourtant, les règles de constructions des scénarios peuvent être considérées comme strictes, comme celui des 23 communes ou le FOD. Il convient alors de s'interroger sur les limites de ce caractère strict et les facteurs de progression dans l'atteinte des objectifs : existe-t-il d'autres moyens, non identifiés dans le cadre de cette démarche, qui permettraient de répondre aux objectifs visés ? À l'inverse, des leviers d'actions semblent avoir été mobilisés pour correspondre aux attentes des politiques publiques. Dans la diminution de la consommation foncière, la densité de construction joue un rôle majeur, même si c'est loin d'être le seul. Aussi, une augmentation même relative de cette densité et une meilleure répartition du développement résidentiel à l'échelle communale constituent des pistes à approfondir. Les résultats issus de la simulation des mobilités quotidiennes à la fin de la démarche de modélisation justifient à eux seuls l'apport du raisonnement aux problématiques luxembourgeoises.

L'application de cette démarche de simulation représente aussi un certain défi méthodologique et technique. Du début à la fin de la méthode, trois modèles ont été couplés : MUP-City pour le développement résidentiel et les mesures d'accessibilité spatiale, MOEBIUS pour le développement résidentiel (en comparaison), et la population synthétique ainsi que l'allocation résidentielle, et enfin MobiSim pour la simulation de la mobilité quotidienne. L'articulation de ces différents outils a nécessité la mise en relation de leurs données d'entrées, de leurs sorties (statistiques et / ou spatiales) et un dialogue permanent avec un système d'information géographique. De plus, le choix de travailler à une échelle fine a conduit à démultiplier l'information dans les limites des données disponibles, et le cas échéant, à créer la donnée.

Malgré des dimensions géographiques restreintes, une résolution de 20 x 20 mètres au Luxembourg nécessite la mise en place d'une grille composée de 13 millions de cellules. Même en effectuant de simples opérations dans un système d'information géographique (sélections, tris, exports...), les opérations peuvent s'avérer longues voire inopérantes. La plupart des calculs issus de ce travail n'auraient pas abouti sans l'utilisation de serveurs de calculs dotés d'une puissance conséquente et de grandes capacités de stockage. Une seule affectation en sortie de MobiSim, contenant par exemple les 2,88 millions de déplacements et leurs attributs pèse environ 2Go.

D'ailleurs, la quantité de résultats en sortie des différents modèles pose (après la question de leurs analyses et interprétations thématiques) celle de leurs traitements, notamment graphiques et cartographiques. L'approche désagrégée revêt de nombreux atouts dans la prise en compte de processus complexes, mais soulève la question de la transcription des résultats. Lorsqu'un agent ou une cellule correspondent à une ligne d'un tableur, il n'est pas question de sortir un tableau de plusieurs centaines de milliers ou de millions de lignes. Les médias à disposition demeurent limités, que ce soit du point de vue des écrans numériques et de leurs résolutions, des contraintes numériques grandissantes du fait de la multiplication des supports (ordinateurs, tablettes, *smartphones*), ou pire du papier où dans le cadre de productions scientifiques européennes, le format A4 de 297x210mm domine largement. De fait, et nous l'avons constaté à de multiples reprises au cours de ce travail, la représentation de travaux pourtant menés à un niveau désagrégé ne peut se faire qu'en recourant à une forme d'agrégation des résultats, au niveau communal, au travers d'un carroyage... Il semble alors légitime de s'interroger sur le sens thématique d'une agrégation à la commune de données individuelles (Wegener, 2011), comme les caractéristiques socio-économiques, une donnée de choix modal ou encore une utilité économique. Réaliser une moyenne des utilités individuelles au niveau communal demeure relativement gênant, mais l'analyse de distributions statistiques, à l'aide de boîtes de dispersion par exemple, apporte déjà un premier élément de réponse. La mise en place de plateformes numériques d'exploration de données, interactives et relativement universelles (le langage HTML5 permet une grande portabilité sur les supports) serait à même d'améliorer ces aspects techniques de restitution de l'information.

Les comparaisons des scénarios à l'aide d'indicateurs d'accessibilité spatiale ont soulevé des interrogations quant à l'agrégation des différents indicateurs en une valeur synthétique d'évaluation. Le recours à une telle méthode éviterait l'écueil des méthodes de classements. La mise en place d'une méthode afin de pondérer les indicateurs sur la base de profils de ménages et de leurs aspirations résidentielles, constitueraient une amélioration notable. Les attentes d'un couple avec de

jeunes enfants n'étant pas les mêmes que pour une personne âgée, il deviendrait possible de conférer aux espaces potentiellement urbanisables des orientations à privilégier. La prise en compte des profils des ménages ou individus serait également une perspective intéressante dans l'exploitation des résultats issus de la mobilité quotidienne, avec des analyses plus fines sur des groupes d'individus plus ou moins vulnérables sur le plan de la mobilité : personnes âgées, jeunes enfants, familles monoparentales, etc. Par ailleurs, la génération de nouveaux réseaux de transports (notamment routiers) et de nouvelles aménités en cours de simulation serait aussi intéressante pour comprendre les processus qui lient la forme urbaine aux mobilités quotidiennes.

Le présent travail de recherche doctorale offre des perspectives nombreuses et variées en rapport avec certains résultats obtenus. Par exemple, le travail d'exploration de la littérature en matière de préconisation de formes urbaines pourrait se poursuivre afin d'identifier d'autres objectifs, normes et règles au sein de cadres spatio-temporels différents, ce qui constitueraient un certain enrichissement de la pensée urbanistique.

Ultérieurement, le travail de simulation, a fortiori dans l'évaluation d'une démarche normative appliquée à l'aménagement, se doit d'intégrer une partie des acteurs locaux, responsables politiques, aménageurs ou citoyens ; se pose alors la question de leur niveau d'intégration. Si les objectifs sont définis par les politiques publiques aidées par des groupes d'experts, qui doit se charger de la définition des normes et des règles d'aménagement ? L'intégration des acteurs dans la démarche de construction des scénarios, dans le choix des variables à retenir et dans la définition des seuils à appliquer représentent un enjeu majeur dans l'application d'une démarche d'aménagement. Il serait envisageable d'aller plus loin en discutant des règles et de leurs seuils, non seulement avec les personnels techniques des collectivités, mais, pourquoi pas, avec leurs résidents ? Cette démarche d'ouverture, sans doute difficile au niveau de la procédure (recrutement du groupe cible, prise en considération des enjeux, obtention d'un consensus par exemple), permettrait sans aucun doute de confronter des résultats prospectifs différentes tout en offrant de nouvelles perspectives d'aménagement ou de développement résidentiel. C'est le sens de la première expérience en cours à Besançon, mobilisant MUP-City en entrée de simulation et l'ensemble de MobiSim, avec la simulation des mobilités résidentielles et des mobilités quotidiennes (Tannier *et al.*, 2015).

ANNEXES

Méthode de calcul des masses pour les commerces et services

Parmi les établissements commerciaux et de service, on peut distinguer plusieurs offres distinctes (Decoville et al, 2011)¹⁰ : l'offre commerciale de proximité, l'offre commerciale de rayonnement, les soins médicaux et les services. L'attractivité de chaque établissement dépend du rayonnement, de la fréquence de recours et de l'attractivité intrinsèque¹¹ de l'aménité (Tannier, 2003). Alors, la masse m d'une aménité est de : $m = r \times f_q \times a$, avec r , le rayonnement (global, intermédiaire, local), f_q , la fréquence de recours potentielle et a , l'attractivité intrinsèque. Le détail des masses est présenté sur la figure 8.22 pour les commerces et services.

Commerces et services	Rayonnement (local = 1, intermédiaire = 2, global = 3)	Fréquence de recours	Attractivité intrinsèque	Masse
Offre commerciale de proximité				
Alimentations générales, biologiques, sportives, épiceries...	1	1	100	100
Boucheries, charcuteries, poissonneries, volailles, fromageries	2	2	50	200
Tabacs, presse/journaux	1	1	200	200
Supérettes	1	1	100	100
Boulangeries, pâtisseries, chocolatiers, confiseurs	1	1	200	200
Offre commerciale de rayonnement				
Fleuristes	2	3	30	180
Lavage de voitures	3	3	10	90
Pressings – blanchisseries	2	3	10	60
Coiffeurs	1	2	30	60
Stations services	2	2	50	200
Commerces de chaussures	3	3	10	120
Commerces de vêtements	3	3	10	120
Supermarchés / hypermarchés	3	2	500	3000
Offre médicale				
Médecins généralistes	2	2	10	40
Dentistes	3	3	10	40
Médecins spécialistes	3	3	10	40
Pharmacies	1	2	100	200
Maisons médicales	2	2	50	200
Hôpitaux	3	3	500	4500
Offre de services				
Agences bancaires	2	3	30	180
Postes	2	2	100	400
Mairies	2	3	10	60
Administrations publiques	3	3	50	450

FIGURE 8.22 – Méthode de détermination des masses affectées aux commerces et services dans le cadre du modèle d'affectation de MobiSim

10. Dans le cadre des travaux de l'Observatoire du Développement Spatial sur la centralité urbaine au Luxembourg.

11. « Il s'agit du pouvoir d'attraction d'un commerce sur la clientèle, indépendamment de l'attraction exercée par le noyau commercial dont fait partie ce commerce. Les "locomotives" en particulier (gros hypermarchés, grandes surfaces spécialisées, [...]) sont des établissements bénéficiant d'une forte attractivité intrinsèque. C'est aussi le cas des maxi-discomptes et de certains magasins particulièrement réputés ou très spécialisés. »

Méthode de calcul des masses pour les aménités vertes et de loisirs

En ce qui concerne les loisirs, on peut distinguer thématiquement, l'offre en espaces verts, l'offre sportive, et l'offre récréative. C'est cette dernière qui a une pondération plus importante. Les bars et les restaurants, qui bénéficient d'une forte fréquentation sont les aménités à l'attractivité la plus forte.

Comme le Luxembourg est très boisé et que les points d'aménités se situent à l'intersection des réseaux et des espaces boisés, la masse des aménités forestières devra être restreinte. Pour les forêts de plus de 2Ha (c'est-à-dire les espaces boisés qui ne sont pas des parcs plus ou moins urbains), la masse est de 1. Pour les espaces verts de moins de 2Ha, et les terrains de sports extérieurs (dédiés à la pratique du football, tennis ou autres), la masse est de 10. Pour les espaces verts plus petits (parcs, jardins, jardins familiaux) et les infrastructures sportives plus conséquentes (gymnases, piscines), la masse est de 100. L'ensemble de ces masses est ensuite agrégé dans un carroyage de 100m, en utilisant une somme des masses des activités localisées dans une même cellule. Il arrive souvent que des terrains de sports ou des parcs urbains soient situés à proximité d'un gymnase, l'attractivité de la cellule n'en sera que renforcée. A l'inverse, les points d'accès aux espaces forestiers, souvent séparés les uns des autres n'ont que peu d'attractivité pris isolément.

Loisirs	Attractivité intrinsèque	Coefficient de pondération	Masse
Offre en espaces verts			
Forêts, bois, de 2 à 100Ha	1	20	20
Forêts, bois, de plus de 100Ha	1		20
Forêts, bois, de moins de 2Ha	10		200
Parcs urbains – jardins publics - jardins familiaux	100		2000
Offre sportive			
Terrains de football	10	30	300
Terrains de tennis	10		300
Terrains de golf	10		300
Fitness centers	100		3000
Gymnases	100		3000
Piscines	100		3000
Offre récréative			
Librairies	10	50	500
Aménités culturelles (théâtre, cinéma, bibliothèques, salles de spectacles)	20		1000
Cafés - Bars	100		5000
Restaurants	100		5000

FIGURE 8.23 – Méthode de détermination des masses affectées aux aménités vertes et de loisirs dans le cadre du modèle d'affectation de MobiSim

Méthode de calcul des probabilités de déplacements des agents pour les motif « loisirs » et « réseau social »

Les probabilités de déplacements des agents pour les motifs loisirs et réseau social, nécessaire à la distribution des activités dans MobiSim, ont été calculées à partir des résultats de l'enquête sur les pratiques culturelles au Luxembourg. Cette enquête, effectuée sur les individus du panel PSELL au LISER, date de 2009 et comprend 1 455 individus. Pour les deux motifs, la méthode employée est identique : 1) recodage des variables de fréquence ; 2) somme des fréquences pour les différents motifs intermédiaires (se promener en forêt ou aller au cinéma par exemple) afin d'obtenir une seule fréquence pour toutes les activités ; 3) application d'un arbre de décision, avec en variable dépendante la fréquence de déplacement pour le motif concerné (loisirs ou réseau social) et en variables indépendantes, les caractéristiques socio-économiques des individus. La méthode CHAID a été employée, avec les paramètres indiqués sur les figures 8.24 et 8.25 ; 4) pondération des résultats de l'arbre de décision par le nombre d'individus par classe et obtention de probabilités finales.

Exemple pour la probabilité d'effectuer des loisirs

1^{ère} étape : Recodage des variables de fréquentation en fonction d'une probabilité journalière : Jamais = 0, épisodiquement, plus rarement = 1/60, régulièrement, au moins une fois par mois = 1/30, une fois par semaine = 1/7, plusieurs fois par semaine = 3/7

2^{ème} étape : Somme des différentes variables numériques pour construire une variable unique « loisirs_jour », qui représente la probabilité pour un individu d'effectuer un déplacement concernant ce motif.

3^{ème} étape : Analyse de cette variable par un arbre de décision, la variable « loisir_jour » étant la variable dépendante et les variables : taille du ménage, sexe, classes d'âge, niveau d'études, statut d'activités, CSP, horaires de travail décalés et nombre d'heures de travail hebdomadaire les variables indépendantes.

4^{ème} étape : Ajout d'une variable « loisirs_classe », qui reprend les trois nœuds obtenus par la classification statistique. Calcul de la pondération de la variable « loisir_jour » par le champ poids de l'individu, contenu dans l'enquête et calcul de la moyenne pondérée par classe d'individus. Ces trois valeurs constituent les probabilités de déplacement pour le motif loisir de chacun des types d'individus.

- salarié / indépendant / chômeur = 0,52 ;
- étudiant ou élève / autre = 0,79 ;
- retraité / au foyer sans autre activité / handicapé = 0,4.

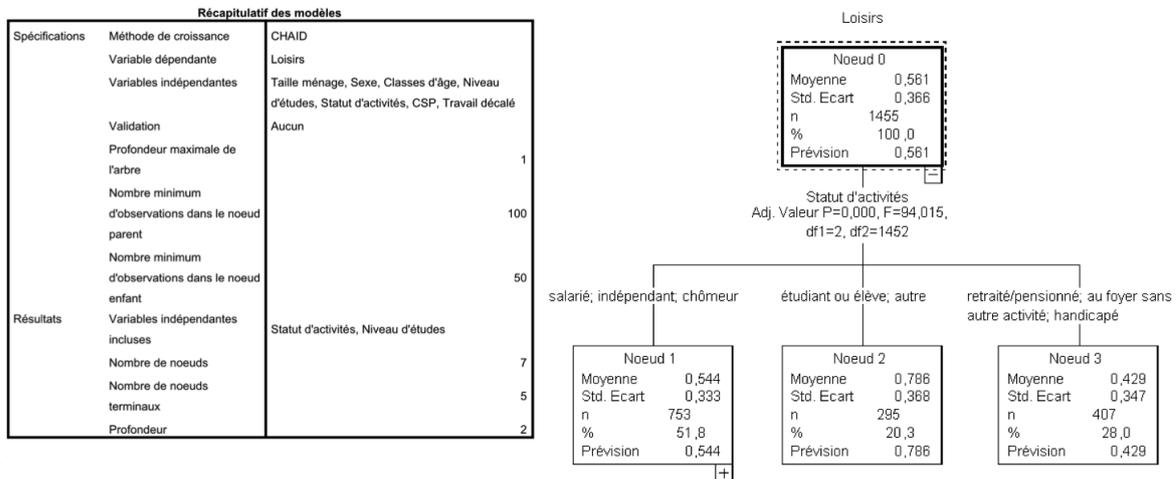
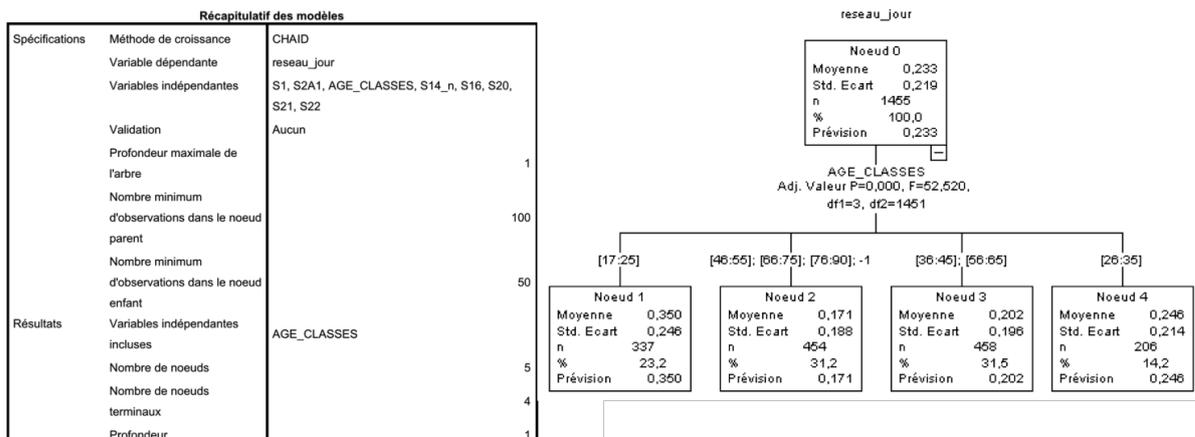


FIGURE 8.24 – Résultats de l'arbre de décisions sur les données de l'enquête relative aux pratiques culturelles, pour le motif loisirs, au Luxembourg en 2009

Exemple pour la probabilité d'effectuer des loisirs

De même que pour les loisirs, la moyenne pondérée par classe a été calculée. On obtient alors deux classes d'individus, les 17-25 ans, avec une probabilité de déplacement de 0,36 et les autres classes d'âge, avec une probabilité de déplacement de 0,21.



