

**Université de Liège, Faculté des Sciences Appliquées**  
Département ArGENCO - Architecture, Géologie, Environnement et Constructions  
LEMA - Local Environment: Management & Analysis

---

## **Méthodologie d'Evaluation Energétique des Quartiers Périurbains. Perspectives pour le Renouvellement Périurbain Wallon.**

---

Dissertation présentée en vue de l'obtention du titre de  
Docteur en Sciences de l'Ingénieur par  
**Anne-Françoise Marique**  
Ir Architecte - Urbaniste

### **Membres du Jury**

Prof. Sigrid Reiter, Université de Liège, Promotrice  
Prof. Pierre Ledercq, Université de Liège, Président  
Prof. André De Herde, Université catholique de Louvain  
Prof. Jean-Marie Halleux, Université de Liège  
Prof. Philippe Ménerault, Université Lille 1  
Prof. Emmanuel Rey, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne  
Prof. Jacques Teller, Université de Liège

Liège, Année académique 2012-2013  
Académie Universitaire Wallonie-Europe

---

Ce document présente les résultats originaux d'une recherche de thèse menée par

Anne-Françoise Marique  
Ingénieur Architecte – Urbaniste  
Université de Liège - LEMA  
Chemin des Chevreuils 1, Bâtiment B52/3  
B-4000 Liège, Belgique  
afmarique @ulg.ac.be

---

---

#### Composition du Jury pour la défense de thèse

- Sigrid Reiter, Chargée de Cours, Université de Liège,  
Local Environment : Management & Analysis (LEMA), Promotrice.
  - Pierre Leclercq, Professeur, Université de Liège,  
Lab for User Cognition & Innovative Design (LuciD), Président du Jury.
  - André De Herde, Professeur Ordinaire, Université catholique de Louvain,  
Architecture et climat.
  - Jean-Marie Halleux, Chargé de Cours, Université de Liège,  
Service de Géographie Economique (ECOGEO).
  - Philippe Ménerault, Professeur, Université Lille 1,  
Institut d'Aménagement et d'Urbanisme de Lille (IAUL).
  - Emmanuel Rey, Professeur, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne,  
Laboratoire d'Architecture et Technologies Durables (LAST).
  - Jacques Teller, Chargé de Cours, Université de Liège,  
Local Environment : Management & Analysis (LEMA).
- 

---

Cette recherche a été financée par la Région wallonne de Belgique, dans le cadre du projet de recherches SAFE (Suburban Areas Favoring Energy efficiency) – DGO4, Direction générale opérationnelle - Aménagement du territoire, Logement, Patrimoine et Energie, Département Energie et Bâtiment durable

---

---

Aux termes de la loi du 30 juin 1994 sur le droit de l'auteur et les droits voisins, seul l'auteur a le droit de reproduire partiellement ou complètement cet ouvrage de quelque manière et sous quelque forme que ce soit. Toute photocopie ou reproduction sous autre forme est donc faite en violation de cette loi et de ses modifications ultérieures.

---

Citation : Marique A.-F. (2012), Méthodologie d'Evaluation Energétique des Quartiers Périurbains. Perspectives pour le Renouvellement Périurbain Wallon, PhD Thesis, University of Liège, Belgium, 236p.

---

# Abstract [FR]

L'étalement urbain monofonctionnel et peu dense de la fonction résidentielle constitue un des phénomènes les plus marquants de l'évolution de nos territoires depuis la révolution industrielle. Selon un rapport de l'Agence Européenne pour l'Environnement (2006), l'étalement urbain menace, par sa rapidité et sa constance, l'équilibre environnemental, social et économique de l'Europe. La question énergétique, en particulier, est centrale et concerne directement ce modèle de développement, tant en termes de bâti que de mobilité car les territoires périurbains sont très dépendants de l'automobile.

Partant des hypothèses que la crise énergétique est un élément déclencheur pour interroger la mutation des espaces périurbains vers un modèle plus durable et que les modèles de la ville compacte et de la ville diffuse ne peuvent répondre aux enjeux rencontrés, la thèse aborde la question du recyclage des quartiers périurbains existants, sous l'angle énergétique.

Une instrumentation permettant de quantifier les consommations énergétiques relatives au chauffage des bâtiments et aux déplacements des personnes, à l'échelle des quartiers, est d'abord développée. Sur cette base, l'efficacité énergétique du modèle périurbain wallon et les conditions de sa mutation vers des quartiers périurbains plus durables sont investiguées. Deux leviers d'actions sont mobilisés dans le cadre de cette intervention : la forme urbaine et la mobilité. La forme urbaine, d'abord, est étudiée en complémentarité de l'échelle du bâtiment individuel car les mesures apportées à l'échelle du bâtiment (renforcement de l'isolation, recours à des énergies renouvelables, etc.) ne sont pas en mesure de répondre, seules, à l'ampleur des enjeux énergétiques qui touchent les territoires périurbains. La mobilité, ensuite, car l'étalement urbain est entretenu et favorisé, en grande partie, par la capacité des ménages à se déplacer individuellement, rapidement et sur de grandes distances. A cet effet, deux indicateurs principaux sont développés et discutés : les besoins de chauffage de différents types de formes périurbaines et un indice de performance des déplacements qui prend en compte distance parcourue, fréquence et mode de transport.

Des variations paramétriques sont réalisées sur des quartiers représentatifs pour déterminer les paramètres les plus influents. Sur cette base, des scénarios de renouvellement des quartiers périurbains sont proposés et leur impact énergétique potentiel quantifié. Ces scénarios abordent la rénovation énergétique des quartiers, la densification et la démolition / reconstruction. Ils montrent, qu'outre l'efficacité énergétique des bâtiments, les caractéristiques relatives à la forme urbaine ont un impact significatif sur les consommations.

L'impact de la structure territoriale (définie comme la conjonction de la localisation spatiale des emplois, des commerces, etc., la distribution spatiale de la population selon son lieu de résidence et les infrastructures) sur les consommations d'énergie relatives aux déplacements des personnes est enfin investiguée sur l'ensemble du territoire régional, en abordant l'influence de la localisation résidentielle sur les déplacements domicile-travail et sur les déplacements scolaires. La génération de mobilité est fortement liée à la localisation spatiale des lieux émetteurs et récepteurs de flux (résidences, emplois, écoles). Une approche locale permet d'identifier, hors des agglomérations principales, des noyaux secondaires qui présentent également des consommations faibles pour les déplacements. La mixité fonctionnelle en particulier permet, mieux que la densité de logements, d'expliquer la variation des consommations d'énergie pour les déplacements. La distance parcourue a un impact considérable sur les consommations d'énergie pour les déplacements alors que le mode de transport utilisé n'a qu'une influence relativement faible. Les comportements de mobilité pour les déplacements scolaires présentent des spécificités propres selon le niveau de scolarité considéré mais restent nettement moins consommateurs que les déplacements domicile-travail.

La thèse se conclut par la discussion des incidences pratiques de la recherche pour l'opérationnalisation d'un renouvellement périurbain qui s'articule autour de l'efficacité énergétique des bâtiments et des quartiers et de l'efficacité énergétique de l'urbanisation. L'aménagement du territoire doit créer des conditions favorables pour orienter les activités et les investissements au bon endroit et pour favoriser des formes urbaines plus efficaces.

## **Mots-clés**

Etalement urbain, renouvellement périurbain, efficacité énergétique, quartier, densification, rénovation énergétique, structure du territoire, déplacements domicile-travail, déplacements scolaires.

# Abstract [EN]

The expansion of urban areas, commonly referred to as urban sprawl, has been identified as a major issue for sustainable development (EEA, 2006). Urban sprawl is known to represent a significant contribution to the energy consumption of a territory for energy needs in buildings but also for transport, namely because sprawl spatially separates activities.

In this context, the thesis aims at evaluating the sustainability of Walloon suburban neighborhoods and highlighting conditions to improve energy efficiency in existing suburban fabrics. The thesis first describes a quantitative method that is developed to assess energy used in buildings and transport consumption, at the neighborhood scale. Two indices in particular are developed, compared and discussed: energy requirements for buildings heating in different representative suburban neighborhoods and a commute energy performance index that takes into account travel distance, frequency and mode of transport.

A sensitivity analysis is conducted to highlight the most relevant variables linking urban form and neighborhoods energy consumption in order to quantify their influence. On this basis, renewal scenarios are drawn and assessed. There deal with energy efficiency in retrofitted buildings, an increase in built density and demolition / reconstruction.

The thesis then investigates the interactions between the spatial structure of the territory (that is to say the system defined by the location of work places and services, the spatial distribution of population according to residence and infrastructures) and transport energy consumption for commuting. Urban structure acts upon travel energy consumption for commuting. A good mix between work, schools and dwellings at the local scale, which allows reduced travel distances, is a good strategy to reduce transport energy consumption, whereas means of transport used is only of little impact. Student travel behaviors are specific to the level of education and the type of neighborhood.

Finally, the thesis discusses the practical implications of the research to operationalize a suburban renewal that articulates energy efficiency of buildings and neighborhoods but also energy efficiency of the urban structure.

## Keywords

Urban sprawl, suburban renewal, energy efficiency, neighborhood, densification, retrofitting, urban structure, home-to-work commuting, school commuting.