S1 = nombre d'individus dans le ménage ; S2 = genre ; S14 = niveau du plus haut diplôme obtenu ; S16 = statut d'activité (actif, retraité, étudiant...) ; S20 = catégorie socio-professionnelle ; S21 = travail en horaires décalés ; S22 = nombre d'heures travaillées par semaine

FIGURE 8.25 – Résultats de l'arbre de décisions sur les données de l'enquête relative aux pratiques culturelles, pour le motif réseau social, au Luxembourg en 2009

Coupures de presse

« MY HOME IS MY CASTLE » : L'AMOUR DU LUXEMBOURGEOIS POUR SA MAISON INDIVIDUELLE

Dr Robert L. Ruysschaert

La note N°12/2009 de l'Observatoire de l'habitat vient de le confirmer : 95% des Luxembourgeois préfèrent la maison individuelle à tout autre type de logement. La population résidente est majoritairement propriétaire de son domicile. L'IVL regrette l'étalement urbain non bridé, la consommation outrancière d'espace. Avec la centralisation décentralisée, on se rapproche quelque peu du modèle culturaliste de la ville traditionnelle. Les embouteillages et le gaspillage d'énergie et de temps sont contreproductives tant pour l'économie que pour la qualité de vie.

Certes, le goût prononcé de l'individualisme tient sa part de responsabilité dans cette évolution, tout comme la mobilité. Mais la situation, telle que nous la connaissons est le fruit d'une politique volontariste, renouvelée de génération en génération. Le Luxembourgeois si fière de sa maison n'est que responsable en partie de son « amour » pour sa propriété. Il a été carrément formé, éduqué à cette fin.

Les communes rurales confrontées à l'exode vers les villes étaient au bord du gouffre financier. Une population en diminution ne pouvait plus assurer le financement des services à offrir. Les communes rurales allaient rendre des terrains disponibles à la construction, profiter de la tertiarisation de l'économie, et attirer de nouveaux habitants. Les prescriptions d'habiter la commune ou le lieu de son travail furent supprimées au nom de la liberté individuelle.

Des abattements d'impôts ont encouragé l'exode des villes vers les campagnes. Enfin, on cessait de vivre à l'ombre du lieu de travail et pouvait choisir un cadre de vie personnalisé. Des conditions de prêt à l'acquisition de voitures individuelles ont soutenu une mobilité galopante. Ces phénomènes apparus dès la fin des années 1960, ne se sont que greffés sur un terrain déjà amplement préparé d'avance totalement en faveur de l'habitat dans un écrin de verdure.

Le goût de la maison individuelle remonte à la politique sociale du XIXe siècle. Ce goût s'explique aussi par la place que détient l'individu dans une société devenue anonyme suite à la division du travail et aux migrations. L'égalité des chances donne à chacun la liberté de s'affirmer. La dénatalité constatée déjà au XIXe siècle dans les milieux citadins a renforcé la place de l'individu dans la société. Il prend plus de place dans les mentalités, et ce n'est pas un hasard de voir émerger le goût pour la maison individuelle en parallèle avec celui pour le caveau individuel ou familial au détriment de la fosse commune !

La société industrielle d'antan se basait sur des populations rurales migrées vers les centres industriels et d'affaires. Ils furent logés dans des « casernes » aux conditions hygiéniques souvent pitoyables. Ce furent des foyers tant d'épidémies que d'insurrection. Il fallait se pencher sur les questions du logement pour l'ouvrier, l'employé, le fonctionnaire. Catholiques sociaux et libéraux étaient unanimes pour dire que la maison individuelle, centrée sur la famille, entourée de verdure fut le modèle le plus sain à adopter pour loger ces nouvelles couches sociales et de migrants. Ils recopiaient aux échelles sociales leurs propres normes de valeur et modes d'habitat. Le bourgeois vivait dans une réplique en miniature du château de l'aristocrate, l'employé et l'ouvrier

issu des couches rurales de la population devaient se contenter d'un logement rural modernisé. L'accès à cette propriété fut cependant limité aux classes moyennes susceptibles de s'intégrer progressivement dans la bourgeoisie moyenne. D'autre part, il fallait clouer le travailleur au sol pour mieux stabiliser l'économie. Pour y réussir, il fallait développer un langage architectural capable de persuader le migrant à vouloir s'installer.

La ville industrielle fut donc rapidement décriée comme véritable « monstre ». Elle n'était plus « désirable » aux yeux de ses habitants, respectivement des migrants. Elle devint synonyme de criminalité, de dégénérescence, d'épidémies, de bruits, d'absence d'air, de lumière et de nature. Que recherchent encore aujourd'hui nos compatriotes qui construisent leur « bungalow » dans un pré quelconque ? La Nature. Une image idéalisée de la campagne où le cultivateur est bien celui qui entretient une coulisse. Des études menées par l'Université de Genève ont montré que ce sont ceux qui s'installent dans les campagnes sont les plus résistants à tout changement de leur environnement. Ils s'insurgent contre tout ce qui perturbe leur image idéalisée, poussant de ce fait l'étalement à se poursuivre à grande échelle.

Au XIXe siècle, la réaction contre l'architecture nouvelle des villes s'est organisée autour de mouvements qu'on qualifiait de « régionalistes ». Ils s'opposaient contre une architecture universaliste, interchangeable, qui privait les villes de leur caractère unique, historique et environnemental. Cette architecture universaliste s'exprimait notamment par le néo-classicisme et la néo-Renaissance importée de la Méditerranée vers les pays nordiques. Cette architecture exportée partout dans le monde, symbolisait l'Etat

centralisateur, voire même colonisateur. Les régionalistes prônaient un urbanisme et une architecture respectueux du climat, de la topographie, de la flore, du patrimoine historique. Ils regrettaient l'urbanisme reposant sur des axes en perspectives totalement insoucieux du tissu urbain, de la topographie, de l'histoire, de l'environnement. Ils détestaient cet urbanisme ostentatoire qui exposait l'architecture représentative comme joyaux à admirer. L'urbanisme et l'architecture régionalistes, par contre, axés sur la dimension humaine, sur l'homme concret, exprimaient l'aspiration du peuple à plus de démocratie, à davantage de participation aux faits sociétaux.

Les architectes et urbanistes régionalistes se sont mis à étudier avec acribie l'architecture mineure, celle des campagnes, celle du Moyen Age, celle de l'homme ordinaire, non pas dans le but de copier l'ancien, mais d'en distiller l'essentiel pour mieux répondre aux questions du moment. Leur constat fut impressionnant : la maison rurale réunissait la famille, habitat et morale, le travail et les loisirs. Elle exploitait au mieux les conditions climatiques, maintenait le lien avec l'environnement naturel et le patrimoine historique. Ils se montraient fascinés par la rationalité de l'espace inventée par le cultivateur pour sa maison. Ils confrontaient ces nouvelles connaissances aux nouveaux matériaux de construction et aux nouvelles normes d'hygiène pour opérer leurs « choix raisonnés » et concevoir la maison moderne, issue de son environnement, la maison unifamiliale du périurbain ! Leur mouvement devait combattre la laideur des villes et leur redonner leur charme type et pittoresque.

Ce modèle fut fortement promu par le Gouvernement, avec en tête Paul Eyschen, Ministre d'Etat. Il fut soutenu par une équipe de personnalités avisées, comme l'architecte de l'Etat,

Charles Arendt, qui recherchait lui-même à définir la maison luxembourgeoise suite à l'étude des « traits essentiels de l'âme luxembourgeoise ». Antoine Hirsch, directeur de l'Ecole d'artisans de l'Etat fut une autre personnalité engagée dans la définition du « Heimathaus ». Le professeur Auguste van Werveke présenta la première « maison luxembourgeoise » en 1904 dans le cadre de l'Exposition nationale de l'artisanat et du commerce. Georges Traus et Nicolas Petit, Jean-Pierre Koenig et Jean Warken sont indissociables du mouvement au Luxembourg. Emile Mayrisch, comme directeur de l'ARBED s'investit beaucoup dans les questions du logement social, et prônait à son tour, la maison individuelle s'inspirant de l'ancien logement rural. Il s'en référa pour la construction des colonies ouvrières. La création du Crédit Foncier en 1906 assurant des crédits pour la construction de logements à prix modérés fut au départ de deux concours, en 1907 et 1909 pour définir la maison du Bon Pays et celle des Ardennes. Paul Eyschen parcourut personnellement les campagnes pour promouvoir la maison individuelle luxembourgeoise. Il fut impressionné par le Colloque tenu en 1909 à Trèves sur le thème du régionalisme en architecture et urbanisme. En 1911 il invita à Luxembourg le Dr Kampffmeyer, secrétaire général de la Gartenstadtbewegung. Emile Hellemans, grand architecte bruxellois, réputé pour son architecture à prix modérés, présenta dans ce cadre ses modèles de maisons pour le Bon Pays, les Ardennes, les régions industrielles du pays. La Gelsenkirchener Bergwerks AG fut la première à construire, au bassin minier, des colonies ouvrières sur le modèle de la cité-jardin.

Or, la « maison luxembourgeoise » ou « Heimathaus » fut plus proche de l'habitat à prix modéré allemand ou belge que de modèles de logement typiquement luxembourgeois et historique.

La maison luxembourgeoise fut donc en quelque sorte un produit d'importation. Le patrimoine historique national ne présentait guère de particularismes architecturaux. Il suffisait donc de s'inspirer de cette architecture régionaliste conçue pour les pays nordiques et répondant aux critères d'un logement pour les classes moyennes. Le mouvement régionaliste fut un mouvement international auquel le Luxembourg se ralliait. Le caractère luxembourgeois lui fut attribué par le recours quasi exclusif à des matériaux de construction locaux et à des fournisseurs autochtones.



Or, il serait erroné de croire que ce modèle de ville fut introduit à ce moment uniquement. Le modèle remonte, pour le Luxembourg à 1868, moment où une commission fut en charge de dresser le premier plan d'aménagement de la ville de Luxembourg. Au XIXe siècle, architectes et urbanistes avaient bien compris qu'une ville démunie de ses remparts se dilue dans l'espace à l'image d'une tâche d'huile. Ils inventaient une architecture représentative susceptible de traduire la centralité du lieu. Ils comprenaient aussi que les villes ne pouvaient s'étaler sans aucune structuration de l'espace. A nouveau ils se tournaient vers la structure du village pour organiser les nouveaux quartiers. Ils introduisent la voie irrégulière, les constructions librement disposées ou regroupés dans l'espace. Du coup la ville historique et les nouveaux quartiers semblaient fusionner. Ce fut du moins ce que l'on espérait.

Les Gouvernements luxembourgeois de 1867 à 1930 furent proche du mouvement régionaliste aussi sur le plan urbanistique. Ils s'entouraient de personnalités réputées pour leur engagement en faveur de cet « urbanisme vert » : Louis Fuchs et Edouard André furent des ingénieurs paysagistes. Leur aménagement de l'espace se nourrissait dans la peinture du pleinairisme et ils concevaient les parcs comme jardins anglais susceptibles de rendre l'image d'une campagne idéalisée, imitant étangs et cascades, grottes, etc. Victor Jammaer, architecte de la ville de Bruxelles, proche de Charles Buls et régionaliste convaincu approuva en 1873 le plan d'aménagement général de la ville de Luxembourg. L'architecte Jean Baes, réputées pour ses villas en cottage style, fut appelé par le Gouvernement pour prêter main forte à l'aménagement du palais grand-ducal. Joseph Stubben qui œuvrait à son tour à Luxembourg, Esch-sur-Alzette, Dudelange et Differdange, fut un grand protagoniste de

l'urbanisme régionaliste. Le plan d'aménagement de la ville de 1873 n'est rien d'autre qu'un park estate, inauguré la même année en Grande Bretagne. Il ne fut point un hasard que Luxembourg-ville était caractérisée par des villas entourées de grands jardins et de parcs qui fusionnaient avec le parc de la ville (tant les villas construites au centre même du parc que celles du bd Joseph II donnant sur le parc). Edouard André aménagea tous ces parcs et jardins privées pour qu'ils s'intègrent au mieux au parc que représente tout l'ancien front de la plaine. La ville de Luxembourg de 1873 présente même des traits typiques de la cité jardin trente ans avant Howard Ebenezer ! Ce schéma développé pour la bourgeoisie sera reproduit, avec les adaptations qui s'imposaient pour créer les quartiers résidentiels, les colonies de maisons d'employés et d'ouvriers.

La maison individuelle dans son écrin de verdure, et avec tous les méfaits qu'elle puisse produire, représente bel et bien une tradition au Luxembourg, ce qui explique l'attachement à ce modèle d'habitat promu par l'Etat pendant plus d'un siècle.



FIGURE 8.26 – Extrait de Carnets d'opinions n°3 Baukultur, article de Robert Philippart, 2009

MAISON, SACRÉE MAISON

Avec 73% de la population résidente propriétaire de son logement, le Luxembourg se situe légèrement au-dessus de la moyenne européenne. Une proportion qui, en revanche, atteint 84,5% (source : recensement 2011) si on ne tient compte que des résidents ayant la nationalité luxembourgeoise.

Le rapport de l'habitant luxembourgeois avec son logement a toujours été passionnel. La configuration démographique et sociologique qui a, pendant longtemps, été celle du pays, a largement contribué à dessiner son paysage urbanistique. Aujourd'hui, les deux tiers des habitants du pays vivent dans les maisons unifamiliales, et plus d'un quart dans une maison isolée, accolée à aucune autre habitation. La maison, c'est sacré...

Ceux qui, il y a 20 ans, ont fait le choix de devenir propriétaires peuvent aujourd'hui se frotter les mains : avec la vertigineuse croissance démographique (le pays comptait 408.000 habitants en 1995 et 563.000 aujourd'hui, soit une hausse de 38%), la demande n'a jamais été en mesure de suivre l'offre, induisant, mécaniquement, une forte hausse des prix de l'immobilier, largement supérieure à celle de l'inflation.

Une bulle ? Non, à en croire les analystes de l'Observatoire de l'habitat et de la Banque centrale, tant que la demande reste soutenue. Et c'est le cas. Un mur pour ceux qui souhaitent accéder à un logement, y compris en location ? Certainement. Comme le montrent les différentes données reprises dans ce supplément spécial, aucun type de bien n'est épargné par le phénomène et pratiquement aucune région géographique non plus.

La problématique ne date donc pas d'hier et les gouvernements successifs se sont penchés avec plus ou moins de bonheur sur la question. La précédente législature a mis en place le Pacte logement, aujourd'hui signé par 98 communes sur les 105 que compte le pays. Le gouvernement arrivé au pouvoir en décembre 2013

s'est donné comme « premier objectif » de « maîtriser l'évolution des prix sur le marché immobilier en augmentant l'offre de logements et de terrains constructibles ».

La coalition DP-LSAP-Déi Gréng a identifié pour cela quatre leviers d'action : la mobilisation de terrains à bâtir, la dynamisation de la création de logements sociaux et de logements à prix abordables, la révision de ce Pacte logement et la réforme de l'impôt foncier et des subsides au logement.

Un an et demi après la publication de ce programme, les choses n'ont pas énormément bougé, en tous les cas certainement pas au rythme souhaité. « Je crois peu aux miracles », reconnaît Marc Hansen, le tout nouveau secrétaire d'État au Logement, interviewé dans ce supplément. *Il faut être pragmatique et surtout patient. Les évolutions en matière de logement se font sentir sur des années. C'est loin d'être une problématique qui peut se résoudre rapidement.* »

Vu du côté de ceux qui cherchent à accéder à un logement à un prix supportable, la patience a des limites. Sur quelque 60.000 locataires recensés sur le marché privé du logement, environ 20% sont dans une situation où la part du logement dans leurs dépenses mensuelles, charges comprises, représente plus de 40% de leurs revenus disponibles, ce qui constitue un indicateur de grande précarité. Mais les alternatives ne sont guère réjouissantes non plus : ce ne sont pas les travailleurs frontaliers, bloqués chaque matin sur la route ou comprimés dans les wagons de train, qui penseront le contraire.

Sans doute le rêve d'accession à une petite maison tranquille avec jardin n'est-il plus vraiment de mise pour les générations actuelles et futures. Mais la question du « bien loger » est clairement un enjeu sociétal qui va devenir majeur à très court terme, directement lié à ceux de la mobilité et du « vivre ensemble » auxquels les autorités

publiques du Luxembourg - forcément soutenues par les acteurs privés - devront trouver rapidement les bonnes réponses. Défi, sacré défi. ◀

Par **Jean-Michel Gaudron**,
rédacteur en chef de Paperjam
E-mail : jean-michel.gaudron@paperjam.lu
Twitter : @jmgaudron

FIGURE 8.27 – Paperjam, Supplément - Guide de l'immobilier résidentiel, août 2015

Besoins à l'horizon 2030 : il faudrait 80 000 logements

Le constat est alarmant. Le Luxembourg manque cruellement de logements, alors que le pays connaît une forte croissance démographique. La construction est à la peine et les terrains constructibles se font rares.

La population du Grand-Duché augmente bien plus vite que la construction de logements. Le Conseil économique et social a livré ses recommandations pour que le logement, problème numéro un au Grand-Duché, devienne plus accessible.

Avant de donner ses recommandations, le CES a dressé un constat. Et autant le dire tout de suite, malgré toutes les recommandations, la situation du Grand-Duché est dramatique en matière de logement. Pénurie de logements, construction à la peine avec un manque cruel de terrains, il sera bien difficile d'inverser la tendance.

Les chiffres sont édifiants : selon les projections du Statec, entre 2010 et 2030, il faudrait 129 000 nouveaux logements, soit 6 500 nouveaux logements par an, dont 4 000 rien que pour l'accroissement démographique. Or on est loin du compte puisque en moyenne, de 2002 à 2010, environ 2 800 logements par an ont été construits. Alors, comme tout ce qui est rare, les prix des logements se sont envolés au Luxembourg et acheter devient très problématique.

Un facteur-clé qui influe notamment sur les prix : le foncier constructible. Selon l'Observatoire de l'habitat, 2 701 hectares sont potentiellement constructibles. Alors que 317 hectares, selon l'avant-projet « plan sectoriel logement », ne faisant pas partie du périmètre

d'agglomération actuel, sont réservés à des projets d'envergure destinés à l'habitat.

Le CES a donc fait le calcul : ce sont 3 018 hectares qui, au Luxembourg, sont potentiellement constructibles. D'ici 2030, environ 50 000 nouveaux logements pourraient être construits. Les chiffres sont impressionnants mais largement insuffisants, puisque pour couvrir les besoins résultant du seul accroissement de la population, il faudrait 80 000 nouveaux logements.

Pas de solution miracle

Et il n'y a pas de solution miracle pour le foncier : « Même si le potentiel foncier était pleinement exploité, il y aurait un manque de plus ou moins 30 000 nouveaux logements d'ici à 2030 », explique Gary Kneip, président du CES. Reste donc l'intervention publique, qui est pour l'institution incontournable. Pour le CES, les pouvoirs publics vont devoir utiliser les différents moyens d'intervention à leur disposition : aménagement du territoire, pacte logement, etc. Ceci afin de débloquer l'offre de terrains, mais aussi de réduire les prix du logement. Dans cette optique, le CES préconise de mesurer l'efficacité de ces instruments.

Alors comment agir ? Le CES reconnaît que le prix du foncier constitue le facteur essentiel du caractère de plus en plus inabordable du logement : « La clé d'une réduction du prix du loge-



Au Grand-Duché : pénurie de logements, construction à la peine avec un manque cruel de terrains, il sera bien difficile d'inverser la tendance. Photo RL

ment c'est de réduire de façon substantielle le coût du foncier », poursuit Gary Kneip, qui évoque certains ménages où 50 % du budget est alloué au logement.

Parmi les principales recommandations pour lutter contre la hausse des prix du logement, le CES préconise une extension des périmètres d'agglomération. Les zones urbaines devraient grignoter sur les campagnes pour gagner de l'espace habitable. Il faudra mettre en place d'un côté des mesures pour combattre la spéculation foncière et de l'autre des taxes sur la rétention de terrains. La position du groupe salarial au sein du CES est plus précis : il faudra l'intervention de l'État pour un

plafonnement des prix des terrains dans les nouvelles zones d'agglomération, par aire et par région.

Parallèlement, il va falloir mobiliser les terrains non bâtis avec notamment une obligation de construire prévue dans la législation qui serait appliquée par les communes. L'objectif est de donner tous les pouvoirs aux communes pour pousser les propriétaires de terrains à bâtir. Il va falloir également augmenter la densité résidentielle du bâtiment, en clair : moins de jardins et des immeubles plutôt que des maisons individuelles.

Concernant le logement subventionné, ce dernier devrait rele-

ver de l'exception selon le CES. Le promoteurs publics vont devoir néanmoins recentrer leurs missions en faisant la promotion de la construction de logements locatifs, dès lors un quota de logements subventionnés devrait atteindre la même proportion par rapport au nombre total de logements que le taux de la population exposée à un risque de pauvreté. Tout cela alors que les futurs partis de la coalition sont en pleine discussion pour former un futur gouvernement. Et la question du logement risque de faire débat.

Audrey Somnard.
(Le Quotidien)

FIGURE 8.28 – Républicain Lorrain, Édition de Thionville, Jeudi 7 novembre 2013

Demande et besoins en logements

Quelles solutions potentielles pour les acteurs publics ?

Un pays de propriétaires occupants

Le Luxembourg est avant tout un pays de propriétaires occupants, puisque plus de 68 % des ménages étaient propriétaires de leur logement en 2010 (parmi lesquels 39 % n'avaient pas terminé le remboursement d'un prêt pour l'acquisition de leur logement, alors que 29 % avaient achevé ces remboursements). Le Luxembourg se situe à ce titre au-dessus de la moyenne de l'Union Européenne, en-dessous des chiffres de l'Espagne (83 % de propriétaires), mais très largement au-dessus du niveau relevé en Allemagne (seulement 53 % de propriétaires).

Une proportion non négligeable des ménages n'est plus en mesure d'accéder à la propriété, modèle résidentiel dominant jusqu'ici au Luxembourg. Une Note récente de l'Observatoire de l'habitat montre ainsi que seuls 61 % des ménages locataires résidents avaient les ressources financières suffisantes pour acheter un appartement correspondant à leurs besoins en 2009, et que 31 % seulement pouvaient se permettre d'acheter une maison. Entre 2005 et 2009, la capacité d'achat des locataires semble avoir fortement diminué, et les ménages les plus touchés sont les familles monoparentales, ainsi que les couples avec un ou plusieurs enfants. Par exemple, seules 46 % des familles monoparentales auraient pu envisager d'acheter un appartement d'une taille suffisante en 2009. Or, le Luxembourg étant un pays de propriétaires, une très grande majorité des aides étatiques est destinée à faciliter l'accès à la propriété, et l'accès au logement locatif n'est que marginalement aidé.

Un marché de la location peu profond et peu subventionné

29 % des ménages locataires du parc privé (c'est-à-dire payant un loyer au prix du marché) vivent aujourd'hui en-dessous du seuil de risque de pauvreté, ce qui représente environ 14 000 ménages en 2009. Parmi ceux-ci, plus de 43 % consacrent plus de 40 % de leurs revenus disponibles aux dépenses de logement (loyer et charges liées au logement) et 59 % déclarent avoir des difficultés à « joindre les deux bouts ».

Depuis 2003, ce taux de risque de pauvreté des locataires a fortement augmenté, et le Luxembourg se situe aujourd'hui au-dessus de la moyenne européenne en la matière.

Seulement 4,3 % des ménages bénéficient d'un loyer modéré ou d'un logement à titre gratuit, alors que 27,6 % des ménages s'acquittent d'un loyer au prix du marché. Seuls 1,5 % des ménages sont véritablement logés dans des logements locatifs sociaux du Fonds du Logement, de la Société nationale des habitations à bon marché (SNHBM) ou appartenant à des administrations communales, ce qui correspond à un total d'environ 3 000 logements locatifs sociaux. 1,5 % des ménages sont des ménages locataires payant un loyer inférieur au prix du marché, mais parce qu'ils sont logés par des membres de leur famille ou bénéficient d'une aide de leur employeur. Enfin, près de 2 % des ménages sont quant à eux logés à titre gratuit. Ici, il apparaît que l'appel à l'aide intergénérationnelle est une dimension essentielle au Luxembourg, pour les accédants à la propriété, mais également pour le paiement d'un loyer. Cette aide permet de pallier l'absence de subventions de l'État, ou vient en complément des dispositifs existants.

L'accès à un logement décent devient de plus en plus coûteux, et la part du revenu disponible des ménages consacrée aux dépenses de logement a fortement augmenté depuis plusieurs années. C'est particulièrement le cas pour les outsiders du marché du logement, c'est-à-dire les ménages les plus jeunes principalement qui sont contraints de changer de logement, pour des raisons professionnelles ou familiales (en cas de mise en couple, de naissance d'un enfant,...). Au contraire, les ménages occupant le même logement depuis longtemps n'ont pas été affectés dans la mesure où les cas parmi les propriétaires, pour lesquels les hausses récentes des prix du logement ont même constitué une augmentation de leur patrimoine. Mais c'est également le cas pour les locataires, puisque les loyers en cas de changement de location ont augmenté beaucoup plus vite que les loyers de ceux qui n'ont pas changé de logement.

Finalement, les mouvements récents des prix de vente et des loyers ont conduit à une forte redistribution des revenus et de la richesse. Ce sont donc les locataires, dont la situation financière appelle à un soutien appuyé, qui sont les moins aidés financièrement pour le paiement de leurs charges de logement.

La montée de situations d'exclusion du logement

Pour les situations les plus graves, un nombre important de ménages se retrouvent en situation d'« exclusion du logement ». Une enquête réalisée par le CEPS/Instead en 2006 dénombrait ainsi 715 personnes en situation d'« exclusion du logement ». 23 % des personnes en situation d'exclusion appartenaient à la catégorie des « sans-abris », alors que 59 % étaient des personnes « sans logement » vivant dans des foyers, des centres d'accueil, des logements encadrés, etc. Surtout, l'étude du CEPS/Instead montrait que la situation de sans-abri n'est que la situation la plus extrême, l'aboutissement d'un phénomène d'exclusion du logement. Pour de nombreux ménages, le coût du logement représente un lourd fardeau, et un événement fortuit (perte d'emploi, chômage partiel, séparation du couple) risquerait de conduire progressivement ces ménages fragiles vers une situation d'exclusion du logement. Dans cette situation de pénurie de logements à prix abordable, l'intervention de l'État semble donc particulièrement nécessaire.

Besoins en logement au Luxembourg

Les dernières estimations du STATEC sur l'évolution de la demande potentielle et des besoins en logements ont été réalisées par François Peltier à partir de projections démographiques pour la période 2010-2030. Dans le scénario démographique central, le nombre total de ménages augmenterait d'un peu plus de 40 % entre 2010 et 2030, pour atteindre 284 438 ménages en 2030. Le nombre moyen de personnes par ménage diminuerait quant à lui, passant de 2,43 en 2010 à 2,23 personnes par ménage en moyenne en 2030.

De façon très intéressante, les exercices du STATEC suggèrent que la baisse de la taille des ménages est due essentiellement à la déformation de la structure par âge de la population luxembourgeoise (les ménages de retraités comptant moins de membres que les ménages constitués de couples de 20 à 40 ans, qui ont plus fréquemment des enfants à charge), alors que l'évolution des comportements de décohabitation (avec notamment l'augmentation du nombre des divorces) joue un rôle moindre.

A partir des projections des ménages privés, François Peltier projette les besoins en logements correspondants. Pour faire face à l'accroissement du nombre de ménages (un plus de 81 702 ménages), le nombre de logements nouveaux à construire devrait légèrement dépasser les 4 000 logements par an. En complément, 45 600 logements environ seraient nécessaires pour assurer le remplacement du stock de logements, soit environ 2 280 logements supplémentaires par an. Au total, les besoins en logements nouveaux s'élèveraient à environ 129 000 logements nouveaux, soit un peu plus de 6 500 logements nouveaux chaque année de 2010 à 2030.

Ce nombre est très nettement supérieur aux dernières statistiques sur les logements achevés chaque année. Selon les chiffres les plus récents du STATEC, le nombre de logements achevés ne s'élevait qu'à 2 266 en 2006, 3 023 en 2007, 4 444 en 2008 et 3 740 logements en 2009. Dès lors, il apparaît clairement que l'effort de construction devra être intensifié dans les prochaines années.

Néanmoins, François Peltier souligne que les exercices de chiffrage de la demande potentielle en logements doivent être interprétés avec prudence. Il s'agit simplement d'un exercice de projection démographique, tendanciel. Les facteurs économiques, en particulier les évolutions des prix des logements, des loyers, du revenu des ménages privés et des taux d'intérêt, ne sont pas implicitement intégrés à ces projections. Toutes ces variables macro-économiques sont ici supposées évoluer tendanciellement. Dès lors, ces projections ne permettent pas d'évaluer les conséquences d'une nouvelle hausse des prix de logements et des loyers. Autrement dit, que se passerait-il si l'offre de logements évolue conformément aux projections relatives aux besoins en logements, mais avec des prix des nouveaux logements construits

totallement inabordables pour une frange non négligeable des nouveaux ménages ? Par ailleurs, les exercices de projection du STATEC n'intègrent pas la possibilité d'un déséquilibre initial du stock de logements disponibles. Dans ces cas, les besoins en logements pourraient être plus importants que les 6 500 logements par an annoncés, pour que ce déficit initial puisse progressivement se résorber.

Les outils à la disposition des acteurs publics

Les outils à la disposition des pouvoirs publics pour lutter contre une pénurie de logements à prix abordables peuvent être schématiquement classés en trois catégories : 1. des mesures visant à accroître l'offre sur le marché du logement ; 2. des dispositifs cherchant à agir sur la demande en la « solvabilisant » ; 3. des outils de régulation et de réglementation du marché du logement.

Par ailleurs, l'une des caractéristiques du marché du logement luxembourgeois étant le faible niveau de mobilité résidentielle, une solution complémentaire pourrait être de chercher à faciliter cette mobilité.

Comme le souligne Marco Hoffmann, « le discours politique des dernières années s'est fortement articulé autour du « Pacte logement », un pacte qui vise un effort conjoint – étatique et communal – pour augmenter l'offre ». La loi du 22 octobre 2008 prévoit en effet la création d'un pacte liant directement l'État et les communes pour favoriser la construction de nouveaux logements. Par la signature du pacte logement, les communes s'engagent ainsi à augmenter leur population d'au moins 15 % sur une période de 10 ans, à participer activement aux efforts et mesures de l'État visant à réduire le coût du foncier, à assurer une mixité sociale de la population, et à favoriser une densité de bâti appropriée qui permettra une utilisation rationnelle des ressources foncières. Pour réduire le coût du foncier, la loi du 22 octobre 2008 a aussi prévu la création de nouveaux instruments et a renforcé certains instruments existants à disposition des communes. A peine plus de trois ans après le vote de la loi du 22 octobre 2008, il est difficile de procéder à son évaluation complète. Même si les communes remplissent leurs objectifs dans les dix prochaines années, le nombre de logements nouveaux par an construit dans ces 103

communes (5 200) ne sera toutefois pas suffisant pour faire face aux besoins quantitatifs en logement identifiés par le STATEC (environ 6 500 logements par an de 2010 à 2030).

En revanche, il faut noter que les instruments prévus dans la loi du 22 octobre 2008 n'ont pour l'instant été que modérément utilisés par les communes signataires. Par exemple, il apparaît qu'aucune des communes signataires du pacte logement n'a pour l'instant utilisé les systèmes de taxation permis par la loi du 22 octobre 2008.

Compléter ou réorienter les aides individuelles au logement

Actuellement, les aides individuelles au logement sont surtout destinées à favoriser l'accès à la propriété. Les aides en capital (primes de construction et d'acquisition) et les aides en intérêt (subvention et bonification d'intérêt) absorbent une forte part du budget consacré à la politique du logement au Luxembourg. Ces aides permettent d'alléger la charge représentée par le remboursement de l'emprunt pour une frange importante des ménages accédants à la propriété.

En revanche, il faut souligner que l'attribution de la bonification d'intérêt ne dépend que de la composition des ménages, et pas du tout de conditions sur les revenus des ménages accédants à la propriété. Une réorientation de certaines des aides individuelles à l'accession à la propriété pourrait donc être envisagée. Le ministère du Logement prévoit déjà de conditionner certaines de ces aides à des critères liés aux performances énergétiques des bâtiments, pour inciter les futurs acquéreurs à être attentifs à l'isolation et à l'efficacité du système de chauffage dans le choix de leur logement.

Pour aider les locataires, qui ne disposent pour l'instant quasiment d'aucune aide pour la prise en charge de leur loyer alors qu'ils sont les plus nombreux à figurer en dessous du seuil de pauvreté, il pourrait être envisageable de créer une allocation ou une subvention pour ces ménages, qui viendrait utilement compléter le dispositif de « garantie locative » existant pour aider les ménages à intégrer le marché de la location. Le règlement grand-ducal du 2 avril 2004 introduisant l'« aide étatique au financement d'une garantie locative »

n'a connu qu'un succès limité, puisqu'il est stipulé que le loyer versé par le futur locataire ne devrait pas représenter plus du tiers de ses revenus disponibles pour que ce locataire puisse prétendre à une garantie locative. Or nombreux sont les locataires qui consacrent plus de 33 % de leur budget au paiement de leur loyer, particulièrement parmi les ménages modestes, *a priori* les plus concernés par le besoin d'une garantie locative. L'introduction d'une aide financière visant à couvrir une partie du loyer permettrait de s'affranchir de ce problème et de « solvabiliser » les ménages locataires du parc privé. Une « subvention de loyer », sur le modèle de la subvention d'intérêt pour l'accession à la propriété, pourrait être conditionnée aux revenus et à la composition du ménage locataire.

Les détracteurs de tels dispositifs d'aide directe aux locataires pour accroître leur demande solvable arguent que ces aides conduisent essentiellement à une hausse des loyers. Certaines études menées en France suggèrent ainsi que plus de 50 % du montant des allocations perçues par les ménages locataires du parc privé ont été absorbées à court terme par des hausses de loyer et ont profité essentiellement aux bailleurs.

Toutefois, il faut noter que les aides aux locataires sont très largement diffusées en France puisque plus de 45 % des ménages locataires touchaient une aide en 2005. De plus, le taux de couverture de ces aides est très important : elles couvrent en moyenne près de 43 % du montant du loyer parmi les ménages bénéficiaires dans le secteur locatif privé. Une aide plus ciblée et plus limitée pourrait avoir des effets plus modérés sur les loyers.

Par ailleurs, l'effet potentiellement « inflationniste » de l'introduction d'une aide financière à destination des locataires pourrait être neutralisé par une réglementation visant un encadrement ou un contrôle des loyers.

Renforcer la réglementation

La mise en place d'un contrôle ou d'un encadrement des loyers peut prendre diverses formes. A ce titre, la loi du 21 septembre 2006 sur le bail à usage d'habitation (dite « loi sur le bail à loyer ») prévoit déjà une forme de plafonnement des loyers, puisque le loyer réclamé pour une année entière ne pourra pas dépasser 5 % du « capital investi » par le bailleur. En revanche, la solution extrême de blocage des loyers ne paraît guère envisageable en temps de paix, puisque cette solution risque de conduire à une forte baisse de l'offre de logements locatifs et à un non-entretien des logements. Un dispositif plus fin, prenant exemple sur les « Mietespiegel » à l'œuvre en Allemagne, pourrait en revanche fournir une solution réglementaire pour contenir les hausses de loyers. Mais un tel dispositif requiert une connaissance fine, voire exhaustive, des loyers pratiqués, ce qui n'existe pas à l'heure actuelle au Luxembourg.

De plus, il n'est pas envisageable d'encadrer les hausses de loyer sans maîtriser les évolutions des prix de vente des logements. En cas de forte hausse des prix, les rendements locatifs diminueraient en effet et rendraient l'investissement non rentable pour les bailleurs. Dès lors, la mise en place d'un système d'encadrement des loyers ne peut pas se faire sans résoudre auparavant ou dans le même temps le problème de pénurie de logement.

La réglementation peut également être utilisée pour imposer un « quota » de logements sociaux à l'échelle des projets ou des communes. Le pacte logement instauré par la loi du 22 octobre 2008 stipule ainsi que 10 % de la surface nette ou 10 % des logements réalisés doivent être réservés au logement à coût modéré dès lors que le projet de construction occupe une surface supérieure ou égale à 1 hectare. Le risque est alors que les promoteurs décident de

fractionner leurs projets pour contourner cette obligation... Le ministère du Logement note ainsi que seuls 77 logements à coûts modérés sont actuellement en construction dans l'ensemble des projets en cours dans les communes signataires du Pacte Logement.

Favoriser la mobilité résidentielle

Au Luxembourg, la mobilité résidentielle est relativement limitée, comme le suggère l'Observatoire de l'habitat dans une note publiée en 2011. Or il existe parallèlement de nombreux logements sous-occupés. Par exemple, de nombreuses personnes âgées occupent de grandes maisons, qui pourraient être utilisées pour loger des ménages avec enfants. Pour ces personnes âgées, la sous-occupation de leur logement représente également un coût, puisqu'elles doivent chauffer un logement très grand qui n'est plus nécessairement adapté à leurs besoins.