# Remerciements

Je souhaite remercier tous celles et ceux qui, par leur aide, leurs conseils, leurs encouragements ou simplement leur présence, m'ont permis de mener à bien cette thèse. Mes remerciements s'adressent en particulier à

Ma promotrice, le Professeur Sigrid Reiter, pour la confiance qu'elle m'a témoignée dès son arrivée dans l'équipe du LEMA, son soutien inconditionnel, ses encouragements, ses commentaires toujours constructifs et, en particulier, les nombreuses opportunités et perspectives qu'elle m'a fait découvrir dans le monde de la recherche ;

La Région wallonne de Belgique (DGO4) qui a financé la thèse par l'intermédiaire du projet de recherches SAFE (Suburban Areas Favoring Energy efficiency), dans le cadre du programme mobilisateur Energywall 2009-2012, et les membres du comité d'accompagnement du projet ;

Monsieur le Professeur Pierre Leclercq qui m'a fait l'honneur d'accepter de présider le jury de la défense de thèse ;

Messieurs les Professeurs André De Herde (Université catholique de Louvain), Jean-Marie Halleux (Université de Liège), Philippe Ménerault (Université Lille 1), Emmanuel Rey (Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne) et Jacques Teller (Université de Liège) qui ont accepté de participer au jury et enrichissent la thèse de leurs expertises respectives ;

Mes collègues, anciens et actuels, du LEMA et du Lepur et les chercheurs avec qui j'ai eu le plaisir de collaborer ces dernières années ;

Thierry pour les corrections orthographiques finales ;

Ma famille, mes amis, Michel et Luan, François pour leur présence, leur soutien et le recul qu'ils m'ont permis de prendre par rapport à la thèse.

# Sommaire

---

<b>Chapitre I : Introduction Générale</b>	<b>1</b>
1. Contexte de la recherche	1
2. Objet de la thèse	4
3. Structure de la thèse	5
<hr/>	
<b>Chapitre II : L'Etalement Urbain</b>	<b>8</b>
1. Introduction	8
2. Grandes Tendances en Wallonie	10
3. Définition du Champ de l'Etude	38
<hr/>	
<b>Chapitre III : Energie et Forme Urbaine</b>	<b>56</b>
1. Introduction	56
2. Forme Urbaine et Energie, Etat de l'Art	58
3. Méthodes d'Evaluation Energétique Existantes	70
4. Synthèse et Positionnement de la Thèse	84
<hr/>	
<b>Chapitre IV : Méthode d'Evaluation Energétique</b>	<b>87</b>
1. Introduction et Objectifs	87
2. Evaluation Energétique des Déplacements	88
3. Evaluation Energétique des Bâtiments	101
4. Cycle de Vie des Bâtiments	108
5. Gisement Solaire	111
6. Reproductibilité, Limitations et Types d'Application	112

---

---

<b>Chapitre V : Applications et Scénarios Prospectifs</b>	<b>114</b>
1. Introduction et Objectifs	114
2. Cas d'Etudes	114
3. Evaluation Energétique	117
4. Variations Paramétriques	120
5. Scénarios de Renouvellement Périurbain	130
6. Synthèse et Généralisation	147
<b>Chapitre VI : Déplacements Domicile-Travail, Energie et Structure du Territoire</b>	<b>150</b>
1. Objectifs et Rappels	150
2. Zone d'Etude	152
3. Distances Parcourues et Parts Modales	153
4. Consommation d'Energie et Structure du Territoire	158
5. Variables Explicatives	168
6. Limitations et Reproductibilité	173
7. Conclusions et Incidences Pratiques	174
<b>Chapitre VII : Déplacements Scolaires, Energie et Structure du Territoire</b>	<b>176</b>
1. Objectifs et Rappels	176
2. Distances et Parts Modales	178
3. Consommation d'Energie et Structure du Territoire	181
4. Variables Explicatives	193
5. Limitations et Reproductibilité	194
6. Conclusions et Incidences Pratiques	195
<b>Chapitre VIII : Conclusions et Perspectives</b>	<b>197</b>
1. Synthèse des Principaux Résultats de la Thèse	197
2. Le Renouvellement Périurbain, un Concept à Opérationnaliser	200
3. Perspectives de Recherches Futures	202
<b>Bibliographie</b>	<b>206</b>
<b>Liste des Publications Rédigées dans le Cadre de la Thèse</b>	<b>221</b>
<b>Table des Illustrations</b>	<b>226</b>
<b>Table des Matières</b>	<b>232</b>

---



# Chapitre I

## Introduction Générale

### 1. Contexte de la recherche

L'étalement urbain monofonctionnel et peu dense, au-delà des limites de la ville traditionnelle, constitue un des phénomènes les plus marquants de l'évolution des territoires européens depuis la révolution industrielle. Ce phénomène se manifeste, dans une zone donnée, lorsque le taux d'occupation des terres et la consommation de celles-ci à des fins d'urbanisation augmentent plus rapidement que la population sur une période de temps déterminée (European Environment Agency, 2006). Il se matérialise concrètement par la prépondérance de constructions individuelles bâties sur de larges parcelles, en périphérie des villes et des noyaux ruraux.

L'étalement urbain résulte de la conjonction d'un ensemble complexe de facteurs qui ont permis son développement. Ces facteurs sont liés aux contraintes et disponibilités foncières, aux aspects juridiques et réglementaires souvent moins exigeants en périphérie qu'en centre-ville, aux dynamiques économiques, au mécanisme de financement communal qui favorise les localisations périphériques, à l'évolution des technologies et de la mobilité, mais aussi aux préférences individuelles des ménages en termes de choix résidentiels et de formes bâties. Ce modèle de développement basé sur la villa 4 façades construite sur une large parcelle est généralisé, tant en Belgique que dans de nombreux autres pays européens. Dès les années 60, Haumont et al. (1966) ont ainsi mis en évidence, dans le cadre de recherches sur la symbolique des pratiques dans l'habitat, l'attachement des classes populaires et moyennes à l'univers pavillonnaire. L'essor du modèle de la maison 4 façades bâtie sur une grande parcelle dans un environnement jugé plus naturel ne s'est pas démenti depuis. Il permet de rencontrer un certain nombre de désirs des ménages : l'accès à la propriété, le cadre de vie, etc. et relève d'un modèle culturel fortement ancré au sein d'une large part de la population qui valorise la périphérie « verte » et le « retour à la campagne », et rejette, dans un même mouvement, l'idée de la ville dense.

Au-delà de cet aspect sociétal, l'étalement urbain menace, par sa rapidité et sa constance, l'équilibre environnemental, social et économique de l'Europe (European Environment

Agency, 2006). Il pose une série de problèmes quant à sa durabilité et à sa viabilité. L'étalement urbain a fait, depuis les années 1970, l'objet de nombreuses études et recherches visant à en identifier les causes et conséquences sous différents aspects : consommation de terres non urbanisées et fragilisation des activités agricoles, surcoûts de la désurbanisation, impacts en termes de transport et d'infrastructures, banalisation des paysages et des formes architecturales et urbaines produites, mutations socio-démographiques, etc. Malgré ces études et les nombreuses mises en garde contre ce mode de développement qui émanent principalement du champ scientifique, l'étalement urbain continue sa progression, même s'il ralentit.

Les impacts environnementaux de l'étalement urbain, en particulier, sont maintenant bien documentés et il est communément admis que les territoires périurbains participent à une consommation accrue d'énergie et d'espace qu'il convient de limiter dans l'optique d'un développement plus durable de nos territoires. La question énergétique est centrale et concerne directement ce modèle de développement, tant en termes de bâti que de mobilité. Les primes et politiques actuelles ne visent pourtant presqu'exclusivement que le bâti, à l'échelle individuelle. C'est à ce niveau que le potentiel d'action est le plus facilement mobilisable même s'il semble peu probable que ces actions individuelles (isolation du bâti, recours aux énergies renouvelables, changement du comportement des occupants, etc.) puissent, seules, répondre aux enjeux énergétiques globaux. L'urbanisme, au contraire, est un outil non négligeable dans la gestion de la forme urbaine produite mais aussi de la mobilité induite, les territoires périurbains étant souvent très dépendants de l'automobile. C'est l'essor de la mobilité qui les a rendus possibles, et, dans un cercle vicieux, ces espaces périphériques encouragent un recours accru à la voiture individuelle. Les distances se sont ainsi allongées et la part de la voiture dans les déplacements a augmenté. Or, la mobilité n'a que rarement été intégrée dans le choix des ménages de privilégier une localisation périphérique. La question de la dépendance aux énergies fossiles et de la vulnérabilité de ces territoires peu denses et excentrés est cruciale, au regard de l'augmentation des coûts liés à la mobilité. Cette dépendance à l'automobile a, et aura, par ailleurs des conséquences sociales. Elle risque, à court terme, d'isoler et paupériser les quartiers les plus éloignés des aménités et services. La pérennité du modèle social qui sous-tend les quartiers périurbains, basé sur une forte homogénéité de la population et l' "entre-soi", se voit ici remise en question. Même si le modèle n'est pas idéal et a lourdement participé à la paupérisation des centres-villes, on peut craindre que sous la pression de plus en plus forte du coût du carburant, les ménages les plus aisés délaisSENT les quartiers périurbains pour réinvestir la ville ou les quartiers les mieux situés et que les ménages plus paupérisés ou vieillissants n'aient d'autre alternative, de par leur moindre mobilité individuelle, que de subsister, dans des conditions de vie moins favorables, dans un « périurbain de relégation » pour reprendre le terme utilisé par Guilluy and Noyé (2004).