Dès lors, il serait utile de favoriser la mobilité résidentielle, en agissant sur les coûts de la mobilité (par la prise en charge d'une partie des frais et de la charge de travail engendrés par un déménagement pour les personnes âgées par exemple) et/ou en permettant à un ménage d'extraire des liquidités de sa résidence principale (en mettant en location cette résidence principale devenue trop grande pour les besoins du ménage, pour prendre en location un logement plus petit, et éventuellement plus adapté et plus accessible). Une solution alternative dans ce cadre pourrait être la mise en place de système de co-logement de personnes de différentes classes d'âge, contribuant à la mixité générationnelle et assurant des avantages mutuels pour les participants (sécurité pour les personnes âgées et loyer plus attractif pour les jeunes locataires). ◆
Patrick Bousch et Julien Licheron sont chercheurs au CEPS/Instead

FIGURE 8.29 – Forum, Mercredi 9 mai 2012

Le Luxembourg peut bâtir 30 000 logements

LUXEMBOURG - Marco Schank, ministre du Logement, a dressé ce lundi matin le bilan et les perspectives de la construction au Grand-Duché.



Luxembourg-Ville est la commune qui dispose du plus de place, avec 234 ha disponibles pour des constructions. (photo: Editpress)

Chaque commune luxembourgeoise dispose, en moyenne, de 23 hectares de terrain disponibles pour construire des logements, a expliqué le ministre délégué au Logement, Marco Schank, ce lundi matin lors d'une conférence de presse. Ce qui fait, au total, 2 701 ha de libres sur le territoire luxembourgeois. De quoi bâtir 30 000 logements. C'est la capitale qui dispose du plus de place, avec 234 ha disponibles pour des constructions, soit 8,7% de l'ensemble des terrains disponibles.

Marco Schank a également rapporté que 21,60% des zones du Plan d'aménagement général (PAG) destinées à l'habitat étaient encore disponibles et que la plupart des terrains destinés à l'habitat sont situés dans les communes à tendance rurale. 28% de l'ensemble des terrains théoriquement disponibles pour l'habitat sont mobilisables rapidement.

À noter que l'État devrait injecter 103,8 millions d'euros de plus ces prochaines années dans des logements subventionnés. Le Conseil de gouvernement a en effet donné son aval, vendredi, à un texte qui ajoute la création de 943 logements à ceux déjà prévus dans le 9^e programme de construction d'ensembles de logements subventionnés. Le texte originel tablait sur la création de 8 438 logements pour un investissement de l'État de 491 millions d'euros.

FIGURE 8.30 – L'essentiel (en ligne), Lundi 18 juin 2012



Photo : alain rischard

Près de 30 000 nouveaux logements pourraient être construits dans le pays... théoriquement. Mais de nombreux freins demeurent.

Un potentiel sous-exploité

Face au déficit de logements, l'État entend devenir un acteur influent dans ce secteur.

Près de 2 700 hectares sont théoriquement disponibles pour la construction au Luxembourg. Mais entre la théorie et la pratique, de nombreux efforts restent à faire, expliquait hier Marco Schank à l'occasion de la présentation du 9^e programme du logement.

De notre journaliste
Romain Van Dyck

En 2010, sur les quelque 5 500 hectares de terrains disponibles au Luxembourg, 2 701 l'étaient théoriquement pour la construction de logements. Soit, expliquait hier le ministre du Logement Marco Schank, «23 hectares en moyenne par commune», et un potentiel d'environ «30 000 nouveaux logements dans le pays».

Tout cela est bien beau, mais très théorique. Car cette «disponibilité» est loin de se concrétiser par la construction de logements. D'abord, plus de 70 % des terrains concernés ne sont pas mobilisables rapidement, pour de nombreuses raisons comme l'absence d'accepta-

tion de plan d'aménagement particulier (PAP).

Par ailleurs, certains acteurs ne jouent clairement pas le jeu. On se souvient du coup de gueule du Premier ministre, lors du dernier discours sur l'état de la Nation, lorsqu'il pestait contre certains «petits capitalistes»: «Est-il vraiment nécessaire que ceux qui ont des terrains pressent ceux qui en cherchent jusqu'à la dernière goutte de sang? Nous nous détruisons nous-mêmes...»

Marco Schank rappelle donc qu'il existe la possibilité de faire pression sur les propriétaires avec une «taxe spécifique» sur les terrains et les immeubles non utilisés, comme cela a pu être fait à Esch-sur-Alzette.

Car le marché est extrêmement tendu: «Les prix des logements ont explosé, et la demande de logement est plus élevée que l'offre», constate le ministre. En plus des causes précédemment citées, il met en cause la croissance démographique, le vieillissement de la population résidente, mais aussi la dimi-

nution de la taille des ménages (divorcés, célibataires en hausse) qui font pencher la balance du mauvais côté...

Des habitats durables pour fixer la population

Pour augmenter de façon significative la production de logements, un plan sectoriel a été mis en place. «L'État doit devenir un acteur influent sur ce marché du logement», prévient le ministre.

Les communes et les propriétaires privés devront collaborer davantage avec l'État. L'utilité publique et la réservation de surface pour éviter la spéculation pourront être invoquées, par exemple, dans les communes dites prioritaires (une quarantaine de communes situées principalement dans le centre et le sud du pays, là où les besoins sont les plus urgents).

Par ailleurs, l'achat de terrains à des fins immobilières permettra la viabilisation rapide des zones dites «projets d'envergure».

Ces zones concernent près de 552

hectares de terrains, pour permettre la création de 17 680 nouveaux logements et d'abriter quelque 45 000 habitants. Huit cents nouveaux logements devront être construits chaque année pendant 20 ans pour y parvenir.

Où? Principalement dans le Centre-Sud et le Sud. Un ensemble de grands projets est déjà initié sur les friches de Mersch ou encore à Wiltz.

Enfin, l'État va mettre la main à la poche et prendre en charge un montant de près de 100 millions d'euros pour permettre le 9^e programme de construction d'ensembles d'habitations. Soixante-quatorze nouveaux projets, soit 855 logements, sont attendus pour les prochaines années. Sur ces logements subventionnés, 222 seront destinés à la vente et 633 à la location. Et plus question de construire des bâtiments érigivores, d'après le ministre: «L'accent sera mis sur la qualité de ces logements, avec des habitats durables et contemporains, pour favoriser la sédentarisation de la population.»

FIGURE 8.31 – Le Quotidien, Mardi 19 juin 2012

Table des figures

1	L'approche normative, une interface entre les aspirations individuelles, les politiques d'aménagement et les préconisations de formes de villes	38
---	---	----

Chapitre 1. Objectifs, normes et règles dans l'aménagement urbain

1.1	Le problème à résoudre	46
1.2	De l'objectif aux règles, les normes	47
1.3	Champ sémantique de la norme	50
1.4	Repères historiques de quelques auteurs et utopies	57
1.5	Le plan de Milet par Hippodamos, illustration de B.F. Weber, 1999, d'après un original de À. von Gerkan, 1935	60
1.6	Plan Général de la Saline Royale de Chaux, à Arc-et-Senans, par Claude Nicolas Ledoux, 1774, les éléments de légendes, non lisibles, détaillent les fonctions des bâtiments.	64
1.7	Vision d'ensemble du projet de Phalanstère, par Charles Fourier, 1876	65
1.8	Plan pour la ville de Philadelphia, par Thomas Holme, 1682	69
1.9	<i>Victoria, Plan for a Model Town</i> , par James Silk Buckingham, 1849	70
1.10	<i>Garden-City, Grand Avenue</i> , par Ebenezer Howard, 1902	72
1.11	<i>Garden-City</i> , Organisation schématique d'un groupe de villes, une région urbaine, par Ebenezer Howard, 1902	74
1.12	<i>Le plan Voisin de Paris</i> , par Le Corbusier (1925), maquette du site d'implantation, Fondation Le Corbusier, Paris	79
1.13	Forme régionale du TOD, par Peter Calthorpe, 1993	86
1.14	Plan général du TOD « urbain », par Peter Calthorpe, 1993	86
1.15	Exemple de deux densités de construction. À gauche, 4 logements par hectare. À droite, 10 logements par hectare, illustrations de John Ellis	88
1.16	Le concept de transect appliqué à la <i>Smart Growth</i> , d'après Duany Plater-Zyberk & Company	94

1.17 Le code basé sur les formes, exemple pour la ville de Seaside (Floride, États-Unis), d'après Duany Plater-Zyberk & Company, 1986	97
1.18 Extrait du code basé sur les formes, d'après Duany Plater-Zyberk & Company, 1986	97
1.19 Les niveaux d'échelles dans la fougère, un exemple fractal, d'après Barry G. Adams (Laurentian University), 2010	100
1.20 Illustration du lien entre mesure de la densité et mesure de la fractalité, à l'aide de deux formes composées de 64 carrés, d'après Thomas et al., 2008	101
1.21 Les espaces bâtis (en noir) et non bâtis (en blanc) dans l'agglomération de Luxembourg	103
1.22 Représentation de la théorie des lieux centraux selon Christaller, 1933 et de son adaptation au modèle fractal d'urbanisation par Frankhauser et al., 2007	105
1.23 Le téragone, exemple des deux premières étapes d'itérations, d'après Frankhauser, 2000	106

Chapitre 2. Le Grand-Duché de Luxembourg et les particularités de son développement résidentiel......

2.1 Géographie physique du Luxembourg et occupation du sol	115
2.2 Les découpages administratifs du Luxembourg	118
2.3 Schéma de principe de l'organisation de l'aménagement du territoire au Luxembourg, d'après le Programme Directeur d'Aménagement du Territoire, ministère de l'Intérieur, 2003	122
2.4 Evolution de la population totale et des ménages au Luxembourg entre 1900 et 2011, Base 100 en 1900 (source : STATEC, 2011)	124
2.5 Evolution de la taille des ménages au Luxembourg entre 1900 et 2011 (source : STATEC, 2011)	125
2.6 Taux de variation de la population et du PIB au Luxembourg entre 1960 et 2010 (source : EUROSTAT, 2010)	126
2.7 Taux de variations de la population entre 1960 et 2010 au Luxembourg (source : EUROSTAT, 2010)	127
2.8 Répartition de la densité de population au Luxembourg à l'échelle des localités en 1843 et 2001 (Source : Gerber et Klein, 2009)	128
2.9 Variations de population au Luxembourg entre 2001 et 2011	130
2.10 Evolution des volumes de construction de bâtiments, logements et maisons unifamiliales au Luxembourg, Observatoire de l'Habitat, 2014	132

2.11 Evolution des prix de l'immobilier au Luxembourg, à partir d'une base 100 en 2005, Observatoire de l'Habitat, 2014	133
2.12 Prix moyens annoncés à l'achat pour une maison individuelle au Luxembourg en 2014	135
2.13 Surface moyenne des logements dans les pays d'Europe, EUROSTAT, 2012	136
2.14 Superficies foncières nettes consommées par des bâtiments dans les zones d'habitations au Luxembourg entre 2004 et 2010 (source : d'après Feltgen et Pouget, Observatoire de l'Habitat, 2013)	141
2.15 Les différents zonages au sein des plans d'aménagements généraux au Luxembourg, d'après l'Observatoire de l'Habitat, 2011	142
2.16 Répartition des différents zonages dans les terrains disponibles au sein des plans d'aménagements généraux au Luxembourg, Observatoire de l'Habitat, 2010	143
2.17 Superficie foncière disponible théoriquement pour l'habitat au Luxembourg (source : Observatoire de l'Habitat, 2010)	144
2.18 Taux d'utilisation des transports en commun pour se rendre au travail au Luxembourg	148
2.19 Degré de saturation des réseaux routiers et autoroutiers au Luxembourg en 2009, d'après la Cellule Modèles de Transport	150
2.20 Campagne de communication autour du <i>M-Pass</i> , <i>Verkéiersverbond</i> , 2012	152
2.21 Campagne de communication en faveur des transports en commun le week-end, <i>Verkéiersverbond</i> , 2013	152
2.22 Communes prioritaires des différents documents de planification du Luxembourg	155
2.23 Le modèle de ville polycentrique dans un espace paysager au Luxembourg, ministère de l'Intérieur, 2008	158
2.24 Schéma de principe des mesures « d'arrondissement » de la forme urbaine au Luxembourg, d'après une figure du Plan Sectoriel Logement, ministère du Logement, 2014	160

Chapitre 3. Conception de scénarios de croissance résidentielle pour le Luxembourg : proposition méthodologique.....

3.1 Variables retenues dans la construction des scénarios de croissance résidentielle	177
3.2 Niveaux de contrainte et logique de construction des scénarios dans le projet VILMODes (Antoni et al 2014)	179
3.3 Démarche processuelle de modélisation des scénarios d'aménagement	180

3.4	Méthode de construction des besoins en logement	182
3.5	Quelques repères sur la densité résidentielle, avec des exemples de construction, AUCAME, 2010	183
3.6	Impact de la densité de construction sur la consommation foncière, exprimée en unité d'habitation (U.H.*), AUCAME, 2010	184
3.7	Configurations possibles selon la dimension fractale du tissu résidentiel simulé	185

Chapitre 4. Modélisation fractale et normative de la croissance résidentielle

4.1	Illustration de la règle fractale d'urbanisation, avec $N_{max} = 5$ et $r = 3$, exemples de possibilités, d'après Tannier <i>et al.</i> (2012d)	203
4.2	Méthode de calcul de la règle d'accessibilité aux espaces ouverts, d'après (Tannier <i>et al.</i> , 2012d)	204
4.3	Fonction d'évaluation de la règle d'accessibilité aux espaces ouverts	204
4.4	Fonction d'évaluation de la règle de proximité à la route, d'après Tannier <i>et al.</i> (2012d)	205
4.5	Principe d'identification des agrégats de commerces et services de fréquentation quotidienne	206
4.6	Fonction d'évaluation du nombre n de commerces et services de fréquentation quotidienne	207
4.7	Fonction d'évaluation de la distance d aux commerces et services de fréquentation quotidienne	208
4.8	Fonction d'évaluation de la diversité δ des commerces et services N1 à moins de 1 000 mètres	208
4.9	Principe d'identification des agrégats de commerces et services de fréquentation hebdomadaire	210
4.10	Fonction d'évaluation du nombre n de commerces et services de fréquentation hebdomadaire	211
4.11	Fonction d'évaluation de la distance d aux commerces et services de fréquentation hebdomadaire	212
4.12	Fonction d'évaluation de la diversité des commerces et services de fréquentation hebdomadaire	212
4.13	Fonction d'évaluation de la distance Λ aux commerces et services de fréquentation mensuelle ou plus rare	214
4.14	Données nécessaires à la création de scénarios de croissance résidentielle	220

4.15 Principe du géocodage d'adresses et obtention de données géographiques	223
4.16 Ensemble des aménités prises en compte dans le modèle	224
4.17 Méthodologie de construction des points d'accès aux aménités vertes et de loisirs	226
4.18 Superposition de trois résolutions différentes (20, 50 et 100 mètres), sur la localité de Frisange	230
4.19 Encart technique : Méthodologie de sélection du potentiel d'urbanisation en sortie de MUP-City	232

Chapitre 5. Évaluation de la pertinence des règles d'aménagement au regard des objectifs

visés	
5.1 Test de l'augmentation de la dimension fractale (extrait sur la municipalité d'Esch-sur-Alzette)	240
5.2 Distribution spatiale des valeurs d'évaluation, avec (à gauche) et sans (à droite) la règle de proximité aux espaces non-bâtis	244
5.3 Influence de la règle de proximité au réseau routier à 100 et 300 mètres	246
5.4 Influence locale de la règle de proximité au réseau routier	247
5.5 Distribution spatiale des valeurs d'évaluation avant (600m) et après (1 000m) modification de la règle d'accessibilité aux commerces et services de fréquentation quotidienne (zoom sur Luxembourg-Ville et ses environs)	248
5.6 Distribution spatiale des valeurs d'évaluation avant (à gauche) et après (à droite) modification de la règle d'accessibilité aux commerces et services de fréquentation hebdomadaire	250
5.7 Distribution spatiale des valeurs d'évaluation de la règle d'accessibilité aux commerces et services de fréquentation mensuelle ou plus rare	252
5.8 Distribution spatiale des valeurs d'évaluation, avant et après modification de la règle d'accessibilité aux transports en commun	253
5.9 Distribution spatiale des valeurs d'évaluation avant et après modification de la règle d'accessibilité aux aménités vertes de fréquentation quotidienne (zoom sur Luxembourg-ville et ses environs)	255
5.10 Distribution spatiale des valeurs d'évaluation avant et après modification de la règle d'accessibilité aux aménités vertes de fréquentation hebdomadaire	256
5.11 Distribution spatiale des valeurs d'évaluation de la règle d'accessibilité aux aménités vertes de fréquentation mensuelle ou plus rare	258

5.12 Comparaison des deux pondérations des règles en faveur de l'accessibilité aux commerces et services ou en faveur de la proximité aux transports en commun (zoom sur Luxembourg-Ville et ses environs)	266
5.13 Comparaison des deux séries de pondérations, en faveur de l'accessibilité aux commerces et services (à gauche, les points noirs désignent les commerces et services) ou en faveur de la proximité aux transports en commun (à droite, les petits points noirs désignent les arrêts de bus, les gros les gares ferroviaires), représentation par la méthode de densité des noyaux (extrait sur Luxembourg-ville)	267
Chapitre 6. Le Grand-Duché de Luxembourg à horizon 2030 : différents scénarios de croissance résidentielle	
6.1 Résultat du scénario IVL, représentation par la méthode des noyaux et zoom sur le potentiel d'urbanisation	275
6.2 Résultat du scénario FOD, représentation par la méthode des noyaux et zoom sur le potentiel d'urbanisation	279
6.3 Résultat du scénario de modification des projections démographiques (hypothèse haute), représentation par la méthode des noyaux et zoom sur le potentiel d'urbanisation	282
6.4 Résultat du scénario de modification des projections démographiques (hypothèse basse), représentation par la méthode des noyaux et zoom sur le potentiel d'urbanisation	283
6.5 Résultat du scénario d'augmentation de la densité, représentation par la méthode des noyaux et zoom sur le potentiel d'urbanisation	286
6.6 Résultat du scénario de modification de la répartition par commune de la croissance résidentielle (116 communes), représentation par la méthode des noyaux et zoom sur le potentiel d'urbanisation	290
6.7 Résultat du scénario de modification de la répartition par commune de la croissance résidentielle (23 communes), représentation par la méthode des noyaux et zoom sur le potentiel d'urbanisation	291
6.8 Résultat du scénario de la disponibilité foncière, représentation par la méthode des noyaux et zoom sur le potentiel d'urbanisation	294
6.9 Démarche de construction des scénarios de MOEBIUS, d'après Lord et al., 2011 . . .	295
6.10 Synthèse des résultats des scénarios de MOEBIUS, 2013	299
6.11 Carte de synthèse des résultats des scénarios de MOEBIUS, 2013	300

6.12 Répartition communale des cellules générées dans les scénarios au Luxembourg en 2030	304
---	-----

Chapitre 7. Comparaison des scénarios à l'aide d'indicateurs d'accessibilité spatiale

7.1 Distributions statistiques des valeurs d'évaluation de l'accessibilité au commerce ou service de fréquentation quotidienne, pour la situation initiale en 2010 et chaque scénario en 2030	316
7.2 Distributions statistiques des valeurs d'évaluation de l'accessibilité au commerce ou service de fréquentation hebdomadaire le plus proche, pour la situation initiale en 2010 et chaque scénario en 2030	317
7.3 Distributions statistiques des valeurs d'évaluation de l'accessibilité à l'aménité verte ou de loisirs de fréquentation quotidienne la plus proche, pour la situation initiale en 2010 et chaque scénario en 2030	319
7.4 Distributions statistiques des valeurs d'évaluation de l'accessibilité à l'aménité verte ou de loisirs de fréquentation hebdomadaire la plus proche, pour la situation initiale en 2010 et chaque scénario en 2030	320
7.5 Distributions statistiques des valeurs d'évaluation de l'accessibilité à l'aménité verte ou de loisirs de fréquentation mensuelle la plus proche, pour la situation initiale en 2010 et chaque scénario en 2030	321
7.6 Distributions statistiques des valeurs d'évaluation de l'accessibilité à la gare ferroviaire la plus proche, pour la situation initiale en 2010 et chaque scénario en 2030	322
7.7 Distributions statistiques des valeurs d'évaluation de l'accessibilité aux commerces et services de fréquentation quotidienne localisés à moins de 1 000m de chaque cellule potentiellement urbanisable, pour la situation initiale en 2010 et chaque scénario en 2030	324
7.8 Distributions statistiques des valeurs d'évaluation de l'accessibilité aux commerces et services de fréquentation hebdomadaire localisés à moins de 2 000m de chaque cellule potentiellement urbanisable, pour la situation initiale en 2010 et chaque scénario en 2030	325
7.9 Distributions statistiques des valeurs d'évaluation de l'accessibilité aux arrêts de bus localisés à moins de 1 000m de chaque cellule potentiellement urbanisable, pour la situation initiale en 2010 et chaque scénario en 2030	326

7.10 Distributions statistiques des valeurs d'évaluation de l'accessibilité aux aménités vertes ou de loisirs de fréquentation quotidienne localisées à moins de 1 000m de chaque cellule potentiellement urbanisable, pour la situation initiale en 2010 et chaque scénario en 2030	327
7.11 Distributions statistiques des valeurs d'évaluation de l'accessibilité aux aménités vertes ou de loisirs de fréquentation hebdomadaire localisées à moins de 2 000m de chaque cellule potentiellement urbanisable, pour la situation initiale en 2010 et chaque scénario en 2030	328
7.12 Distributions statistiques des valeurs d'évaluation de l'accessibilité à chaque type de commerces et services de fréquentation quotidienne, pour la situation initiale en 2010 et chaque scénario en 2030	330
7.13 Distributions statistiques des valeurs d'évaluation de l'accessibilité à chaque type de commerces et services de fréquentation hebdomadaire, pour la situation initiale en 2010 et chaque scénario en 2030	331
7.14 Distributions statistiques des valeurs d'évaluation de l'accessibilité à chaque type de commerces et services de fréquentation mensuelle ou plus rare, pour la situation initiale en 2010 et chaque scénario en 2030	332
7.15 Distributions statistiques des valeurs d'évaluation de l'accessibilité à chaque type d'aménités vertes ou de loisirs de fréquentation quotidienne, pour la situation initiale en 2010 et chaque scénario en 2030	333
7.16 Distributions statistiques des valeurs d'évaluation de l'accessibilité à chaque type d'aménités vertes ou de loisirs de fréquentation hebdomadaire, pour la situation initiale en 2010 et chaque scénario en 2030	334
7.17 Distributions statistiques des valeurs d'évaluation de l'accessibilité à la gare ferroviaire la plus proche, pour la situation initiale (2010), le scénario 23 communes et les 4 scénarios MOEBIUS (2030)	338
7.18 Distributions statistiques des valeurs d'évaluation de l'accessibilité aux arrêts de bus, à moins de 1 000 mètres, pour la situation initiale (2010), le scénario 23 communes et les 4 scénarios MOEBIUS (2030)	339
7.19 Distributions statistiques des valeurs d'évaluation de l'accessibilité à chaque type de commerces et services de fréquentation hebdomadaire, pour la situation initiale (2010), le scénario 23 communes et les 4 scénarios MOEBIUS (2030)	340
7.20 Distributions statistiques des valeurs d'évaluation de l'accessibilité à chaque type d'aménités vertes ou de loisirs de fréquentation hebdomadaire, pour la situation initiale (2010), le scénario 23 communes et les 4 scénarios MOEBIUS (2030)	342

Chapitre 8. Comparaison des scénarios à l'aide d'indicateurs de mobilité quotidienne

8.1 Evolution des possibilités d'enchères en fonction des externalités pondérées par les préférences individuelles, d'après Caruso et C. Médard de Chardon, Conférence finale de MOEBIUS, 2013	351
8.2 Principe d'allocation entre les enchères et le choix des ménages, d'après G. Caruso et C. Médard de Chardon, Conférence finale de MOEBIUS, 2013	351
8.3 Extrait de la population synthétique, attributs des individus et du ménage auquel il appartient, d'après E. Cornélis, Conférence finale de MOEBIUS, 2013	354
8.4 Attributs des cellules urbanisables, d'après G. Caruso et C. Médard de Chardon, Conférence finale de MOEBIUS, 2013	356
8.5 Encart technique : principes techniques du modèle d'allocation résidentielle	357
8.6 Résultats de l'allocation résidentielle à l'échelle communale pour le scénario IVL	360
8.7 Résultats de l'allocation résidentielle à l'échelle communale pour le scénario FOD	362
8.8 Résultats de l'allocation résidentielle à l'échelle communale pour le scénario des 23 communes	364
8.9 Fonctionnement du modèle de simulation des mobilités quotidiennes de MobiSim, d'après Antoni (2010)	365
8.10 Boîtes de dialogue pour la construction des programmes d'activité, Antoni (2012)	370
8.11 Répartition horaire des motifs de départ des déplacements au Luxembourg en 2010 (simulation MobiSim)	371
8.12 Ensemble des flux issus de la distribution des déplacements sur une journée au Luxembourg en 2010 (simulation MobiSim)	373
8.13 Exemple de fiche horaire, la ligne 60 du train entre Luxembourg-Ville et Esch-sur-Alzette (extrait)	376
8.14 Comparaison du nombre de déplacements quotidiens par agent et par modes entre la situation de référence en 2010 et les scénarios en 2030	381
8.15 Comparaison des parts modales entre la situation de référence en 2010 et les scénarios en 2030	382
8.16 Evolution des parts modales (marche à pied, transports en commun et voitures) pour chaque scénario (IVL, en haut ; FOD, au centre ; 23 communes en bas)	385
8.17 Comparaison des distances moyennes parcourues par modes et par agent, entre la situation de référence en 2010 et les scénarios en 2030 (en kilomètres)	389

8.18 Comparaison des budgets-temps moyens par déplacement et par mode entre la situation de référence en 2010 et les scénarios en 2030 (en minutes)	390
8.19 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) .	391
8.20 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) .	392
8.21 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)	395
8.22 Méthode de détermination des masses affectées aux commerces et services dans le cadre du modèle d'affectation de MobiSim	413
8.23 Méthode de détermination des masses affectées aux aménités vertes et de loisirs dans le cadre du modèle d'affectation de MobiSim	414
8.24 Résultats de l'arbre de décisions sur les données de l'enquête relative aux pratiques culturelles, pour le motif loisirs, au Luxembourg en 2009	416
8.25 Résultats de l'arbre de décisions sur les données de l'enquête relative aux pratiques culturelles, pour le motif réseau social, au Luxembourg en 2009	416
8.26 Extrait de Carnets d'opinions n°3 Baukultur, article de Robert Philippart, 2009	418
8.27 Paperjam, Supplément - Guide de l'immobilier résidentiel, août 2015	419
8.28 Républicain Lorrain, Édition de Thionville, Jeudi 7 novembre 2013	420
8.29 Forum, Mercredi 9 mai 2012	423
8.30 L'essentiel (en ligne), Lundi 18 juin 2012	424
8.31 Le Quotidien, Mardi 19 juin 2012	425

Liste des tableaux

Chapitre 1. Objectifs, normes et règles dans l'aménagement urbain	
1.1 Objectif, normes et règles de la cité antique	61
1.2 Objectif, normes et règles de l'utopie industrielle	66
1.3 Objectif, normes et règles du mouvement hygiéniste	68
1.4 Objectif, normes et règles de la cité-jardin	75
1.5 Objectif, normes et règles de l'idéal libertaire	78
1.6 Objectif, normes et règles de la ville du Corbusier	80
1.7 Objectif, normes et règles de la Nouvelle Economie Urbaine	84
1.8 Objectif, normes et règles du <i>Transit-Oriented Development</i>	90
1.9 Objectif, normes et règles de la <i>Smart-Growth</i> et du Nouvelle Urbanisme	99
1.10 Objectif, normes et règles de la ville fractale	109
Chapitre 2. Le Grand-Duché de Luxembourg et les particularités de son développement résidentiel	
2.1 Typologie des logements au Luxembourg, d'après le recensement du STATEC, 2011 .	137
2.2 Part des régions / cantons dans le total des logements achevés au Luxembourg entre 1992 et 2009, STATEC, 2011	138
2.3 Evolution de l'occupation du sol au Luxembourg entre 1972 et 2010, d'après l'Administration du Cadastre et de la Topographie et le STATEC, 2015	139
2.4 Objectifs et normes au Luxembourg	166

Chapitre 4. Modélisation fractale et normative de la croissance résidentielle

4.1 Synthèse des grandes périodes de l'aménagement dans la deuxième moitié du XX ^{ème} siècle, (d'après Klosterman, 2001 ; Malczewski, 2004 et Foth, 2009)	191
4.2 Le caractère multi-échelles des règles de MUP-City	201
4.3 Valeurs d'importance accordées à une règle par rapport à une autre	218
4.4 Comparaison par paires de l'importance des règles. Exemple pour trois règles F_1 , L_2 et TC	218

Chapitre 5. Évaluation de la pertinence des règles d'aménagement au regard des objectifs

visés

5.1 Evaluation de l'accessibilité à chaque aménité pour les cellules bâties à l'état initial de 2010	237
5.2 Cellules nouvellement construites pour une simulation entre 2010 et 2030	239
5.3 Influence de la désactivation successive des règles sur l'intérêt des cellules potentiellement urbanisables d'après MUP-City	241
5.4 Extrait du tableau 5.3	243
5.5 Extrait du tableau 5.3 et modification du seuil de la règle de proximité au réseau routier	245
5.6 Influence de la règle d'accessibilité aux commerces et services de fréquentation quotidienne sur l'évaluation des cellules potentiellement urbanisables	248
5.7 Influence de la règle d'accessibilité aux commerces et services de fréquentation hebdomadaire sur l'évaluation des cellules potentiellement urbanisables	249
5.8 Influence de la règle d'accessibilité aux commerces et services de fréquentation mensuelle ou plus rare sur l'évaluation des cellules potentiellement urbanisables	251
5.9 Influence de la règle d'accessibilité aux transports en commun sur l'évaluation des cellules potentiellement urbanisables	253
5.10 Influence de la règle d'accessibilité aux aménités vertes et de loisirs de fréquentation quotidienne sur l'évaluation des cellules potentiellement urbanisables	254

5.11 Influence de la règle d'accessibilité aux aménités vertes et de loisirs de fréquentation hebdomadaire sur l'évaluation des cellules potentiellement urbanisables	256
5.12 Influence de la règle d'accessibilité aux aménités vertes et de loisirs de fréquentation mensuelle ou plus rare sur l'évaluation des cellules potentiellement urbanisables	257
5.13 Synthèse de l'évaluation de la situation initiale avec la modification des seuils des règles d'accessibilité	259
5.14 Seuils stricts et moins stricts des règles d'accessibilité qui ont fait l'objet d'une modification pour la simulation de scénarios prospectifs au Luxembourg	261
5.15 Valeurs utilisées dans la comparaison par paires des différentes règles de MUP-City, en faveur de l'accessibilité aux commerces et services	263
5.16 Valeurs utilisées dans la comparaison par paires des différentes règles de MUP-City, en faveur de la proximité aux transports en commun	264
5.17 Synthèse de l'analyse des deux séries de pondérations de la comparaison par paires	265

Chapitre 6. Le Grand-Duché de Luxembourg à horizon 2030 : différents scénarios de croissance résidentielle

6.1 Nombre de cellules potentiellement urbanisables dans le cadre du scénario IVL . . .	274
6.2 Récapitulatif des caractéristiques du scénario de référence, dit IVL	274
6.3 Nombre de cellules potentiellement urbanisables dans le cadre du scénario FOD . .	276
6.4 Récapitulatif des caractéristiques du scénario Fractal-Oriented Development (FOD)	277
6.5 Récapitulatif des caractéristiques des scénarios de modification des projections démographiques	280
6.6 Nombre de cellules potentiellement urbanisables dans le cadre des scénarios de variations des projections démographiques	281
6.7 Récapitulatif des caractéristiques du scénario d'augmentation de la densité	284
6.8 Nombre de cellules potentiellement urbanisables dans le cadre du scénario d'augmentation de la densité	285
6.9 Récapitulatif des caractéristiques des scénarios de modification de la répartition par commune de la croissance résidentielle	288
6.10 Nombre de cellules potentiellement urbanisables dans le cadre du scénario de modification de la répartition par commune de la croissance résidentielle (116 communes)	288

6.11	Nombre de cellules potentiellement urbanisables dans le cadre du scénario de modification de la répartition par commune de la croissance résidentielle (23 communes)	288
6.12	Récapitulatif des caractéristiques des scénarios dit de la disponibilité foncière	292
6.13	Nombre de cellules potentiellement urbanisables dans le cadre du scénario de la disponibilité foncière	293
6.14	Principales caractéristiques des scénarios simulés	303
Chapitre 7. Comparaison des scénarios à l'aide d'indicateurs d'accessibilité spatiale		
7.1	Classement des scénarios en fonction des résultats obtenus pour chaque indicateur de distance minimale entre chaque cellule potentiellement urbanisable et l'aménité la plus proche	323
7.2	Classement des scénarios en fonction des résultats obtenus pour chaque indicateur du nombre moyen d'aménités de chaque type dans le voisinage de chaque cellule potentiellement urbanisable	329
7.3	Classement des scénarios en fonction des résultats obtenus pour chaque indicateur de la distance moyenne minimale pour accéder à chaque type d'aménité d'une même fréquence de recours depuis les cellules potentiellement urbanisables	336
7.4	Classement des scénarios en fonction des résultats obtenus pour chaque type d'indicateur d'accessibilité spatiale : distance minimale au plus proche, nombre d'aménités dans un voisinage, distance moyenne minimale pour accéder à chaque type d'aménités	337
Chapitre 8. Comparaison des scénarios à l'aide d'indicateurs de mobilité quotidienne		
8.1	Les variables susceptibles d'influencer le choix modal d'un agent	378
8.2	Calibrage du modèle de simulation MobiSim en 2010 à l'aide de données observées	379
8.3	Comparaison des parts modales (marche à pied, transports en commun et voiture) entre la situation initiale en 2010 et les scénarios IVL, FOD et des 23 communes en 2030, en fonction de plusieurs motifs de déplacements	387

Bibliographie

- AERTS, J. C. J. H. et HEUVELINK, G. B. M. (2002). Using simulated annealing for resource allocation. *International Journal of Geographical Information Science*, 16(6):571–587.
- AL-HINDI, K. F. et TILL, K. E. (2013). (Re)Placing the New Urbanism Debates : Toward an Interdisciplinary Research Agenda. *Urban Geography*, 22(3):189–201.
- ALLAIN, R. (2004). *Morphologie urbaine*. Colin, Paris.
- ALLMENDINGER, P. et TEWDWR-JONES, M. (2002). *Planning Futures : New Directions for Planning Theory*. Psychology Press, New-York.
- AMAR, G. (2010). *Homo mobilis. Le nouvel âge de la mobilité, éloge de la reliance*. Editions FYP, Limoges.
- AMER, M., DAIM, T. U. et JETTER, A. (2013). A review of scenario planning. *Futures*, 46:23–40.
- AMERICAN PLANNING ASSOCIATION (2012). *Policy Guide on Smart Growth*.
- ANAS, A., ARNOTT, R., SMALL, K. a., LITERATURE, E. et SEP, N. (2007). Urban Spatial Structure.
- ANTONI, J.-P. (2003). *Modélisation de l'étalement urbain. Aspects conceptuels et gestionnaires*. Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur de Strasbourg.
- ANTONI, J.-P. (2006). Calibrer un modèle d'évolution de l'occupation du sol urbain. L'exemple de Belfort. *Cybergeog : European Journal of Geography*, 347:19.
- ANTONI, J.-P. (2010). *Modéliser la ville. Forme urbaine et politiques de transport*. Economica. Collection Méthodes et approches, Paris.
- ANTONI, J.-P. (2014). *Modélisation et anticipations urbaines. Elements théoriques pour une approche géo-ergonomique*. Thèse de doctorat, Université de Franche-Comté.
- ANTONY, M. (1995). Traces utopiques et libertaires dans le temps et l'espace.
- APPARICIO, P. et SÉGUIN, A.-m. (2006). Measuring the Accessibility of Services and Facilities for Residents of Public Housing in Montréal. *Urban Studies*.

- ARENTZE, T. a., BORGERS, A. W. J. et TIMMERMANS, H. J. P. (1994). Geographical Information Systems and the Measurement of Accessibility in the Context of Multipurpose Travel : A New Approach. *Geographic Systems*, 1:87–102.
- ASCHER, F. (1995). *Métapolis : ou l'avenir des villes*. Editions Odile Jacob.
- ATKINSON, A. (1992). The urban bioregion as 'sustainable development' paradigm. *Third World Planning Review*, 14(4):327–354.
- BADARIOTTI, D. (2005a). Auto-similarité et auto-référence en urbanisme. Quelques exemples... *In 12èmes journées de Rochebrune*, pages 1–9, Paris. Ecole nationale supérieure des télécommunications.
- BADARIOTTI, D. (2005b). Des fractales pour l'urbanisme? *Cahiers de géographie du Québec*, 49(137): 133.
- BAILLY, A. S. (1973). Les théories de l'organisation de l'espace urbain. *L'espace géographique*, 2:81–93.
- BAKER, E. (2002). *Public housing, tenant relocation, residential mobility, satisfaction and the development of a tenant's spatial decision support system*. Thèse de doctorat, Department of Geographical and Environmental Studies, University of Adelaide, Australie.
- BARBIERI, F. P. M. (2011). L'évolution démographique récente en France : les adultes vivent moins souvent en couple. *Population*, Vol. 65(3):421–474.
- BARLES, S. (1999). *La ville délétère : médecins et ingénieurs dans l'espace urbain, XVIIIe-XIXe siècle*. Editions Champ Vallon, Seyssel.
- BARNETT, J. (1982). *An Introduction to Urban Design*. HarperCollins Publishers, New-York.
- BATTY, M. (1994). A Chronicle of Scientific Planning : The Anglo-American Modeling Experience. *Journal of the American Planning Association*, 60(1):7–16.
- BATTY, M. et KIM, K. S. (1992). Form Follows Function : Reformulating Urban Population Density Functions. *Urban Studies*, 29(7):1043–1070.
- BATTY, M. et LONGLEY, P. (1994). *Fractal Cities. A Geometry of Form and Function*. Academic Press, Londres.
- BAUMONT, C. et HURIOT, J.-M. (1996). *De Von Thünen à Fujita : continuité ou rupture?* Document de travail. Laboratoire d'analyse et de techniques économiques (U.R.A. 342 CNRS), Dijon.