La problématique de l'étalement urbain et de ses impacts environnementaux fait immanquablement ressurgir la question de la forme urbaine et de ses densités, et en particulier la validité de deux théories dominantes qui s'opposent traditionnellement quand il est question de répondre aux enjeux énergétiques et sociaux mis en évidence : la

« ville compacte » et la « ville diffuse » (Bochet, 2007, Holden and Norland, 2005). Les détracteurs du modèle périurbain articulent la ville compacte, par opposition avec l'étalement urbain, autour des concepts de la haute densité, de la mixité fonctionnelle et des systèmes de transports urbains performants. A la suite des travaux fondateurs de Newman et Kenworthy (1989a et 1989b), il est attribué à la ville compacte une série de vertus, tant environnementales et énergétiques que sociales, qui participeraient à la rendre durable : réduction des consommations d'énergie à la fois pour le transport des personnes et dans le secteur du bâtiment, économie des sols et des coûts d'urbanisation, mixité fonctionnelle et sociale, etc. S'il existe un large consensus depuis plusieurs années sur le fait que la ville compacte soit le meilleur moyen de réduire les consommations d'énergie, force est toutefois de constater que peu de preuves scientifiques existent pour confirmer cette tendance (Breheny, 1995). La faisabilité de ce modèle, présenté comme un idéal de planification urbaine, pose également question. De nombreuses recherches et politiques<sup>1</sup> s'accordent en effet le plus souvent à dire qu'il faut privilégier la ville compacte et limiter l'étalement urbain sans se poser la question de la faisabilité, à moyen terme, des actions proposées, ni aborder les impacts probables de ces actions, notamment en termes d'augmentation de la congestion, de la pollution, ou des prix fonciers. Retrouver les conditions de la ville compacte, à court ou moyen terme, est impossible compte tenu de la grande inertie du stock bâti et des temps longs qui caractérisent le foncier. Le taux de renouvellement du stock bâti (construction neuve) en Wallonie est au mieux estimé à 1 à 2% par an alors que la démolition de la forme urbaine à grande échelle reste historiquement exceptionnelle et ne peut être envisagée de façon systématique.

Au parfait opposé de la ville compacte, le modèle de la ville diffuse ou ville émergente éclatée trouve son origine dans les théories hygiénistes du XIXème siècle<sup>2</sup>. Il prônait, à son origine, la diminution d'usage du sol urbain pour réduire le coût de la vie et de la production. Ce modèle, qui s'est diffusé grâce à l'avènement de la mobilité (ferroviaire d'abord, automobile ensuite), reflète aujourd'hui, comme nous venons de le rappeler, le choix d'une partie de la population pour plus d'espace à moindre prix. Continuer à promouvoir ce modèle diffus peu dense, même à des standards de construction passifs ou à énergie positive ne réglera toutefois pas la question de la dépendance de ces territoires à l'automobile, encore presqu'exclusivement liée à l'usage de combustibles fossiles. Enfin, ni l'un ni l'autre de ces modèles ne se positionne sur la question du vieillissement et du recyclage des territoires déjà urbanisés.

---

<sup>1</sup> La Commission Européenne, dans son Green paper on the urban environment, comme divers états européens (Royaume-Uni, Pays-Bas, etc.), en a fait un des éléments-clés de sa politique environnementale et de développement durable, depuis les années 90.

<sup>2</sup> Les cités idéales d'Howard, la cité linéaire de Soria y Matta puis le broadacre city de Wright prônaient tous, à des fins hygiénistes, faible densité, qualité environnementale, accès aux bienfaits du progrès et lutte contre la spéculation. Ces modèles, antithèses de la ville, peuvent être vus comme les prémisses de l'étalement urbain.

## 2. Objet de la thèse

Partant des hypothèses que la crise énergétique est un élément déclencheur pour interroger le devenir des espaces périurbains et que les modèles de la ville compacte et de la ville diffuse ne peuvent répondre aux enjeux énergétiques, environnementaux et sociaux mis en évidence, l'objet de la thèse est, dans le contexte précisé ci-dessus, d'aborder la question du renouvellement des quartiers périurbains existants sous l'angle énergétique. Le « renouvellement périurbain » est compris ici comme l'évolution et la mutation des quartiers périurbains existants vers un modèle plus économique en énergie, de façon à réduire leur vulnérabilité et leur dépendance aux énergies fossiles. Il s'agit donc concrètement d'étudier la durabilité du modèle périurbain wallon et les conditions de cette mutation.

Deux leviers d'actions sont mobilisés dans le cadre de cette thèse : la forme urbaine, ou périurbaine dans le cas qui nous occupe, et la mobilité. La forme périurbaine, d'abord, est étudiée en complémentarité de l'échelle du bâtiment individuel car si la conception d'un bâtiment du point de vue énergétique a été largement analysée, l'influence de la forme urbaine sur l'efficacité énergétique du bâti à l'échelle des quartiers et sur la mobilité restent des domaines de recherches moins investigués, en particulier à l'échelle locale. Nous postulons par ailleurs que les mesures apportées à l'échelle du bâtiment (renforcement de l'isolation, recours à des énergies renouvelables, etc.) ne sont pas en mesure de répondre, seules, à l'ampleur des enjeux énergétiques qui touchent les territoires périurbains. Il convient ici de dépasser un des paradoxes du développement durable qui est que les conséquences sont pensées et présentées à l'échelle planétaire (changement climatique, perte de biodiversité, etc.) alors que les actions concrètes sont, le plus souvent, menées ponctuellement, à l'échelle individuelle. La mobilité, ensuite, car l'étalement urbain est entretenu et favorisé, en grande partie par la dépendance à la voiture individuelle. Il nous semble ici nécessaire de coordonner urbanisme et transport, pour dessiner un territoire périurbain plus durable et moins dépendant des énergies fossiles. Il s'agit ici d'analyser l'impact de la structure périurbaine (définie comme la conjonction de (1) la localisation des emplois, services, commerces, etc., (2) la distribution spatiale de la population selon son lieu de résidence et (3) les infrastructures) sur les consommations d'énergie et les comportements de mobilité des ménages.

L'originalité principale de l'approche développée est d'aborder et de quantifier à la fois l'énergie nécessaire au chauffage des bâtiments, en phase d'utilisation et en cycle de vie, et celle relative aux déplacements des personnes en investiguant l'influence de la localisation résidentielle sur les déplacements domicile-travail et sur les déplacements scolaires, à l'échelle du quartier. Développer une approche spécifique aux territoires périurbains qui prenne en compte tant le secteur du bâtiment résidentiel que celui du transport des personnes semble en effet nécessaire pour faire évoluer les quartiers périurbains existants vers plus de durabilité et réduire leur vulnérabilité aux questions énergétiques, en particulier en ce qui concerne la dépendance à la voiture individuelle. L'échelle du quartier, enfin, n'a été que peu investiguée dans la littérature traitant tant du bâtiment que de la mobilité. Les recherches en termes d'efficacité énergétique du bâtiment ciblent soit

l'échelle très précise du bâtiment individuel, soit l'échelle large de la région, et ne permettent pas, à notre sens, de répondre aux enjeux locaux. La première approche peine à être reproductible tandis que la seconde est basée sur des hypothèses souvent très larges qui occultent de nombreux cas particuliers. En termes de mobilité également, les recherches traitent abondamment de la relation entre consommations d'énergie pour le transport et structure du territoire, en investiguant en particulier le rôle de la densité, à l'échelle macro, ce qui ne permet pas de rendre compte de l'impact de phénomènes plus fins, qui s'opèrent à l'échelle locale.

Comme tout travail scientifique, des limitations au champ de l'étude doivent être posées. (1) Les facteurs de type socio-économiques, bien qu'expliquant en partie les choix résidentiels des ménages pour les localisations périphériques et leurs habitudes de déplacement, sortent du cadre de l'analyse. Nous nous concentrerons sur l'impact des variables qui relèvent de la structure du territoire sur les consommations énergétiques des quartiers périurbains. (2) En termes de bâti et de forme urbaine, seuls les besoins en chauffage seront pris en considération de façon à mettre en évidence l'influence des indicateurs de type morphologique. Les autres postes énergétiques (eau chaude sanitaire, électricité, etc.) ne sont pas pris en compte car ils ne relèvent pas directement de la forme urbaine. (3) L'étalement urbain touche l'habitat mais aussi les entreprises, commerces, bureaux, équipements de loisirs, etc. Nous ne traiterons dans le cadre de cette thèse que de la périurbanisation de la fonction résidentielle. La périurbanisation des autres fonctions est par ailleurs catalysée par la périurbanisation résidentielle. (4) Enfin, le champ d'étude de la thèse se limite à la Wallonie (Belgique) dont le territoire connaît, depuis plusieurs décennies, des dynamiques de périurbanisation assez profondes (Teller, 2009). La question de la reproductibilité des méthodes et résultats proposés sera investiguée.