- BAUMONT, C. et HURIOT, J.-M. M. (1997). La ville, la raison et le rêve : Entre théorie et Utopie. *Espace géographique*, 26(2):99–117.
- BECKER, H. S. (1983). Scenarios. *Technological Forecasting and Social Change*, 23(2):95–120.
- BENENSON, I. et TORRENS, P. (2004). *Geosimulation : Automata-based modelling of urban phenomena*. Wiley.
- BENGSTON, D. N., FLETCHER, J. O. et NELSON, K. C. (2004). Public policies for managing urban growth and protecting open space : policy instruments and lessons learned in the United States. *Landscape and Urban Planning*, 69(2-3):271–286.
- BENOIT, J.-M., BENOIT, P. et PUCCI, D. (2002). *La France à 20 minutes*. Belin, Paris.
- BERDOULAY, V. et SOUBEYRAN, O. (1994). Retour de la prospective et crise de la modernité. *Espaces et sociétés*.
- BERGER, G., FEINDT, P. H., HOLDEN, E. et RUBIK, F. (2014). Sustainable Mobility - Challenges for a Complex Transition. *Journal of Environmental Policy and Planning*, 16(3):303–320.
- BLANQUART, P. (1997). *Une histoire de la ville : pour repenser la société*. Editions la Découverte, Paris.
- BOHL, C. C. (2000). New urbanism and the city : Potential applications and implications for distressed inner-city neighborhoods. *Housing Policy Debate*, 11(4):761–801.
- BONNET, X., KATOSKY, A. et MARICAL, F. (2013). *Etudes & documents. Préférences des ménages en matière de logement : résultats d'une enquête par expérience de choix*.
- BOONE, C. G., BUCKLEY, G. L., GROVE, J. M. et SISTER, C. (2009). Parks and People : An Environmental Justice Inquiry in Baltimore , Maryland. *Annals of the Association of American Geographers*, 99(July 2008):767–787.
- BORIE, A., MICHELONI, P. et PINON, P. (2006). *Forme et déformation des objets architecturaux et urbains*. Editions Parenthèses.
- BORJA, J. et CASTELLS, M. (1997). *Local and Global : Management of Cities in the Information Age*. United Nations Centre for Human Settlements (Habitat), Earthscan., London.
- BOULANGER, P.-M. (2004). Les indicateurs de développement durable : un défi scientifique , un enjeu démocratique. *In Les séminaires de l'IDDRI*, pages 1–24. Institut pour un développement durable, Belgique, Chaire Développement durable de l'Ecole polytechnique-EDF
- BOURDIN, A. (2010). *L'urbanisme d'après crise*. Les Éditions de l'Aube, La Tour d'Aigues.

- BOURGEOIS, M. (2011). *Scénarios fractals d'urbanisation résidentielle : Favoriser l'accessibilité aux aménités vertes lors de la conception d'un document d'urbanisme*. Mémoire de master 2, Université de Franche-Comté.
- BOUTAUD, A. (2005). *Le développement durable : penser le changement ou changer le pansement ?* Thèse de doctorat, Ecole nationale supérieure des Mines et Université Jean Monnet, St-Etienne.
- BOUTAUD, A. (2010). Les indicateurs de développement durable à l'échelle des territoires. In ZUIN-DEAU, B., éditeur : *Développement durable et territoire*, chapitre 7, pages 83–94. Presses universitaires du Septentrion, Villeneuve D'Asq.
- BREHENY, M. (1997). Urban compaction : feasible and acceptable? *Cities*, 14(4):209–217.
- BROTCHIE, J. F. (1984). Technological change and urban form. *Environment and Planning A*, 16(5): 583–596.
- BRUECKNER, J. K., THISSE, J. F. et ZENOU, Y. (1999). Why is central Paris rich and downtown Detroit poor? An amenity-based theory. *European Economic Review*, 43:91–107.
- BRUNDTLAND, G. H. (1987). Notre Avenir à Tous, rapport de la commission mondiale sur l'Environnement et le Développement. Rapport technique, Les Editions du Fleuve, Paris.
- BURTON, E. (2000). The Compact City : Just or Just Compact? A Preliminary Analysis. *Urban Studies*, 37(11):1969–2006.
- CAILLY, L. (2008). Existe-t-il un mode d'habiter spécifiquement périurbain? L'exemple de l'aire urbaine d'une ville française (Tours).
- CALTHORPE, P. (1993). *The Next American Metropolis : Ecology, Community, and the American Dream*. Princeton Architectural Press, New-York.
- CALTHORPE, P. et MACK, M. (1989). *Pedestrian Pockets : new strategies for suburban growth*. Princeton Architectural Press, New-York.
- CARPENTIER, S. (2007). Une analyse exploratoire des liens entre mobilité quotidienne et ancrage résidentiel. Vers une approche écologique de la mobilité? *Articulo - revue de sciences humaines*, 3:18.
- CARUSO, G. (2005). SOLUTIONS Micro-scale modelling : Method and initial results.
- CARUSO, G. et MEDARD 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*, pages 2–3, Porto.

- CARUSO, G., PEETERS, D., CAVAILHÈS, J. et ROUNSEVELL, M. (2007). Spatial configurations in a peri-urban city. A cellular automata-based microeconomic model. *Regional Science and Urban Economics*, 37(5):542–567.
- CASSEDY, J. H. (1962). Hygeia : a mid-Victorian dream of a city of health. *Journal of the history of medicine and allied sciences*, 17:217–28.
- CASTEL, J.-C. (2006). Les coûts de la ville dense ou étalée. *Etudes foncières*, 119:18–21.
- CASTÉLAN, B. et RICHROCH, L. (2008). Les logements en 2006. *INSEE Premières*, 1202:4 pages.
- CAVAILHÈS, J., BROSSARD, T., HILAL, M., JOLY, D., TOURNEUX, F., TRITZ, C. et WAVRESKY, P. (2007). Économie rurale. *Economie rurale*, 297-298:71–84.
- CAVAILHÈS, J., FRANKHAUSER, P., PEETERS, D. et THOMAS, I. (2002). Aménités urbaines et périurbaines dans une aire métropolitaine de forme fractale. *Revue d'Economie Régionale et Urbaine*.
- CAVAILHÈS, J., FRANKHAUSER, P., PEETERS, D. et THOMAS, I. (2004). Where Alonso meets Sierpinski : an urban economic model of a fractal metropolitan area. *Environment and Planning A*, 35:1471–1498.
- CCFA (2013). La croissance du parc automobile français en 2012. Rapport technique, Comité des Constructeurs Français d'Automobile, Paris.
- CERVERO, R. (2002). Built environments and mode choice : toward a normative framework. *Transportation Research Part D : Transport and Environment*, 7(4):265–284.
- CHAKHAR, S. (2006). *Cartographie décisionnelle multicritère : Formalisation et implémentation informatique*. Thèse de doctorat.
- CHARIF, O., OMRANI, H., KLEIN, O., SCHNEIDER, M. et TRIGANO, P. (2010). A method and a tool for geocoding and record linkage. In *2010 Second IITA International Conference on Geoscience and Remote Sensing*, volume 1, pages 356–359. IEEE.
- CHARMES, E. (2011). *La ville émietée. Essai sur la clubbisation de la vie urbaine*. Presses Universitaires de France, Paris.
- CHILLA, T. et SCHULTZ, C. (2012). L'aménagement du territoire au Luxembourg : défis, objectifs et instruments d'une politique émergente. *Revue Géographique de l'Est*, 52(3-4):2–18.
- CHOAY (2005). Urbanisme. In CHOAY, F. et MERLIN, P., éditeurs : *Dictionnaire de l'urbanisme et de l'aménagement*, page 1008 pages. Collection "Quadrige dicos poche". Presses Universitaires de France.

- CHOAY, F. (1965). *L'urbanisme, utopies et réalités : une anthologie*. Editions du Seuil, Paris.
- CHOUMERT, J. (2009). *Analyse économique d'un bien public local : les espaces verts*. Thèse de doctorat, Université d'Angers.
- CHRISTALLER, W. (1933). *Die Zentralen Orte in Süddeutschland*. Prentice-Hall. Traduction faite par C.W. Baskin, 1966, en : *Central places in southern Germany*, Englewood Cliffs.
- CLAIR, I. (1999). Normes. *Sociologie*.
- CODD, E. F. (1968). *Cellular Automata*. ACM Monograph Series. Academic Press, New-York.
- COLEMAN, J. S. (1988). Social Capital in the Creation of Human Capital. *American Journal of Sociology*, 94(s1):S95.
- COLLINS, M. G., STEINER, F. R. et RUSHMAN, M. J. (2001). Land-use suitability analysis in the United States : historical development and promising technological achievements. *Environmental management*, 28(5):611–21.
- COMMUNAUTÉ MÉTROPOLITAINE DE MONTRÉAL (CMM) (2011). *Un grand Montréal attractif, compétitif et durable : Plan métropolitain d'aménagement et de développement*. Communauté métropolitaine de Montréal.
- CONWAY, J. (1970). The game of life. *Scientific American*, 223(4):4 pages.
- COUCH, C., SYKES, O. et BÖRSTINGHAUS, W. (2011). Thirty years of urban regeneration in Britain, Germany and France : The importance of context and path dependency. *Progress in Planning*, 75:1–52.
- COUCLELIS, H. (1985). Cellular World : a framework for modelling micro-macro dynamics. *Environment and Planning A*, 17:585–596.
- COUCLELIS, H. (1988). Of mice and men : what rodent populations can teach us about complex spatial dynamics. *Environment and Planning A*, 20:99–109.
- COWEN, D. J. (1988). GIS versus CAD versus DBMS : What Are the Differences? *Engineering*, 54(11): 1551–1555.
- CRANE, R. et CREPEAU, R. (1998). Does neighborhood design influence travel? : A behavioral analysis of travel diary and GIS data. *Transportation Research Part D : Transport and Environment*, 3(4): 225–238.

- CROZET, Y. et JOLY, I. (2003). *De l'hypothèse de la constance du budget temps de transport à sa remise en cause : Une double interpellation des politiques de transport urbain*. LET-ENTPE. Rapport de recherche pour le Plan Urbanisme Construction Architecture, le Pôle Sociétés Urbaines, Habitat et Territoires et Michel Bonnet, Lyon.
- CROZET, Y., MERCIER, A. et OVTRACHT, N. (2012). Accessibility : a key indicator to assess the past and future of urban mobility. *In Accessibility analysis and Transport Planning Challenges for Europe and North America*, chapitre Chapter 15, pages 263–279. Edward Elgar Publishing Ltd, Cheltenham.
- DA CUNHA, A., KNOEPFEL, P., LERESCHE, J.-P. et NAHRATH, S. (2005). *Enjeux du développement urbain durable, transformations urbaines, gestion des ressources et gouvernance*. Editions des presses polytechniques et universitaires Romandes, Lausanne.
- DAVID, O. (2013). Les équations temporelles et spatiales des familles périurbaines. *Espaces-Temps.net*.
- DAVOUDI, S. (2003). European briefing : Polycentricity in European spatial planning : from an analytical tool to a normative agenda. *European Planning Studies*, 11(8):979–999.
- DAY, K. (2003). New Urbanism and the Challenges of Designing for Diversity. *Journal of Planning Education and Research*, 23(1):83–95.
- de COULANGE, F. (1864). *La cité Antique*. Etude sur le culte, les droits, les institutions de la Grèce et de Rome.
- DE KEERSMAECKER, M.-L., FRANKHAUSER, P. et THOMAS, I. (2004). Dimensions fractales et réalités périurbaines. L'exemple du sud de Bruxelles. *L'espace géographique*.
- DE ROSNAY, J. (1970). *Le Macroscopie*. Seuil, collection Civilisations Paris, Paris.
- DELAHAYE, D., GUERMOND, Y. et LANGLOIS, P. (2002). Spatial interaction in the run-off process. *Cybergeo*.
- DENSHAM, P. (1991). Spatial Decision Support Systems. *Geographical information systems : Principles and applications*.
- DERYCKE, P., HURIOT, J.-m. et PUMA (1996). *Penser la ville : Theories et modèles*. Anthropos (collection "Villes").
- DESMARAIS, G. (1992). Des prémisses de la théorie de la forme urbaine au parcours morphogénétique de l'établissement humain. *Cahiers de géographie du Québec*, 36(98):251–273.

- DESMARAIS, G. (2005). La structuration morphologique de la Rome antique, du centre organisateur à la configuration de seuil. *Espaces et sociétés*, 122(4):49–65.
- D'ETAT, M. (2011). *Rapport d'activité 2010*. Ministère d'Etat, Luxembourg.
- DOWNES, A. (2005). Smart growth. Why we discuss it more than we do it. *Journal of the American Planning Association*.
- DUANY, A., SORLIEN, S. et WRIGHT, W. (2012). *SmartCode. Version 9.2*. The Town Paper Publisher.
- DUBOIS, N. (2002). *Autour de la norme sociale*, volume 2. En ligne. <http://lo-del.irevues.inist.fr/cahierspsychologiepolitique/index.php?id=1640>.
- DUBOS-PAILLARD, E., GUERMOND, Y. et LANGLOIS, P. (2003). Analyse de l'évolution urbaine par automate cellulaire. Le modèle SpaCelle. *L'Espace géographique*, tome 32(4):357–378.
- DUBOST, F. (2014). Le modèle des cités-jardins : la modernité à l'épreuve du temps. *Ethnologie française*, 26(1):92–99.
- DUPUY, G. (1999). From the “magic circle” to “automobile dependence” : measurements and political implications. *Transport Policy*, 6(1):1–17.
- EASTMAN, J. R., KYEM, P. a. K., TOLEDANO, J. et JIN, W. (1993). *Explorations in Geographic Information Systems Technology. Volume 4. GIS and Decision Making*. UNITAR, Genève.
- ELLERKAMP, P. (2001). *Étude de l'extension urbaine autour d'Avignon et de Montpellier par la simulation de dynamiques spatiales à l'aide de modèles cellulaires d'interaction locale*. Thèse de doctorat.
- ESTGEN, P. (2011). Quelques réflexions sur l'impôt foncier (Grondsteier).
- EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY (2014). *Air quality in Europe*. Report.
- EWING, R. H. (2008). Characteristics, causes, and effects of sprawl : A literature review. *In Urban Ecology : An International Perspective on the Interaction Between Humans and Nature*, volume 21, pages 519–535.
- FERTNER, C., JØ RGENSEN, G. et NIELSEN, T. S. (2011). Land Use Scenarios for Greater Copenhagen : Modelling the Impact of the Fingerplan.
- FILION, P. (2010). Reorienting Urban Development? Structural Obstruction to New Urban Forms. *International Journal of Urban and Regional Research*, 34(1):1–19.

- FISCHLER, R. (2002). *Forme urbaine, Développement métropolitain et mobilité des personnes*. Etude pour le compte de la CAMRRS.
- FOLTÈTE, J. C., GIRARDET, X. et CLAUZEL, C. (2014). A methodological framework for the use of landscape graphs in land-use planning. *Landscape and Urban Planning*, 124:140–150.
- FORESTER, J. (1999). The deliberative practitioner : encouraging participatory planning processes. *Political Studies*, 49:305.
- FOTH, M., BAJRACHARYA, B., BROWN, R. et HEARN, G. (2009). The Second Life of urban planning? Using NeoGeography tools for community engagement. *Journal of Location Based Services*.
- FRANKHAUSER, P. (1994). *La fractalité des structures urbaines*. Anthropos (collection "Villes"), Paris.
- FRANKHAUSER, P. (2000). La fragmentation des espaces urbains et périurbains : une approche fractale. In DERYCKE, P. H., éditeur : *Structure des villes, entreprises et marchés urbains*, pages 25–50. Harmattan, Paris.
- FRANKHAUSER, P. (2003). *Morphologie des " Villes Émergentes " en Europe à travers les analyses fractales*. Rapport de recherches. Université de Franche-Comté.
- FRANKHAUSER, P. (2004). Comparing the morphology of urban patterns in Europe—a fractal approach. In BORSODORF, A. et ZMEBRI, P., éditeurs : *European Cities, Insights on outskirts*, volume 2, pages 79–105. Bruxelles.
- FRANKHAUSER, P. (2005). La morphologie des tissus urbains et périurbains à travers une lecture fractale. *Revue Géographique de l'Est*, 45(3-4):145–160.
- FRANKHAUSER, P., HOUOT, H., TANNIER, C. et VUIDEL, G. (2007). *Vers des déplacements péri-urbains plus durables : propositions de modèles fractals opérationnels d'urbanisation*.
- FRANKHAUSER, P., TANNIER, C., HOUOT, H. et VUIDEL, G. (2010). Développement urbain fractal sous contraintes d'accessibilités Modèles et outils d'aide à la décision pour l'aménagement urbain. Rapport technique, Laboratoire ThéMA, Besançon.
- FRIEDMANN, J. (1993). Toward a Non-Euclidian Mode of Planning. *Journal of the American Planning Association*, 59(4):482–485.
- FRITSCH, P. (1992). *L'activité sociale normative. Esquisses sociologiques sur la production sociale des normes*. Editions CNRS, Paris.
- FUJITA, M. (1989). *Urban Economic Theory : Land Use and City Size*. Cambridge University Press, Cambridge.