### 3. Structure de la thèse

La thèse poursuit un double objectif : (1) produire une instrumentation permettant d'évaluer les consommations énergétiques des quartiers périurbains en ce qui concerne le bâti et les déplacements des personnes et (2) identifier les stratégies à favoriser à l'avenir pour recycler les quartiers périurbains existants, tant en terme de mobilité que de forme urbaine. La question est d'abord de savoir si la périurbanisation est compatible avec un développement durable de nos territoires avant de statuer sur l'évolution de ces espaces déjà urbanisés.

Pour ce faire, la thèse propose d'abord un éclairage spécifique et technique sur l'étalement urbain, sa définition, ses causes, ses conséquences en mettant l'accent en particulier sur les spécificités du territoire wallon (**Chapitre II - L'Etalement Urbain**). Ce chapitre propose ensuite une définition de l'étalement urbain en Wallonie et une typologie de quartiers périurbains adaptées à des analyses de type morphologique.

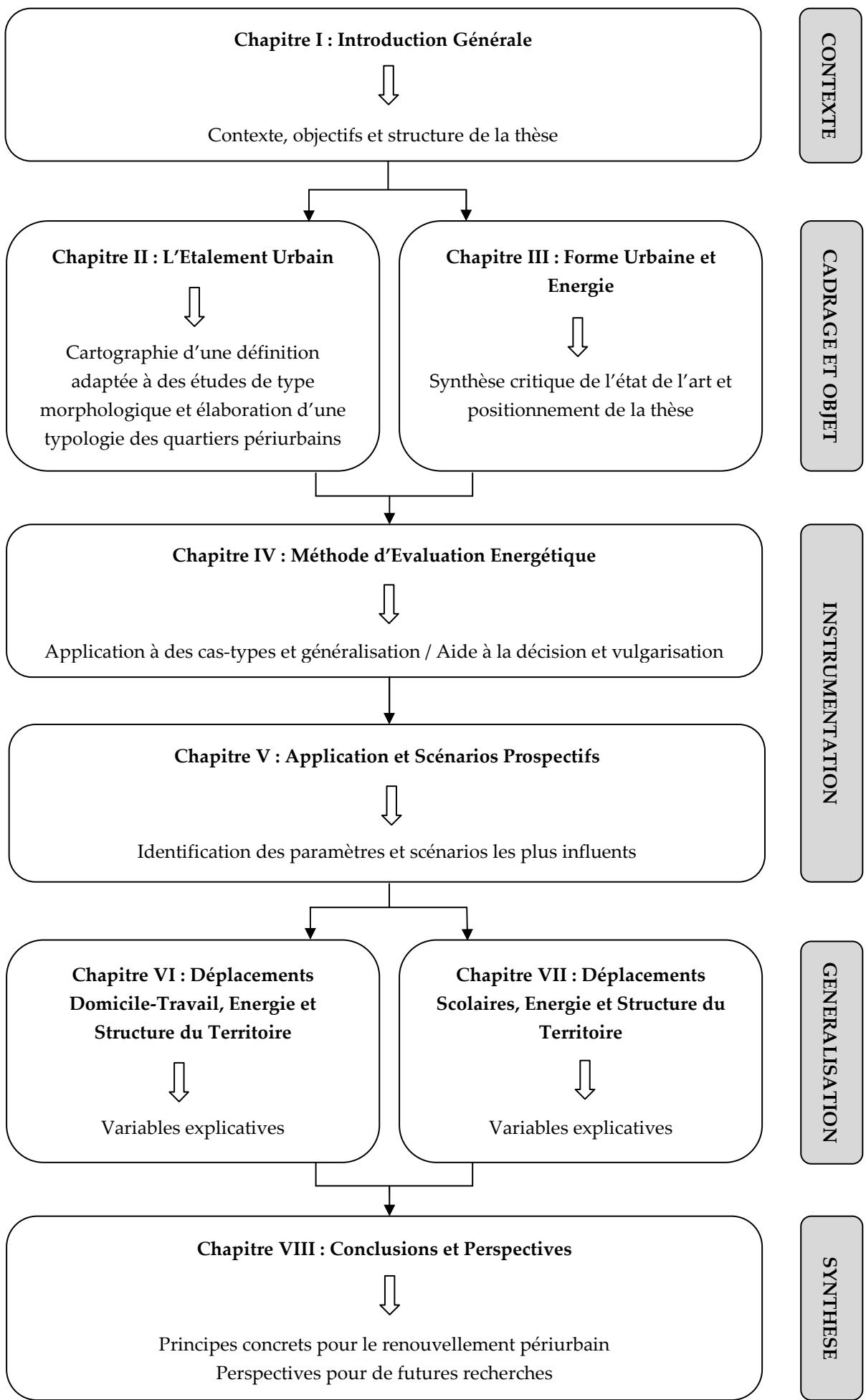
Le **Chapitre III (Energie et Forme Urbaine)** propose ensuite une analyse des relations entre forme urbaine et consommations d'énergie pour le bâtiment et le transport à travers une analyse de la littérature scientifique internationale relative à l'influence de la forme urbaine sur les consommations d'énergie dans les secteurs du bâtiment résidentiel et du transport des personnes. Une analyse des méthodes d'évaluation énergétique existantes complète l'approche développée dans ce chapitre qui se termine par le positionnement de notre approche et de ses spécificités.

Le **Chapitre IV (Méthode d'Evaluation Energétique)** porte sur le développement d'une méthode d'évaluation énergétique des quartiers périurbains. La méthode aborde à la fois les consommations d'énergie relatives aux bâtiments, en phase d'utilisation et en cycle de vie, et celles relatives à la mobilité en milieu périurbain dans le but d'en améliorer l'efficacité énergétique globale. Cette instrumentation a pour double objectif de servir les développements qui suivent et de constituer un outil de sensibilisation et de vulgarisation à destination des acteurs de l'aménagement du territoire.

A cet effet, une application sur quatre quartiers périurbains représentatifs est proposée dans le **Chapitre V (Applications et Scénarios Prospectifs)**. Des variations paramétriques des principales caractéristiques architecturales et urbaines des tissus périurbains sont menées afin d'identifier les paramètres les plus influents et la façon dont ils sont susceptibles de faire varier les consommations d'énergie. Sur cette base, plusieurs scénarios de renouvellement des tissus périurbains sont formalisés et évalués. La thèse se positionnant non pas sur la question de la ville compacte en tant que telle, mais sur la question du renouvellement périurbain, deux types de scénarios sont principalement investigués : la rénovation énergétique du bâti existant et la densification des quartiers, en lien avec la localisation des quartiers et l'impact en termes de génération de mobilité. La question de la démolition / reconstruction des quartiers est abordée succinctement d'un point de vue énergétique et mise en perspective avec des aspects plus sensibles qui modèrent son intérêt, en l'état actuel des connaissances.

La méthode d'évaluation développée dans le Chapitre IV est généralisée à l'ensemble du territoire périurbain wallon afin d'investiguer l'impact de la localisation résidentielle sur les déplacements domicile-travail (**Chapitre VI – Déplacements Domicile-Travail, Energie et Structure du Territoire**) et sur les déplacements scolaires (**Chapitre VII – Déplacements Scolaires, Energie et Structure du Territoire**). Il s'agit, dans ces deux chapitres, d'analyser les pratiques existantes en termes de déplacements domicile-travail et domicile-école pour en identifier les grandes tendances et interroger les relations entre compacité, mobilité quotidienne et consommation d'énergie pour le transport, à l'échelle locale.

Le dernier chapitre (**Chapitre VIII – Conclusions et Perspectives**) présente une synthèse critique des principaux résultats développés dans le cadre de la thèse et leurs incidences pratiques en termes de renouvellement périurbain, concept que nous tenterons d'opérationnaliser sur cette base. La reproductibilité de l'approche développée et les perspectives de recherches futures ouvertes par la thèse sont enfin proposées.



# Chapitre II

## L'Etalement Urbain

### 1. Introduction

La déconcentration des fonctions urbaines, principalement du logement et des activités économiques, hors des villes, est une réalité complexe et mal définie, qui touche nos territoires depuis plusieurs dizaines d'années. Elle marque une rupture franche et rapide avec la tradition de l'évolution des villes européennes. Ces espaces, dont les contours sont difficiles à définir, connaissent une multitude d'acceptations. Ils sont traditionnellement appréhendés de deux façons : via les modèles de ville ou de forme urbaine qui visent à caractériser le résultat de cette évolution ou via les processus territoriaux qui les ont engendrés. Dans la première catégorie, « *les différents néologismes qui sont apparus dans la littérature témoignent de l'existence de ces nouvelles formes urbaines. On parle ainsi de ville diffuse, ville étalée, ville émergente, ville aux champs, entre-ville. Autant de termes qui mettent en évidence le fait que l'opposition entre la ville et la campagne s'est estompée et qu'elle a été remplacée par un continuum urbain-rural*

En ce qui concerne les processus, de nombreux termes sont également apparus dans la littérature francophone pour tenter de désigner cette évolution. Le SDER<sup>1</sup> les regroupe grossièrement en 3 catégories, selon qu'ils mettent plutôt l'accent, de façon générale, sur la dissémination des fonctions et des populations dans l'espace (désurbanisation, urbanisation diffuse, dispersion de l'habitat, des fonctions), plus particulièrement sur l'extension diluée des villes (périurbanisation, suburbanisation, étalement urbain) ou plus particulièrement sur l'urbanisation diffuse de la campagne (rurbanisation, mitage de l'espace rural, éparpillement). D'autres auteurs distinguent la suburbanisation de la périurbanisation par le territoire qu'elles touchent et la période de temps considérée. Pour de Keersmaecker (2002a) par exemple, la suburbanisation concerne ainsi la première périphérie des villes, dans un processus continu. La périurbanisation est plus récente et est relative à des territoires plus éloignés, dans une logique discontinue. La rurbanisation

---

<sup>1</sup> Le Schéma de Développement de l'Espace Régional exprime les options d'aménagement et de développement pour l'ensemble du territoire wallon. C'est le seul document envisageant d'un seul tenant l'ensemble du territoire régional, consulté en ligne sur sder.wallonie.be, mars 2011.

enfin renvoie à un phénomène de dissémination de l'urbanisation, à grande distance de la ville. Pour Mangin (2004), si ces trois termes font florès dans la littérature, quelques définitions suffisent. Il définit le rurbain comme le grignotage de la campagne par la ville, le périurbain comme un ensemble de communes d'un seul tenant et sans enclave, constitué par un pôle urbain (définition proposée par l'INSEE<sup>2</sup>) et, le suburbain, comme un territoire qui permet à ses habitants d'éloigner leur lieu de résidence à bonne distance de la ville, grâce à l'automobile ou à des transports en commun efficaces (par exemple les cités-jardins, les villes nouvelles d'Angleterre ou de la Région parisienne, mais surtout les *suburbs* des Etats-Unis).

Dans la littérature anglo-saxonne, on retrouve le plus souvent les termes *sprawl* ou *urban sprawl* mais pas non plus de définition unanime. Pour Burgess (1998), Ewing (1994) ou Gordon and Richardson (1997), l'étalement (*sprawl*), dans la littérature anglo-saxonne, est un terme passe-partout qui signifie une série de choses différentes pour différentes catégories de personnes, avec toujours une connotation négative.

Ewing (1994) et Galster et al. (2000) avancent qu'une des difficultés à comprendre et définir l'étalement urbain réside dans le fait que ce phénomène est souvent appréhendé par une imbrication de ses causes (dépendance à la voiture, absence de planification), de ses caractéristiques (faible densité, monofonctionnalité) et de ses effets (pollution, congestion, ségrégation sociale). Le terme est utilisé à la fois pour décrire une forme de croissance des villes et pour qualifier les conséquences de cette croissance (*sprawling cities*). La définition de ces espaces périurbains est donc « flottante », « multi-facette » et varie selon l'aspect par lequel elle est abordée (sociologie, mobilité, démographie, biodiversité, etc.).

Dans le cadre de cette thèse qui traite de l'évaluation énergétique des quartiers périurbains et des conditions de leur renouvellement, nous adopterons le terme d'étalement urbain pour caractériser le processus de déconcentration de la fonction résidentielle hors des noyaux existants. Parmi la pléthore de définitions existantes, nous retiendrons particulièrement celle proposée par l'Agence Européenne pour l'Environnement (European Environment Agency, 2006) : p6, qui synthétise un ensemble de concepts relatifs à l'étalement urbain.

« *Urban sprawl is commonly used to describe physically expanding urban areas. The EEA has described sprawl as the physical pattern of low density expansion of large urban areas, under market conditions, mainly into the surroundings of agricultural areas. Sprawl is the leading edge of urban growth and implies little planning control of land subdivision. Development is patchy, scattered and stung out, with a tendency for discontinuity. It leapfrogs over areas, leaving agricultural enclaves. Sprawling cities are the opposite of compact cities – full of empty spaces that indicates the inefficiencies in development and highlight the consequences of uncontrolled growth<sup>3</sup>* »

---

<sup>2</sup> Institut national de la statistique et des études économiques en France.

<sup>3</sup> Traduction proposée : L'étalement urbain est couramment utilisé pour décrire l'étalement physique des aires urbaines. L'AEE a défini l'étalement comme le modèle physique d'étalement peu dense des aires urbaines, sous

L'Agence Européenne pour l'Environnement illustre ce propos avec une carte du Nord de la France, de la Belgique, du Luxembourg et de l'Est de l'Allemagne qui met en évidence le caractère peu dense et dispersé de ces territoires, à des distances parfois très importantes des centres-villes. Cette définition sera affinée et adaptée, tant au champ de recherche particulier qui nous occupe (l'efficacité énergétique du bâti et de la mobilité) qu'au territoire étudié (la Wallonie en Belgique).

Il s'agira d'abord d'identifier (Section 2) les grandes tendances, les causes, les caractéristiques et les conséquences de l'étalement urbain, en insistant particulièrement sur ses spécificités spatiales en Wallonie, sur base de la littérature existante puis d'étudier la façon dont la lutte contre l'étalement urbain est intégrée concrètement dans les documents d'orientation et les politiques en Wallonie.

Dans la suite de ce chapitre (Section 3), une définition de l'étalement urbain wallon adaptée à des études de type morphologique (efficacité énergétique du bâti, ensoleillement, etc.) sera proposée et spatialisée. Sur cette base, une typologie des quartiers et des logements périurbains wallons sera définie.

## 2. Grandes tendances en Wallonie<sup>4</sup>

### 2.1. Un phénomène de long terme toujours d'actualité.

S'il a connu son paroxysme dans la seconde moitié du 20<sup>ème</sup> siècle<sup>5</sup>, l'étalement urbain est un phénomène de long terme. Ploegaerts and Puttemans (1987) et Zitouni (2010) évoquent l'exode urbain des populations aisées de Bruxelles vers la périphérie et la suburbanisation de la ville, dès la fin du 19<sup>ème</sup> siècle, grâce à une croissance importante de la population, à la montée en puissance des théories hygiénistes et à une reconfiguration du régime urbain qui rompt l'ancienne ceinture de remparts de la ville. Aux Etats-Unis également, dès 1938, Buttenheim and Cornick (1938) affirment que la tendance consistant à allouer de plus en plus de terres à l'étalement illimité et désordonné des villes, transformant ainsi des

---

les conditions du marché et principalement dans le voisinage des zones agricoles. L'étalement implique peu de planification territoriale. Ce type de développement est fragmenté et dispersé, avec une tendance à la discontinuité. Il se répand au-delà des limites des zones urbaines, laissant ainsi des enclaves agricoles. Les villes étalées sont l'exact opposé des villes compactes, pleines d'espaces vides qui indiquent l'inefficacité de ce type de développement et met en évidence les conséquences d'une croissance incontrôlée.

<sup>4</sup> La Région wallonne de Belgique, ou Wallonie depuis 2010, couvre un territoire de 16.844 km<sup>2</sup> et compte 3.498.384 d'habitants (densité de population brute = 208 habitants/km<sup>2</sup>, chiffres du Service Public Fédéral Economie, PME, Classes Moyennes et Energie, au 1er janvier 2010, disponibles sur [stabel.fgov.be](http://stabel.fgov.be), consulté en mars 2012). Il s'agit de la partie sud du pays, d'expression majoritairement francophone. La Région de Bruxelles-Capitale (1.089.538 habitants pour 161 km<sup>2</sup>, soit 6.767 habitants/km<sup>2</sup>) est la plus grande agglomération du pays et est géographiquement localisée en Flandre (partie nord du pays, d'expression néerlandophone, 6.251.983 habitants pour 13.522 km<sup>2</sup>, soit 462 habitants/km<sup>2</sup>) même si elle entretient de solides relations avec la Wallonie. Les deux agglomérations wallonnes principales sont Liège (600.000 habitants) et Charleroi (400.000 habitants). D'autres villes régionales (d'ouest en est : Tournai, Mons, Namur, Huy, Verviers) sont localisées le long de l'ancien sillon industriel (industrie minière). Le reste de la région est composé d'une série de noyaux plus petits et de nombreux développements périurbains.

<sup>5</sup> La ville de Liège, par exemple, comptait 250.000 habitants en 1960 contre 190.000 en 2000

champs et forêts en rues mornes et rendant la campagne inaccessible aux citoyens les plus pauvres, gagne une reconnaissance croissante tant aux Etats-Unis qu'en Europe.

Les quelques<sup>6</sup> cités-jardins construites en Belgique durant les premières décennies du 20<sup>ème</sup> siècle relèvent dans une certaine mesure aussi de la périurbanisation de la fonction résidentielle en répondant à la volonté des urbains de fuir la ville industrielle sale et de se rapprocher de la nature. Né, d'une part, de la critique de la ville industrielle polluée et néfaste à l'épanouissement de ses habitants et, d'autre part, de la critique de la campagne trop éloignée des aménités, le modèle de la cité-jardin, conçu et théorisé en Angleterre par Ebenezer Howard dès 1898, avait pour ambition de créer, en bordure des villes, des cités idéales et communautaires d'environ 30.000 habitants. A terme, le modèle devait être reproduit pour constituer un réseau de cités reliées par des moyens de communication rapides et efficaces, chacune proposant une mixité fonctionnelle (habitat, travail, services, production agricole, loisirs) adéquate (Howard, 1946). Ce modèle fut importé en Belgique par des architectes modernistes qui développèrent, pour des sociétés coopératives et dans un contexte de manque criant de logements, des quartiers inspirés du modèle de la cité-jardin. Au contraire des préceptes édictés par Howard, ces cités restèrent des éléments isolés. Elles contiennent les germes du lotissement actuel, même si la cité-jardin est davantage caractérisée par la volonté d'avoir, à la fois, la campagne et ses avantages et la ville et ses services regroupés au sein d'une même cité (alors que le lotissement sera monofonctionnel).