- GAFFIKIN, F. et STERRETT, K. (2006). New Visions for Old Cities : The Role of Visioning in Planning. *Planning Theory & Practice*, 7(2):159–178.
- GALLOWAY, T. D. et MAHAYNI, R. G. (1977). Planning Theory in Retrospect : The Process of Paradigm Change. *Journal of the American Institute of Planners*, 43(1):62–71.
- GASNIER, A. (2007). Les temps de mobilité des consommateurs au cœur des nouvelles logiques d'implantation de l'offre commerciale. *Espace Populations Sociétés*, 3:243–254.
- GENESTIER, P. (1988). Forme urbaine!... Formes urbaines? *Villes en parallèle*, 12-13:8–18.
- GENRE-GRANDPIERRE, C. (1999). La desserte spatiale des réseaux de transport routier : une approche fractale. *Flux*, 15(38):56–68.
- GERBER, P. (2000). *Gentrification et confort postmoderne. Éléments émergents de nouvelles centralités. L'exemple de Strasbourg*. Thèse de Doctorat, Université Louis Pasteur, Strasbourg.
- GERBER, P. et CARPENTIER, S. (2013). *Mobilités et modes de vie. Vers une recomposition de l'habiter*. Presses Universitaires de Rennes.
- GERBER, P., CARPENTIER, S., DUPUY, G., EGGERICKX, T., ENAUX, C., PETIT, S., PIGERON-PIROTH, I. et SANDERSON, J. (2008). *MOBILLUX. Quelles mobilités au Luxembourg et dans son espace transfrontalier? Comprendre les interactions entre mobilités quotidienne et résidentielle Responsable*. Projet FNR/VIVRE/06/35/03. Programme « Vivre au Luxembourg ».
- GEURS, K., ZONDAG, B., de JONG, G. et de BOK, M. (2010). Accessibility appraisal of land-use/transport policy strategies : More than just adding up travel-time savings. *Transportation Research Part D : Transport and Environment*, 15(7):382–393.
- GEURS, K. T. et van WEE, B. (2004). Accessibility evaluation of land-use and transport strategies : review and research directions. *Journal of Transport Geography*, 12(2):127–140.
- GHORRA-GOBIN, C. (2006). *La théorie du New Urbanism. Perspectives et enjeux*. Ministère des transports, de l'équipement, du tourisme et de la mer, Direction générale de l'urbanisme, de l'habitat et de la construction, Centre de documentation de l'urbanisme.
- GILES-CORTI, B., BROOMHALL, M. H., KNUIMAN, M., COLLINS, C., DOUGLAS, K., NG, K., LANGE, A. et DONOVAN, R. J. (2005). Increasing walking : how important is distance to, attractiveness, and size of public open space? *American Journal of Preventive Medicine*, 28(2 Suppl 2):169–176.
- GILLI, F. (2001). Les modèles urbains en économie et géographie. approche comparée. *L'espace géographique*.

- GODARD, O. (1996). Le développement durable et le devenir des villes : bonnes intentions et fausses bonnes idées. *Futuribles*, (209):29–35.
- GODET, M. (1986). Introduction to la prospective : seven key ideas and one scenario method. *Futures*, 18(2):134–157.
- GORDON, P. et WONG, H. L. (1985). The costs of urban sprawl : some new evidence. *Environment and Planning A*, 17(5):661–666.
- GOSSÉ, M. (1998). La crise mondiale de l'urbanisme - quels modèles urbains? *Developpments et coopérations*, 86:85–91.
- GRAFMEYER, Y. et JOSEPH, I. (1979). *L'école de Chicago - naissance de l'écologie urbaine*. Aubier. Les éditions du Champ Urbain, Paris.
- GRANT, J. (2009). Theory and Practice in Planning the Suburbs : Challenges to Implementing New Urbanism, Smart Growth, and Sustainability Principles. *Planning Theory & Practice*, 10(1):11–33.
- GREEN, D. G. (1994). Connectivity and Complexity in Landscapes and Ecosystems. *Pacific Conservation Biology*, 1(3):194–200.
- GREEN, D. G., TRIDGELL, A. et GILL, A. (1990). Interactive simulation of bushfires in heterogeneous fuels. *Mathematical and Computer Modelling*, 13(12):57–66.
- GUENGANT, A. (1992). *Les coûts de la croissance périurbaine. L'exemple de l'agglomération rennaise*. Association des Etudes Foncières, Paris.
- GUILLAIN, R. (1999). *Externalités d'informations et évolution des villes*. Laboratoire d'analyse et de techniques économiques (LATEC), Dijon.
- GUTIÉRREZ, J., CONDEÇO-MELHORADO, A. et MARTÍN, J. C. (2010). Using accessibility indicators and GIS to assess spatial spillovers of transport infrastructure investment. *Journal of Transport Geography*, 18(1):141–152.
- HABERMAS, J. (1990). Moral consciousness and communicative action. *Journal of Speculative Philosophy*, 9:225.
- HAGELSTEIN, R. (2004). *Interaction entre règles et acteurs dans la production de l'espace bâti. Approche de pratiques passées et actuelles du règlement d'urbanisme et du plan d'aménagement*. Thèse de doctorat, Université Catholique de Louvain.
- HANDY, S. (1993). Regional versus local accessibility : Implications for nonwork travel.

- HANDY, S. (2005a). Critical Assessment of the Literature on the Relationships Among Transportation, Land Use, and Physical Activity. *In TRB Special Report 282*, page 102.
- HANDY, S. (2005b). Planning for accessibility in theory and in practice. *In* LEVINSON, D. et KRIZEK, K., éditeurs : *Access to Destinations*, chapitre Chapter 7., pages 131–147. Elsevier.
- HANDY, S. L. (1996). Understanding the Link Between Urban Form and Nonwork Travel Behavior. *Journal of Planning Education and Research*, 15(3):183–198.
- HANSEN, F. (2012). Caractéristiques du parc automobile de 1962 à 2012.
- HANSEN, W. (1959). How accessibility shapes land use. *Journal of the American Planning Institute*, 25:73–76.
- HANSON, S. (1980). Spatial diversification and multipurpose travel : Implications for Choice Theory. *Geographical Analysis*, 12(3):245–257.
- HEALEY, P. (1992). Planning through Debate : The Communicative Turn in Planning Theory. *The Town Planning Review*, 63:143–162.
- HEALEY, P. (1999). Institutional Analysis, Communicative Planning, and Shaping Places. *Journal of Planning Education and Research*, 19(2):111–121.
- HEINZ, A., PELTIER, F. et THILL, G. (2011). *Le logement : immeubles d'habitation, ménages, propriétaires et locataires*, volume 8. STATEC. Recensement de la population, Luxembourg.
- HEWKO, J., SMOYER-TOMIC, K. E. et HODGSON, M. J. (2002). Measuring neighbourhood spatial accessibility to urban amenities : does aggregation error matter? *Environment and Planning A*, 34(7):1185–1206.
- HIGGS, G., FRY, R. et LANGFORD, M. (2012). Investigating the implications of using alternative GIS-based techniques to measure accessibility to green space. *Environment and Planning B : Planning and Design*, 39(2):326–343.
- HILLIER, B. et HANSON, J. (1984). *The social logic of space*. Cambridge University Press, Cambridge.
- HOFFMANN, M. (2012). Sortir de l'échec. La politique du logement au Luxembourg. *In* SCHRÖNER, D. et URBÉ, R., éditeurs : *Sozialalmanach*, page 24 pages. Caritas, Luxembourg.
- HOPKINS, L. D. (1977). Methods for Generating Land Suitability Maps : A Comparative Evaluation. *Journal of the American Institute of Planners*, 43:386–400.
- HOUET, T. (2015). Usages des modèles spatiaux pour la prospective. *Revue internationale de géomatique*, 25(1):123–143.

- HUDSON, B. M., GALLOWAY, T. D. et KAUFMAN, J. L. (1979). Comparison of Current Planning Theories : Counterparts and Contradictions. *Journal of the American Planning Association*, 45(4):387–398.
- HUR, M., NASAR, J. L. et CHUN, B. (2010). Neighborhood satisfaction, physical and perceived naturalness and openness. *Journal of Environmental Psychology*, 30(1):52–59.
- JENKS, M. et BURGESS, R. (2000). *Compact Cities : Sustainable Urban Forms for Developing Countries*. Jenks, M. and Burgess, R. (eds) (2000) . London : Spon Press., London.
- JOLY, I. (2003). *Les rapports espace-temps de la mobilité quotidienne et les systèmes productifs des transports urbains*. LET-ENTPE. Rapport des travaux effectués dans le cadre de l’atelier technique du Commissariat général du Plan sur les transports urbains, Lyon.
- JOYE, Y. (2011). A review of the presence and use of fractal geometry in architectural design. *Environment and Planning B : Planning and Design*, 38(5):814–828.
- KAMPS, S. (2013). *Dual-agent simulation model of the residential development process. An institutional approach to explaining the spatial patterns of residential developments in France, England and the Netherlands*. Thèse de doctorat.
- KAPLAN, S. (1987). Aesthetics, Affect, and Cognition : Environmental Preference from an Evolutionary Perspective. *Environment and Behavior*, 19(1):3–32.
- KIRKPATRICK, S., GELATT, C. D. et VECCHI, M. P. (1983). Optimization by simulated annealing. *Science (New York, N.Y.)*, 220(4598):671–80.
- KITAMURA, R., MOKHTARIAN, P. L. et LAIDET, L. (1997). A micro-analysis of land use and travel in five neighborhoods in the San Francisco Bay Area. *Transportation*, 24(2):125–158.
- KLOSTERMAN, R. E. (1978). Foundations for Normative Planning. *Journal of the American Institute of Planners*, 44(1):37–46.
- KLOSTERMAN, R. E. (1999). The What if? Collaborative planning support system. *Environment and Planning B : Planning and Design*, 26:393–408.
- KOENIG, J. (1980). Indicators of Urban Accessibility : Theory and Application. *Transportation*, 0:145–172.
- KONG, F., YIN, H. et NAKAGOSHI, N. (2007). Using GIS and landscape metrics in the hedonic price modeling of the amenity value of urban green space : A case study in Jinan City, China. *Landscape and Urban Planning*, 79(3-4):240–252.

- KRIZEK, K. J. (2003). Residential relocation and changes in urban travel : Does neighborhood-scale urban form matter? *Journal of the American Planning Association*.
- KWAN, M. (1998). Space-time and integral measures of individual accessibility : a comparative analysis using a point-based framework. *Geographical Analysis*, 30(3):191–216.
- LABUSSIÈRE, O. (2010). La prudence comme principe d'action , perspectives deleuziennes sur l'aménagement et les milieux géographiques. *In L'espace de la différence*, pages 1–6, Milan. Université de Milan-Bicocca.
- LAGOPOULOS, A. (1995). *Urbanisme et sémiotique dans les sociétés pré-industrielles*. Anthropos (La bibliothèque des formes), Paris.
- LAJOIE, G. (2007). *Recherches en modélisation urbaine*. Habilitation à diriger des recherches. Université de la Réunion.
- LANNOY, P. (2005). Famille et automobile dans les travaux de l'École de Chicago. Un chapitre oublié de la recherche sociologique sur la motorisation. *Networks and Communication Studies*, 19(3-4):141–155.
- LARRUE, C. (2010). Recherche et développement régional durable. *In RABELAIS, P. u. F., éditeur : Proceedings of the Third European Symposium*, page 417 pages, Tours. Maison des sciences de l'homme, villes et territoires.
- LE BOENNEC, R. (2014). Externalité de pollution versus économies d'agglomération : le péage urbain, un instrument environnemental adapté? *Revue d'Economie Régionale et Urbaine*, août(1): 3–31.
- LE CORBUSIER (1971). *La Charte d'Athènes*. Editions du Seuil. Préface de Jean Giraudoux, Paris.
- LE COUÉDIC, D. (2012). Le passé pour présente demeure? *Ethnologie française*, 42(4):747–759.
- LE GOIX, R. (2005). Gated Communities : Sprawl and Social Segregation in Southern California. *Housing Studies*, 20(2):323–343.
- LE JEANNIC, T. (1997). Trente ans de périurbanisation : extension et dilution des villes. *Economie et statistique*, 307(1):21–41.
- LEDROUT, R. (1984). *La Forme et le sens dans la société*. Méridiens, Paris.
- LEE, D. B. (1994). Retrospective on Large-Scale Urban Models. *Journal of the American Planning Association*, 60(1):35–40.
- LEFEBVRE, H. (1974). La production de l'espace. *L Homme et la société*, 31(1):15–32.

- LELEUX, C. (1998). Valeurs et normes, quelle universalité pour quelle morale? *Revue de Recherches en Education*, 21(2):135–144.
- LEVINSON, D. M. (1998). Accessibility and the journey to work. *Journal of Transport Geography*.
- LÉVY, A. (1988). Forme urbaine, tissu urbain et espace public. In MERLIN, P. et CHOAY, F., éditeurs : *Morphologie urbaine et Parcellaire*, page 292 pages. Presses universitaires de Vincennes, Saint-Denis.
- LÉVY, J. et LUSSAULT, M. (2013). *Dictionnaire de la géographie et de l'espace des sociétés*. Belin, Paris.
- LONG, N. E. (1959). Planning and Politics in Urban Development. *Journal of the American Institute of Planners*, 25(4):167–169.
- LOTFI, S. et KOOHSARI, M. J. (2009). Measuring objective accessibility to neighborhood facilities in the city (A case study : Zone 6 in Tehran, Iran). *Cities*, 26(3):133–140.
- LYNCH, K. (1981). *A theory of good city form*. Mass, MIT Press, Cambridge.
- MAGRI, S. et TOPALOV, C. (1987). De la cité-jardin à la ville rationalisée. Un tournant du projet réformateur (1905-1925) dans quatre pays. *Revue française de sociologie*, 28(3):417–451.
- MAIGNANT, G. (2005). Compacité et forme urbaine, une analyse environnementale dans la perspective d'un développement urbain durable. In *Actes du colloque «Développement urbain durable*, pages 1–17.
- MALCZEWSKI, J. (2004). GIS-based land-use suitability analysis : a critical overview. *Progress in Planning*, 62(1):3–65.
- MALIZIA, E. et EXLINE, S. (2000). *Consumer preferences for residential development alternatives*. Working Paper 2000-02. University of North Carolina. Center for urban and regional studies, Chapel Hill.
- MANDELBROT, B. B. (1982). *The Fractal Geometry of Nature*. Freeman and Co, New-York.
- MANGIN, D. et PANERAI, P. (2006). *Projet urbain*.
- MARCHETTI, C. (1991). Voyager dans le temps. Considérations pour une meilleure exploitation de la liaison fixe. *Futuribles*.
- MARTIN, P. (2006). Caractérisation fractale du relief « stationnarisé » du Lodévois. In *Colloque SA-GEO*, pages 1–23, Strasbourg.
- MARTIN, R. (2005). Critical of What ? Toward a Utopian Realism. *Harvard Design Magazine*, (22):1–5.

- MARX, K. (1867). *Le Capital, Livre I*. Bibliothèque de la Pléiade, Paris.
- MASSOT, M.-H. (2010). *Mobilités et Modes de vie Métropolitains, Les intelligences du quotidien*. L'Oeil d'Or, Paris.
- MCCANN, E. J. (1995). Neotraditional developments : the anatomy of a new urban form. *Urban Geography*, 16(3):210–233.
- MEADOWS, D. H., GOLDSMITH, E. et MEADOW, P. (1972). *The limits to growth*. Publications du club de Rome, Hambourg.
- MERLIN, P. et CHOAY, F. (1988). *Morphologie urbaine et Parcelaire*. Presses universitaires de Vincennes, Saint-Denis.
- METROPOLIS, N., ROSENBLUTH, A. W., ROSENBLUTH, M. N., TELLER, A. H. et TELLER, E. (1953). Equation of State Calculations by Fast Computing Machines. *The Journal of Chemical Physics*, 21(6):1087.
- MICOUD, A. (1992). La production sociale de normes en matière d'environnement. In FRITSCH, P., éditeur : *L'activité sociale normative*, pages 69–91. CNRS, Paris.
- MILLER, D., HORNE, P., MORRICE, J. et DONNELLY, D. (2012). Physical and Visual Accessibility of Greenspace. In *12th International Conference on Design & Decision Support Systems*, pages 1–16, Eindhoven.
- MINISTÈRE DE L'INTÉRIEUR (2003). *Programme directeur d'aménagement du Territoire*. Ministère de l'Intérieur. Direction de l'Aménagement du Territoire et de l'Urbanisme, Luxembourg.
- MINISTÈRE DE L'INTÉRIEUR (2004). *IVL. Un concept intégré des transports et du développement spatial pour le Luxembourg*. L'idée, l'analyse, le concept, Luxembourg.
- MINISTÈRE DE L'INTÉRIEUR ET DE L'AMÉNAGEMENT DU TERRITOIRE ET CEPS/INSTEAD (2008). *Suivi du développement territorial du Luxembourg à la lumière des objectifs de l'IVL*. Direction de l'Aménagement du Territoire, Ministère de l'Intérieur et de l'Aménagement du Territoire, Luxembourg.
- MINISTÈRE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE ET DES INFRASTRUCTURES (2012). *Stratégie Globale pour une Mobilité Durable. Pour les résidents et les frontaliers*.
- MINISTÈRE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE ET DES INFRASTRUCTURES (2015). *Quelle démarche pour un développement spatial durable ? Rapport sur le débat de consultation*. Département de l'aménagement du territoire, Luxembourg.

- MOINE, A. (2006). Le territoire comme un système complexe : un concept opératoire pour l'aménagement et la géographie. *L'espace géographique*, 35(2):115–132.
- MONGIN, D. (2005). *La condition urbaine : la ville à l'heure de la mondialisation*. Coll. La couleur des idées, Editions du Seuil.
- MORENO, D. (2009). *Une approche réseau pour l'intégration de la morphologie urbaine dans la modélisation spatiale individu-centrée*. Numéro 1. Thèse de doctorat. Université de Pau et des Pays de l'Adour.
- MORET, F. (2008). Les socialistes anglais et la question de l'habitat collectif dans la première moitié du XIXe siècle. *Revue du Nord*.
- MORRIS, E. W., CRULL, S. et WINTER, M. (1976). Housing Norms, Housing Satisfaction and the Propensity to Move. *Journal of Marriage and the Family*.
- NAESS, P. (1994). Normative planning theory and sustainable development. *Scandinavian Housing and Planning Research*, 11:145–167.
- NEUMAN, M. (2005). The Compact City Fallacy. *Journal of Planning Education and Research*, 25(1): 11–26.
- NEUTENS, T., SCHWANEN, T. et WITLOX, F. (2010). Equity of urban service delivery : a comparison of different accessibility measures. *Environment and Planning A*.
- NEW CLIMATE ECONOMY (2015). *Seizing the Global Opportunity*. The Report for the Global Commission on the Economy and Climate, Washington.
- NEWMAN, P. et KENWORTHY, J. (1989). *Cities and Auto Dependency : A Sourcebook*. Gower Publishing Co., Aldershot (UK).
- OBSERVATOIRE DE L'HABITAT (2012). *Le potentiel foncier constructible théorique au Luxembourg en 2010*.
- OCDE (2012). *Études économiques de l'OCDE. Luxembourg*. Editions OCDE.
- ORFEUIL, J.-P. (1994). *Je suis l'automobile*. Les Éditions de l'Aube, La Tour d'Aigues.
- ORFEUIL, J.-P. (2000). *Stratégies de localisation. Ménages et services aux ménages*. La Documentation Française, Paris.
- OSTROWETSKY, S. et BORDREUIL, J. S. (1975). *Structure de communication et espace urbain – La centralité*. DGRST, tome I, copédith, Université d'Aix-en-Provence.