La période de reconstruction et d'activités économiques et immobilières intenses, au lendemain de la seconde guerre mondiale, est marquée par l'apparition de nouveaux systèmes de financement, de nouvelles techniques de construction et par le développement de l'automobile qui jouent un rôle majeur dans les modes constructifs et les choix résidentiels. C'est la première vague de périurbanisation, particulièrement intensive, liée à la mobilité privée. Dès 1960, l'urbanisation diffuse touche ainsi l'ensemble du territoire : la ville décroît et la périphérie augmente. Cette dilution des espaces urbanisés ne suit plus le schéma radioconcentrique qui avait caractérisé les évolutions antérieures et concerne maintenant l'ensemble du territoire.

De 1971 à 1980, au niveau des zones urbaines, c'est en deuxième couronne qu'on retrouve le plus de logements datant de cette époque. Ces développements s'expliquent par l'augmentation de la mobilité des travailleurs, la volonté d'habiter dans des conditions de vie considérées comme meilleures par rapport aux villes et surtout une politique foncière accessible aux classes moins aisées. A cette époque (1974), paraît la première étude internationale traitant véritablement des impacts de l'étalement urbain, « *The cost of sprawl* », rédigée par the Real Estate Research Corporation, une agence nationale américaine traitant de l'environnement. En Wallonie, les développements périurbains

---

<sup>6</sup> Les exemples les plus connus de cités-jardins belges sont le Logis et Floréal à Watermael-Boitsfort, construites par Louis Van der Swaelmen et Jean-Jules Eggericx. Initierées au début des années 20, elles ont été construites par phases successives (jusque 1950) et sont aujourd'hui classées. D'autres cités-jardins ont été construites essentiellement en périphérie bruxelloise (par exemple la cité-jardin de Kapelleveld à Woluwé-Saint-Lambert (1926) ou la cité Bon-Air à Anderlecht (1923)). On remarque encore quelques exemples disséminés à travers la Belgique : la cité Batavia à Roulers, la cité Mallar à Verviers, etc.

datant de cette époque sont particulièrement importants en Brabant wallon et le long de l'axe de la périurbanisation de Bruxelles vers le Luxembourg qui brise alors la réalité de l'axe industriel wallon en son centre, au niveau de Namur (Kints, 2008). Dans les années 90 enfin, et si le phénomène est toujours d'actualité, on remarque que la périphérie augmente toujours, mais moins fortement que pendant les décennies précédentes alors que la population des villes stagne ou augmente un peu (c'est le cas à Namur notamment). L'étalement spatial de la périurbanisation s'amplifie toujours. A titre d'illustration, le Tableau II-1 présente l'augmentation des surfaces urbanisées pour la résidence de 1980 à 2009. La Figure II-1 cartographie l'évolution de l'occupation des sols à Liège de 1950 à 2010.

*Tableau II-1 : Utilisation du sol (en km<sup>2</sup> et évolution en %), de 1980 à 2009, pour les « terrains bâtis et terrains connexes » en haut(A) ; dont les « terrains résidentiels » en bas (B), sur base des chiffres du SPF Economie P.M.E, classes moyennes et Energie © economie.fgov.be/.*

	1980	1990	2000	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
<b>A</b>	4.344 km <sup>2</sup>	4.980 km <sup>2</sup>	5.640 km <sup>2</sup>	5.787 km <sup>2</sup>	5.830 km <sup>2</sup>	5.868 km <sup>2</sup>	5.912 km <sup>2</sup>	5.958 km <sup>2</sup>	6.004 km <sup>2</sup>	6.050 km <sup>2</sup>
	-	12,8%	11,7%	2,5%	0,7%	0,6%	0,7%	0,8%	0,8%	0,8%
<b>B</b>	1.526 km <sup>2</sup>	1.791 km <sup>2</sup>	2.221 km <sup>2</sup>	2.322 km <sup>2</sup>	2.351 km <sup>2</sup>	2.379 km <sup>2</sup>	2.409 km <sup>2</sup>	2.439 km <sup>2</sup>	2.470 km <sup>2</sup>	2.501 km <sup>2</sup>
	-	14,8%	19,4%	4,3%	1,2%	1,2%	1,2%	1,2%	1,3%	1,2%

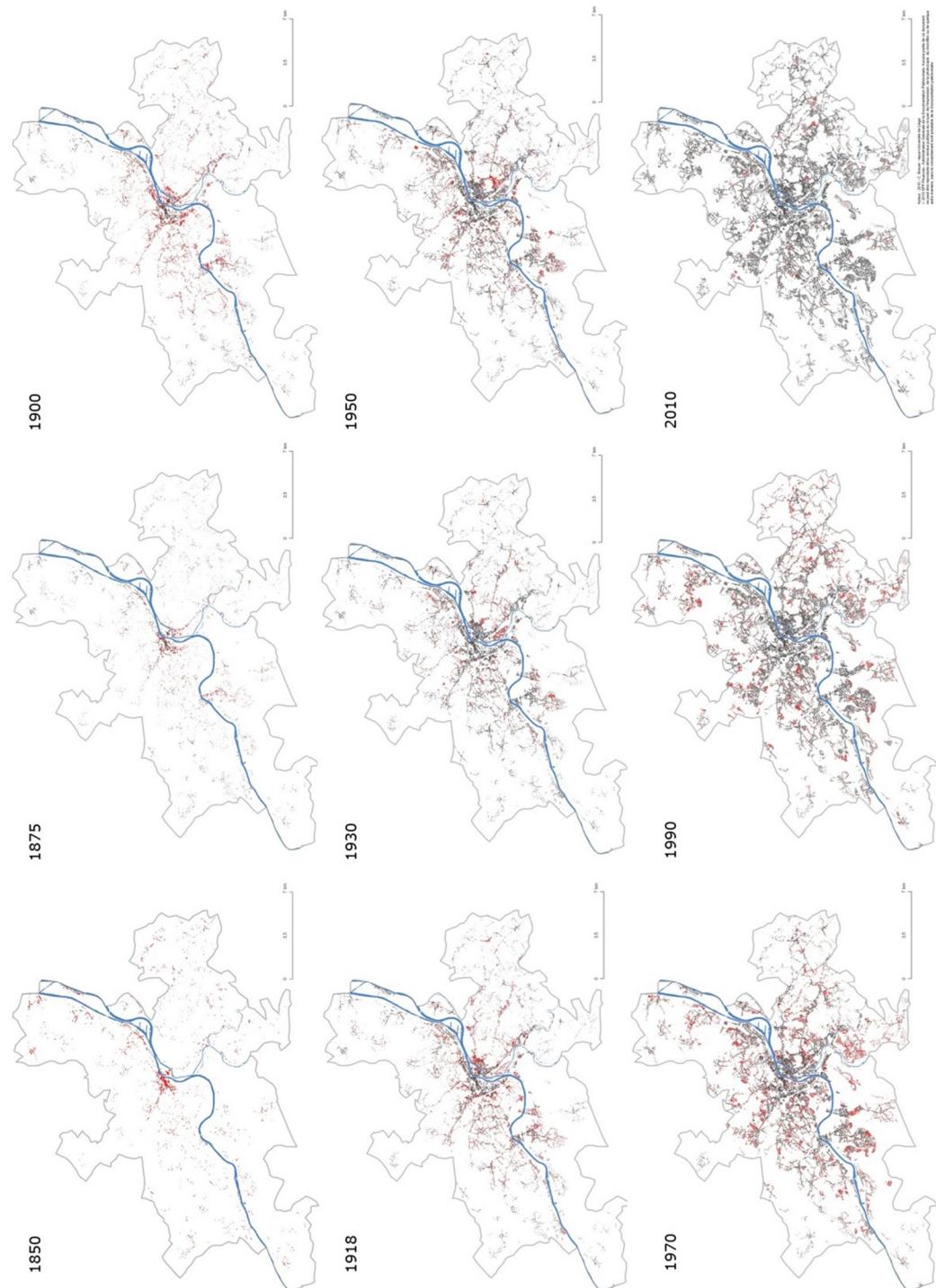


Figure II-1 : Evolution de l'urbanisation dans l'aire urbaine de Liège, de 1850 à 2010 ©Christophe Breuer, sur base de données 2010 du Service Public Fédéral - Finances.

## 2.2. Des causes multiples

L'essor de l'étalement urbain est traditionnellement attribué à un relâchement des contraintes de mobilité qui, en augmentant les territoires accessibles en voiture, a permis le développement de quartiers peu denses en discontinuité avec les noyaux existants. Mais si la mobilité est une condition nécessaire à la périurbanisation, elle n'est pas suffisante. Les évolutions sociétales et les préférences individuelles des ménages pour ce type de développement (accès à la propriété, habitat pavillonnaire, adaptation des normes de confort vers des logements plus spacieux, etc.) ont également participé à ce phénomène tout comme les politiques du logement et les réglementations en matière d'aménagement du territoire qui rendent possible, ou pas, la matérialisation de ces choix individuels. Enfin, le coût du foncier et les systèmes de taxation, en rendant souvent meilleur marché les localisations périphériques, participent également à l'essor de la périurbanisation. Ces éléments sont précisés dans les sous-sections suivantes.

### 2.2.1. Les contraintes de mobilité et le développement des infrastructures

Le relâchement des contraintes de mobilité, grâce aux transports en commun d'abord, à la voiture individuelle ensuite, apparaît comme l'élément déclenchant de l'étalement urbain, en rendant de nombreux terrains périphériques bon marché, autrefois difficilement accessibles, potentiellement urbanisables. Lusson (1997) avance que si la vitesse de déplacement est multipliée par 10, elle autorise des choix de localisation sur un territoire potentiellement centuplé, ce qui entraîne des surabondances foncières dans le sens où les possibilités d'occupation de l'espace excèdent largement les besoins des fonctions urbaines. Dans leur volonté de vivre sur les territoires les plus larges possible, les individus sont toutefois soumis à des contraintes. Zahavi (1976), au départ de données empiriques couvrant un panel très large de territoires (des villages africains aux villes américaines), a ainsi formulé une « loi de constance des budgets et des temps de transport » qui postule que, au-delà des fortes variabilités individuelles, les ensembles de population cherchent à maximiser les distances parcourues quotidiennement. Cet objectif de maximisation est limité par les temps de parcours et par les budgets financiers que les populations acceptent d'allouer au poste transport, selon les deux contraintes suivantes :

- Un temps de parcours de maximum 1 heure à 1h30 par jour.
- Une contrainte financière de maximum 15 à 20% du budget du ménage pour le poste transport.

La contrainte rencontrée en premier fixe ainsi le niveau de mobilité de l'individu ou du ménage. Des études plus récentes convergent également vers ces résultats (Fouchier, 1997, Newman and Kenworthy, 1996, Orfeuil, 1996). La variable « temps » est restée relativement constante au cours des années alors que la distance parcourue durant ce temps augmente, grâce à l'essor de la mobilité, d'une part, et au développement des infrastructures, ferroviaires puis routières, d'autre part. Créer ces infrastructures permet ainsi de gagner de l'espace plutôt que du temps, ce qui est un des facteurs explicatifs de l'étalement urbain.

On est ainsi passé, au cours du temps, de la « ville piétonne dense » à la « ville transports en commun » puis à la ville « voiture » (Newman and Kenworthy, 1996) (Figure II-2). La « ville piétonne », ou ville pré-industrielle, est très compacte et dense. Sa superficie est limitée et la densité de population très élevée. Elle est caractérisée par la juxtaposition des fonctions (résidence, travail, etc.) qui permet que tous les déplacements s'effectuent à pied, mode de transport dominant à cette époque.

La « ville transports en commun » marque un premier relâchement des contraintes de mobilité, grâce au développement du tramway et surtout du chemin de fer. Dès le 19<sup>ème</sup> siècle, l'état belge a favorisé le développement du transport par rail, tant en termes de constructions de nouvelles infrastructures qu'en termes d'avantages offerts aux navetteurs (notamment les abonnements ouvriers) (Grosjean, 2010). Ce développement du rail résidait, pour Loopmans et al. (2003), dans la volonté des pouvoirs publics (émanant à cette époque de la bourgeoisie et de l'église catholique) d'éviter la concentration trop importante de travailleurs dans les villes. Le premier chemin de fer à vapeur du continent européen est construit en Belgique (ligne Bruxelles-Malines) en 1835 (Ploegaerts and Puttemans, 1987). L'essor du chemin de fer et des tramways vicinaux, en augmentant la vitesse de déplacement, a favorisé un étalement urbain « décentralisé » autour des gares de banlieues et des lignes de tramway. La « ville transports en commun » marque une extension en étoile de la « ville piétonne » et constitue un modèle très répandu en Europe à cette époque. Elle est moins dense et se caractérise par une extension spatiale des territoires potentiellement urbanisables. La notion d'accessibilité change : basée sur la densité et la proximité spatiale dans le cas de la ville « piétonne », elle s'appuie, grâce au développement de modes de transport plus performants, sur la vitesse de déplacement.

La « ville voiture » enfin marque l'avènement de la périurbanisation peu dense. Son essor est intimement lié à la banalisation de la voiture individuelle, esquissée dès l'entre-deux-guerres mais véritablement popularisée après la fin de la seconde guerre mondiale, et au développement massif de l'équipement en infrastructures de transport individuel. Ainsi entre 1970 et 2002, le réseau routier belge a crû de 57,7% et la longueur du réseau routier a plus que doublé tandis que les autres moyens de transport (rail, navigation) voyaient leur niveau d'équipement diminuer (Dubois and Hanin, 2005). La Belgique a ainsi fait un choix clair en faveur de la mobilité « voiture » (Halleux et al., 2002a). On assiste ainsi à « *l'avènement d'un espace quasi isotrope où, à l'intérieur d'une enveloppe assez lâche, toutes les positions sont équivalentes et le statut des nœuds centraux est fortement remis en cause* » (Teller, 2009) : p 549. Ce deuxième relâchement des contraintes de mobilité est beaucoup plus puissant que le précédent (Halleux and Lambotte, 2006) et va engendrer une dissociation croissante entre lieu de résidence et lieu de travail mais également une évolution dans la façon de « faire » et de reconstruire la ville, en augmentant de façon exponentielle les terrains potentiellement accessibles. Jusqu'à la fin du 19<sup>ème</sup> siècle, on remarque une tradition européenne forte de reconstruction spontanée de la ville sur elle-même, par démolition / reconstruction du bâti, et dans une moindre mesure par la construction de bâtiments neufs en ordre continu, dans la continuité immédiate des noyaux existants. L'évolution de la forme de la ville sera marquée, dès l'avènement de la « ville transports en commun » par une plus grande dispersion spatiale, qui reste toutefois contrainte

autour de noeuds (les gares de banlieue) et de lignes de croissance (les lignes de tramway). La « ville voiture » rompt complètement avec cette tradition et se caractérise par une forte part de constructions neuves, en ordre discontinu, et en discontinuité avec les noyaux bâties existants. La mobilité individuelle devient à la fois un moteur et un facteur de l'étalement urbain (De Smet, 2012), dans un cercle vicieux qui renforce à la fois les développements peu denses et la motorisation de leurs habitants (Gilbert and Perl, 2008).

**Ville « piétonne » traditionnelle**

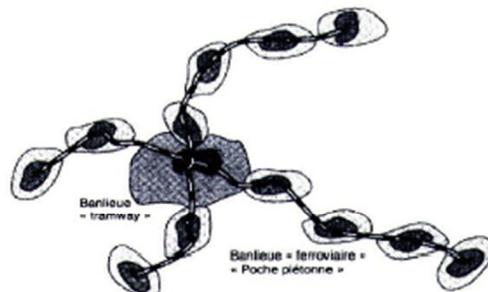
- haute densité
- multifonctionnalité
- structure organique



Sources : P.W.G. Newman et J.R. Kenworthy, 1996

**Ville « transports en commun »**

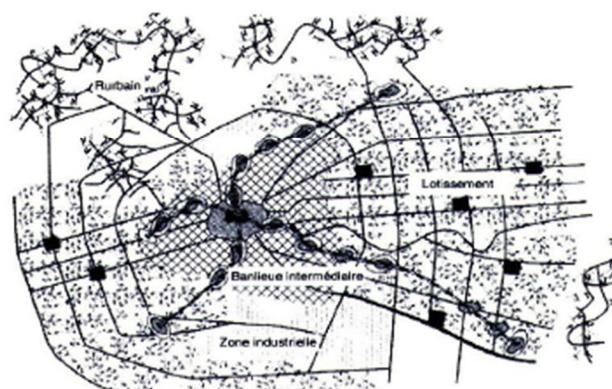
- densité moyenne
- multifonctionnalité
- forte centralisation



Sources : P.W.G. Newman et J.R. Kenworthy, 1996

**Ville « voiture »**

- faible densité
- monofonctionnalité et zonage
- faible centralisation



Sources : P.W.G. Newman et J.R. Kenworthy, 1996

Figure II-2 : La lecture associant vitesse de déplacement et organisation spatiale urbaine conduit à distinguer trois grands modèles urbains : la ville « piétonne » dense et compacte, la ville « transport en commun » et la ville « voiture » © Newman and Kenworthy (1996), traduit et adapté par Halleux and Lambotte (2006).

On remarquera enfin que les trois « âges de la ville » se sont succédés au cours du temps et coexistent maintenant, s'imbriquent pour former la ville d'aujourd'hui qui garde en mémoire les organisations spatiales qui s'y sont succédé. Fouchier (1997) pointe, par exemple, la coexistence, en Ile-de-France, de deux villes distinctes mais interpénétrées. La première est héritée de la ville dense et présente un tissu urbain compact, de nombreux équipements et de petits commerces. Elle s'appuie sur une proximité physique qui autorise l'usage des transports collectifs et de la marche à pied. La seconde est plus récente, peu dense, constituée de pavillons résidentiels et de zones d'activités, et vit essentiellement de l'automobile grâce à une proximité temporelle. C'est la mobilité qui distingue la ville dense de la ville non dense.