- PAQUOT, T. (1996). *L'utopie : ou l'idéal piégé*. Hatier.
- PAQUOT, T. (2013). L'utopie. In LÉVY, J. et LUSSAULT, M., éditeurs : *Dictionnaire de la géographie et de l'espace des sociétés*. Nouvelle édition. Editions Belin, Paris.
- PARKER, D. C., MANSON, S. M., JANSSEN, M. A., HOFFMANN, M. J. et DEADMAN, P. (2003). Multi-Agent Systems for the Simulation of Land-Use and Land-Cover Change : A Review. *Annals of the Association of American Geographers*, 93(2):314–337.
- PETIT, S. (2005). *La dépendance automobile au Grand-Duché de Luxembourg*. Universités Paris 1 et Paris 4 - Panthéon-Sorbonne. Insitut de Géographie, Paris.
- PETIT, S. (2007). *Le processus de dépendance automobile*. CEPS/INSTEAD, Luxembourg.
- PETTIT, C. J. (2005). Use of a collaborative GIS-based planning-support system to assist in formulating a sustainable-development scenario for Hervey Bay, Australia. *Environment and Planning B : Planning and Design*, 32(4):523–545.
- PHIPPS, M. (1989). Dynamical behavior of cellular automata under the constraint of neighborhood coherence. *Geographical Analysis*, 21:197–215.
- PHIPPS, M. et LANGLOIS, a. (1997). Spatial dynamics, cellular automata, and parallel processing computers. *Environment and Planning B : Planning and Design*, 24:193–204.
- PHIPPS, M. J. (1992). From local to global : the lesson of cellular automata. *Individual-based models and approaches in ecology - populations, communities and ecosystems*, pages 165–187.
- PINSON, D. et THOMANN, S. (2000). *Territoires de la maison en péri-urbain et métropolisation, Villas à la campagne urbaine entre Aix et Marseille*. rapport de recherche pour le Plan Construction, Urbanisme, Architecture, cirta/iar, Université d'Aix-Marseille III, urmis/soliis/cnrs.
- PIRON, O. (2007). Les déterminants économiques de l'étalement urbain. *Economie et construction*, 147:36–41.
- PORTUGALI, J., BENENSON, I. et OMER, I. (1994). Sociospatial Residential Dynamics : Stability and Instability within a Self-Organizing City. *Geographical Analysis*, 26(4):321–340.
- PUJOL, S., BERTHILLIER, M., DEFRANCE, J., LARDIÈS, J., PETIT, R., HOUOT, H., LEVAIN, J. P., MASELOT, C. et MAUNY, F. (2012). Urban ambient outdoor and indoor noise exposure at home : A population-based study on schoolchildren. *Applied Acoustics*, 73(8):741–750.
- PYATOK, M. (2000). The Politics of design : the new urbanists vs. the grassroots. *Housing Policy Debate*, 11(4):803–814.

- RACINE, J.-B. (1993). *La ville entre Dieu et les hommes*. Anthropos-Economica, Paris.
- RAGON, M. (1985). Architecture et mégastructures. *Communic*, 42:69–77.
- RAGON, M. (1986). *Histoire de l'architecture et de l'urbanisme modernes : 1 -Idéologies et pionniers, 1800-1910*. Casterman, Paris.
- RAMADIER, T. (2007). Mobilité quotidienne et attachement au quartier : une question de position ?
In AUTHIER, J.-Y., BACQUÉ, M.-H. et GUERIN-PACE, F., éditeurs : *Le quartier. Enjeux scientifiques, actions politiques et pratiques sociales*, chapitre Chapitre 1, pages 127–138. La Découverte.
- RAUX, C., JOLY, I., MA, T.-Y., CROZET, Y., OVTRACHT, N. et THIEBAUT, V. (2010). *La croissance des budgets-temps de transport. Approfondissement*.
- RAYNAUD, D. (1999). Forme urbaine : une notion exemplaire du point de vue de l' épistémologie des sciences sociales. In BOUDON, P., éditeur : *Langages singuliers et partagés de l'urbain (Actes du Colloque LOUEST, CNRS UMR 7544)*, pages 93–120.
- RENARD, V. (2006). Finances locales et formes du développement urbain. *Revue d'Économie Financière*, 86(5):147–156.
- REPS, J. W. (1956). William Penn and the Planning of Philadelphia. *Town Planning Review*, 27:27.
- RICHARDSON, B. (1876). *Hygeia, a city of health*. Macmillan.
- RIDGLEY, M. A. (1995). Determining Rural Land-Use Goals : Methodological Primer and an Application to Agroforestry in Italy. *The Environmental Professional*, 17(3):209–225.
- ROSENAU, H. (1974). *Ideal City*. Studio Vista, Londres.
- ROYAL INSTITUTE OF BRITISH ARCHITECTS (2011). *The Case for Space. The size of England's New Homes*. Homewize, London.
- RUDLIN, D., SAMPSON, J., GALLENZ, S. et BANNER, S. (2013). *Space to park*. Rapport de l'URBED. Université d'Edimbourg - Design for Homes, Manchester.
- SAJOUS, P. (2004). Habiter en espace périurbain et usages de la voiture. *Espaces Géographiques et Sociétés*, 21:129–134.
- SALAT, S. (2011). *Les villes et les formes : Sur l'urbanisme durable*. Editions Hermann.
- SALINGAROS, N. a. (1999). Urban space and its information field. *Journal of Urban Design*, 4(1):29–49.

- SALZE, P., BANOS, A., OPPERT, J.-M., CHARREIRE, H., CASEY, R., SIMON, C., CHAIX, B., BADARIOTTI, D. et WEBER, C. (2011). Estimating spatial accessibility to facilities on the regional scale : an extended commuting-based interaction potential model. *International journal of health geographics*, 10(2): 1–16.
- SCHOEMAKER, P. J. H. (1995). Scenario Planning : A Tool for Strategic Thinking. *MIT Sloan Management Review*, 36:25–40.
- SCHULLER, G. et SINNER, V. (2013). *Regards sur la création nette d'emploi depuis la crise*. STATEC. Institut national de la statistique et des études économiques.
- SEILER, C. (2014). Entretien avec Cotten Seiler. « L'automobile a refondé l'individualisme américain ». ».
- SHEN, G. (2002). Fractal dimension and fractal growth of urbanized areas. *International Journal of Geographical Information Science*, 16(5):419–437.
- SORENSEN, A. (2001). Subcentres and Satellite Cities : Tokyo's 20th Century Experience of Planned Polycentrism. *International Planning Studies*, 6:9–32.
- SRINIVASAN, S. et FERREIRA, J. (2002). Travel behavior at the household level : understanding linkages with residential choice. *Transportation Research Part D : Transport and Environment*, 7(3):225–242.
- STATEC (2014). *Le Luxembourg en chiffres*. STATEC. Institut national de la statistique et des études économiques.
- STOCK, M. (2004). L'habiter comme pratique des lieux géographiques.
- SUSANKA, S. et OBOLENSKY, K. (1998). *The not so big house : a blueprint for the way we really live / Sarah Susanka with Kira Obolensky*. Taunton Press, Newtown.
- TALLEN, E. (2000). New Urbanism and the Culture of Criticism. *Urban Geography*, 21(4):318–341.
- TALLEN, E. (2001). Traditional Urbanism Meets Residential Affluence : An Analysis of the Variability of Suburban Preference. *Journal of the American Planning Association*, 67(2):199–216.
- TALLEN, E. (2013). *Charter of the New Urbanism*. Second Edition. MacGraw Hill Education, New-York.
- TANNIER, C. (2009). Formes de villes optimales, formes de villes durables. Réflexions à partir de l'étude de la ville fractale. *Espaces et sociétés*.

- TANNIER, C., FOLTÊTE, J.-C. et GIRARDET, X. (2012a). Assessing the capacity of different urban forms to preserve the connectivity of ecological habitats. *Landscape and Urban Planning*, 105(1-2):128–139.
- TANNIER, C., FRANKHAUSER, P., HOUOT, H. et VUIDEL, G. (2012b). Probabilistic modelling for simulating intra-urban residential migration. Application to the question of the annoyance of traffic noise. In ALEXANDRE, V., éditeur : *Penser et Agir - Contextes philosophiques, praxéologiques et langagiers. Tome 2.*, pages 129–172. Le Manuscript, Paris.
- TANNIER, C., HIRTZEL, J., STEPHENSON, R., COUILLET, A., VUIDEL, G. et YOUSOUFI, S. (2015). 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*.
- TANNIER, C., MORER, M. et ANSEL, D. (2012c). La décision spatiale, entre choix individuels et références collectives. In FRANKHAUSER, P. et ANSEL, D., éditeurs : *La décision d'habiter ici ou ailleurs*, pages 147–174. Economica Anthropos, Paris.
- TANNIER, C., VUIDEL, G., FRANKHAUSER, P. et HOUOT, H. (2010). Simulation fractale d'urbanisation. *Revue Internationale de Géomatique*, 20(3):303–329.
- TANNIER, C., VUIDEL, G., HOUOT, H. et FRANKHAUSER, P. (2012d). Spatial accessibility to amenities in fractal and nonfractal urban patterns. *Environment and Planning B : Planning and Design*, 39(5):801–819.
- TAVEAU (2013). L'urbanisme face à la crise : une possible renaissance ?
- TEWDWR-JONES, M. et ALLMENDINGER, P. (1998). Deconstructing communicative rationality : a critique of Habermasian collaborative planning. *Environment and Planning A*, 30(11):1975–1989.
- THEYS, J. (2002). L'approche territoriale du "développement durable", condition d'une prise en compte de sa dimension sociale. *Développement durable et territoires*, Dossier 1.
- THOMAS, I. et FRANKHAUSER, P. (2013). Fractal dimensions of the built-up footprint : buildings versus roads. Fractal evidence from Antwerp (Belgium). *Environment and Planning B : Planning and Design*, 40(2):310–329.
- THOMAS, I., FRANKHAUSER, P. et BIERNACKI, C. (2008). The morphology of built-up landscapes in Wallonia (Belgium) : A classification using fractal indices. *Landscape and Urban Planning*, 84(2): 99–115.

- TILL, K. E. (2001). New Urbanism and Nature : Green Marketing and the Neotraditional Community. *Urban Geography*, 22(3):220–248.
- TOBLER, W. (1970). A Computer Movie Simulating Urban Growth in the Detroit Region. *Economic Geography*, 46:462–465.
- TOBLER, W. (1979). Cellular Geography. In GALE, S. et OLSSON, G., éditeurs : *Philosophy in Geography*, pages 379–386. D. Reidel Publishing Company, Dordrecht.
- TORRENS, P. (2000). *How Cellular models of urban systems work. 1. Theory*. Center for Advanced Spatial Analysis. Working Paper Series 28, London.
- TRAUSCH, G. (2012). *Les mutations économiques et sociales de la société luxembourgeoise depuis la révolution française*. STATEC. Institut national de la statistique et des études économiques.
- TSOU, K.-W., HUNG, Y.-T. et CHANG, Y.-L. (2005). An accessibility-based integrated measure of relative spatial equity in urban public facilities. *Cities*, 22(6):424–435.
- TURING, A. (1936). On Computable Numbers, with an Application to the Entscheidungsproblem. *Journal of Mathematics*, 58(5):345–363.
- ULAM, S. (1952). Random processes and transformations. *Proceedings of the International Congress of Mathematics, Vol. 2*, pages 264–275.
- UNWIN, R. (1909). *Town planning in practice : An Introduction to the Art of Designing Cities and Suburbs*. Charles Scribner & Sons, New-York.
- VANIER, M. (2005). La relation ville / campagne excédée par la périurbanisation. *Cahiers Français*, 328:13–17.
- VON NEUMANN, J. (1951). Various techniques used in connection with random digits. *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, 12:36–38.
- VON NEUMANN, J. et BURKS, A. W. (1966). Theory of self-reproducing automata. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 5(1):3–14.
- VOOGD, H. (1983). *Multicriteria evaluation for urban and regional planning*. Pion.
- WALLISER, B. (2003). Théorie des jeux et institutions. *Cahiers d'économie Politique*, 44(1):165–179.
- WATSON, V. (2002). The Usefulness of Normative Planning Theories in the Context of Sub-Saharan Africa. *Planning Theory*, 1(1):27–52.

- WEGENER, M. (2011). From Macro to Micro—How Much Micro is too Much? *Transport Reviews*, 31(2):161–177.
- WEGENER, M. et FÜRST, F. (1999). *Land use transport interaction : state of the art*. TRANSLAND, IRPUD report, Dortmund.
- WHITE, R. et ENGELEN, G. (1993). Cellular automata and fractal urban form : a cellular modelling approach to the evolution of urban land-use patterns. *Environment and Planning A*, 25(8):1175–1199.
- WHITE, R., ENGELEN, G. et ULJEE, I. (1997). The use of constrained cellular automata for high-resolution modelling of urban land-use dynamics. *Environment and Planning B : Planning and Design*, 24(3):323–343.
- WHITEHAND, J. (1981). *The Urban Landscape : Historical Development and Management*. Institute of British Geographers Special Publication no.13. Academic Press, Londres.
- WILLENS, H. (1970). The regulation of motor vehicle emissions. *Natural Resources Lawyer*, 3:120–130.
- WILLIAMS, K. (2000). Does intensifying cities make them more sustainable? In JENKS, M. et BURTON, E., éditeurs : *Achieving sustainable urban forms*, pages 30–45. Taylor & Francis.
- WILSON, B. et CHAKRABORTY, A. (2013). The Environmental Impacts of Sprawl : Emergent Themes from the Past Decade of Planning Research. *Sustainability*, 5(8):3302–3327.
- WOLFRAM, S. (2002). *A new kind of science*. Wolfram media, Champaign.
- WUNENBURGER, J.-J. (1979). *L'utopie ou la crise de l'imaginaire*. Jean-Pierre Delarge, Paris.
- YOUSOUFI, S. (2011). *Satisfaction résidentielle et configurations spatiales en milieu périurbain*. Thèse de doctorat, Université de Franche-Comté, Besançon.
- ZAHAVI (1979). *The "UMOT" project*. Rapport pour le Département des Transports des Etats-Unis et le ministère des Transports de la République Fédérale d'Allemagne.
- ZAHLEN, P. (2012). Regards sur les bâtiments achevés. *Regards*, 2:74–77.
- ZUINDEAU, B. (2010). *Développement Durable et Territoire*. Presses universitaires du Septentrion, Villeneuve D'Asq.

Une approche normative de l'aménagement au Luxembourg

Évaluation par la simulation

Au Luxembourg, les pratiques de mobilité quotidienne des frontaliers et des résidents engendrent une forte dépendance à l'automobile. Ce processus favorise l'étalement urbain alors même que le pays a pour objectif de répondre à une demande en logements conséquente tout en limitant la consommation foncière. Dans ce contexte, l'objectif central de cette thèse est de donner de nouveaux éclairages sur la relation entre les formes du développement résidentiel et les mobilités quotidiennes qui y sont associées. Pour y parvenir, une démarche normative d'aménagement a été adoptée. Celle-ci consiste à proposer de nouvelles normes d'aménagement, en fonction d'un objectif donné. Des règles quantitatives sont les instruments de mise en application des normes.

L'application d'une telle démarche normative se fait en trois étapes dans la thèse : i) la conception de scénarios de développement résidentiel à l'horizon 2030. L'introduction d'une règle d'urbanisation fractale permet la simulation de formes de développement résidentiel réalistes ; ii) la simulation des scénarios de développement résidentiel, à l'aide de la plateforme de simulation MUP-City et iii) l'évaluation des configurations spatiales simulées en termes d'accessibilité spatiale aux aménités rurales et urbaines (calculs SIG), et de durabilité des comportements de mobilité quotidienne (simulations au moyen de la plateforme MobiSim).

Dans la plupart des scénarios, l'accessibilité spatiale à un large panel d'aménités (commerces, services, espaces verts et de loisirs, stations de transports en commun) est améliorée par rapport à la situation initiale observée en 2010. Les données de simulation des mobilités quotidiennes, par la prise en compte des comportements individuels des agents dans le modèle, confirment l'intérêt des scénarios simulés. La part modale de la voiture, qui est de 70% en 2010, diminue en effet dans tous les scénarios. Elle atteint 58% en 2030 pour l'un des scénarios. Parallèlement, les distances et le budget temps accordés à la marche à pied augmentent fortement.

Les résultats de ce travail de thèse montrent l'intérêt d'une démarche normative appliquée aux questions d'aménagement du territoire, notamment en ce qui concerne le développement résidentiel. Les résultats soulignent également l'intérêt d'une modélisation fractale des formes urbaines, tant au niveau local (quartier, commune) que global (région urbaine).

Mots-clés : aménagement, planification, mobilité quotidienne, formes urbaines, et simulations spatiales

A normative planning approach for the Luxembourg

Assessment based on spatial simulation

In Luxembourg, daily mobility patterns of both cross-border workers and residents lead to a strong car dependence. This process encourages urban sprawl. Meanwhile the country is faced to increasing housing needs but has to reduce land consumption. Within this context, the main objective of this thesis is to throw light about the relation between residential growth patterns and daily mobility behaviors. In this way, a normative planning approach has been adopted. This approach proposes new planning norms for achieving a series of planning objectives. Quantitative rules are the tools used to apply the norms.

Three steps have been done: i) conception of residential growth scenarios for 2030. By applying a fractal rule, we obtain realistic residential development patterns ; ii) spatial simulation of residential growth scenarios, with the MUP-City platform and iii) assessment of simulated spatial configurations regarding both the spatial accessibility to rural and urban amenities (GIS calculations) and the sustainability of daily mobility behaviors (simulations with the MobiSim platform).

In most of the scenarios, spatial accessibility to a various range of facilities (retails, services, green spaces, leisures and public transport stations) is increased compared to the initial state observed in 2010. Simulated daily mobility, by taking into account individual behaviors of agents in the model, confirms the interest of the proposed scenarios. The modal share of car use, which was 70% in 2010, decreases in all cases. It reaches 58% in 2030 for one scenario. Simultaneously, the distances and the time-budget of pedestrians strongly raise.

This doctoral research shows the interest of a normative approach applied to spatial planning issues, particularly in terms of residential development. The results obtained also underline the interest of fractals for modelling urban forms, both at local (neighborhood, municipality) and global (urban region) scales.

Keywords: planning, prospective, daily mobility, urban forms, spatial simulation