## 2.2.2. Les évolutions sociétales et les préférences des habitants

### *i. Les évolutions sociétales et l'inadéquation du parc de logements hérité*

Les évolutions sociales et sociétales ont favorisé la périurbanisation des ménages en créant une demande croissante en logements. On remarquera en particulier le vieillissement de la population et la diminution de la taille des ménages (augmentation des familles monoparentales, familles sans enfants). Le nombre de ménages a augmenté de 11,6% entre 1991 et 2001 et leur taille s'est réduite de 6,6% durant la même période (Cellule Etat de l'Environnement Wallon, 2007). La taille moyenne des ménages privés en Wallonie est passée de 2,49 personnes par ménage en 1991 à 2,30 personnes par ménage en 2008<sup>7</sup>. L'évolution des standards de confort (superficie bâtie plus grande, grand jardin, etc.) a par ailleurs créé une demande particulière pour des logements neufs plus grands et plus confortables et mis en exergue l'inadéquation du parc de logements hérité.

Chaque personne occupe ainsi de plus en plus d'espace puisque la taille des parcelles destinées au logement augmente alors que la taille des ménages diminue (Kints, 2008). La Belgique serait par ailleurs le second pays européen, après le Luxembourg, en termes de superficie utile par logement neuf (131,4m<sup>2</sup>) et en nombre moyen de pièces par logement (5,8 pièces) (Hoffner and Dol, 2000).

### *ii. La préférence des ménages pour le logement de type « 4 façades »*

La Wallonie, la Belgique et de nombreux pays européens de façon plus générale, se caractérisent par une forte aspiration à la maison individuelle. Diverses études, de Haumont et al. (1966)<sup>8</sup> à Pierson (2010) ont mis en évidence, la préférence d'un grand nombre de ménages pour un environnement « vert » peu dense et le rejet, dans un même mouvement de la ville dense. Aux Etats-Unis également, Gordon and Richardson (1997) et Berry and Okulicz-Kozaryn (2009) ont mis en évidence, sur base de l'analyse de plusieurs enquêtes empiriques, la préférence très forte des ménages pour les environnements résidentiels peu denses de type périurbain.

---

<sup>7</sup> Données relatives à la structure de la population selon les ménages (taille moyenne par année et par région), Service Public Fédéral Economie, PME, Classes moyennes et Energie, consultées, en mai 2012, sur Statbel.fgov.be/fr/statistiques/chiffres/population/structure/menages/taillemoyen/

<sup>8</sup> Cette étude concerne la France mais ces résultats sont transposables à la Wallonie.

Le rapport à la centralité et la spécialisation des territoires dépendent toutefois assez clairement des cycles de vie des populations qui les habitent. Les jeunes non fixés, débutant professionnellement, recherchent ainsi essentiellement la proximité des activités, des lieux culturels et de mouvements de la ville. Ils s'orientent, une fois leur famille en formation, vers des localisations périurbaines qui répondent alors à un besoin nouveau d'espace et de nature en offrant un voisinage assez homogène d'un point de vue social. Mais, il n'est pas rare, lorsque les enfants sont élevés, qu'ils quittent le domicile parental. Ces ménages vieillissants cherchent alors à retrouver un espace de centralité, notamment dans les villes petites ou moyennes. Savenberg and Van Hecke (1998), Van Hecke and Savenberg (2002) puis de Keersmaecker (2002b) ont ainsi mis en évidence, sur base de données de l'Institut National de Statistique, le caractère répulsif des grandes villes pour les ménages avec enfants, l'attrait, en particulier pour les séniors, des villes de moins de 50.000 habitants et la préférence nette des jeunes (15 à 29 ans) pour les villes.

Les préférences individuelles des ménages semblent également liées au statut social des personnes concernées. Si elles sont choisies dans le cas des ménages les plus favorisés, elles peuvent aussi être subies pour d'autres catégories de population.

On remarquera enfin que si l'étalement urbain en Wallonie est directement lié au développement des moyens de transport et des infrastructures, il est aussi intimement lié à l'impact du développement du parc automobile sur les modes de vie des ménages, qui ont accepté et favorisé une individualisation croissante des comportements de mobilité.

### *iii. Une forte tendance à l'accession à la propriété et à l'autopromotion*

Outre la forte aspiration à la maison individuelle mise en évidence dans la sous-section précédente, le contexte belge se caractérise également par une prégnance du droit de propriété. En 2006, 75,5% de la population belge est ainsi propriétaire de son logement<sup>9</sup>. Le ménage belge souhaite par ailleurs devenir maître d'ouvrage de son logement plutôt que d'acquérir un bien construit par un promoteur professionnel. Il fera appel soit à une entreprise générale de construction qui lui fournira un produit de type « clé-sur-porte », soit à un architecte qui coordonnera les différents corps de métier et lui fournira un produit a priori plus personnalisé. « *La filière de l'autopromotion est ainsi largement prédominante pour la construction de nouveaux logements unifamiliaux* » (Halleux and Lambotte, 2008) : p11. Une étude empirique récente confirme cette tendance (Pierson, 2010). Cette particularité se retrouve dans une moindre mesure dans d'autres pays européens (Autriche, Italie, France, Allemagne, etc.) mais pas aux Pays-Bas et au Royaume-Uni où les ménages acquièrent des logements déjà construits par des professionnels. L'Amérique du Nord et l'Australie présentent un taux d'autopromotion intermédiaire. A titre de comparaison, la part de l'autopromotion dans la production de nouveaux logements, pour les années 80, s'élève ainsi à 60% en Belgique contre 52% en France, seulement 10% aux Pays-Bas et 6% au Royaume Uni (Duncan and Rowe, 1993).

---

<sup>9</sup> Données relatives à la structure de la population, Service Public Fédéral Economie, PME, Classes moyennes et Energie, consultées, en mai 2012, [http://economie.fgov.be/fr/binaries/pr128\\_fr\\_tcm326-31933.pdf](http://economie.fgov.be/fr/binaries/pr128_fr_tcm326-31933.pdf)

Cette différence forte en termes de part de l'autopromotion pour la construction de nouveaux logements unifamiliaux entre, d'une part, la Belgique et la France et, d'autre part, les Pays-Bas et le Royaume-Uni, tient essentiellement aux modalités de planification foncière locales. Halleux (2005) explique ainsi que la maîtrise d'ouvrage des particuliers est souvent prédominante là où les futurs occupants peuvent aisément accéder aux terrains à bâtir (planification peu rigoureuse, beaucoup de disponibilités foncières par rapport au besoin<sup>10</sup>). Par contre, dans un contexte de planification foncière stricte, induite notamment par la rareté des disponibilités foncières juridiquement urbanisables, les professionnels sont plus enclins que les particuliers à lever les obstacles pour accéder au marché foncier et à intervenir en tant que maître d'ouvrage. Ils proposent alors un produit fini aux ménages qui n'ont que peu d'autres alternatives.

#### 2.2.3. Les réglementations et politiques qui rendent le phénomène possible

##### *i. L'aménagement du territoire*

On vient de le voir, la Belgique est caractérisée par une grande abondance des disponibilités foncières juridiquement urbanisables (zones d'habitat et zones d'habitat à caractère rural au plan de secteur). Brück (2002) a mis en évidence plusieurs causes à l'abondance des disponibilités foncières au plan de secteur : volonté de la puissance publique de favoriser l'accession à la propriété via une grande quantité de terrains disponibles qui maintiennent les prix abordables, lobby des propriétaires pour faire classer leurs terres en zone urbanisable plus rentable que la zone agricole, prévisions démographiques trop optimistes, absence, à cette époque, de considérations relatives aux aspects négatifs de l'étalement urbain, notamment en matière d'environnement, etc.

En plus de la grande générosité dont elle a fait preuve lors du classement des terres en zones urbanisables, la puissance publique n'a pas jugé utile de contrôler et concentrer les développements urbains en s'assurant que les terrains définis pour l'urbanisation soient effectivement mis en œuvre ou en forçant l'urbanisation prioritaire de certaines zones. Enfin, un des principes de base qui avait régi l'élaboration des plans de secteur n'a pas été suivi : les « zones d'extension d'habitat » qui étaient destinées à être préservées jusqu'à saturation des zones urbanisables ont très souvent fait l'objet de dérogation permettant leur urbanisation. Deux conséquences peuvent être mises en évidence : les promoteurs et les propriétaires ont une grande liberté dans le choix de localisation de leurs projets et certains propriétaires font jouer la rétention foncière dans un but de spéculation, en particulier dans les zones à forte pression (agglomérations, premières extensions). Il s'en suit un gaspillage de l'espace et une urbanisation extrêmement diffuse dans le sens où les promoteurs et propriétaires choisiront, à dessein ou par défaut, de bâtir dans des zones moins chères, éloignées des noyaux bâties existants. De plus, les promoteurs privés auront tendance, hors zones à forte pression foncière, à proposer sur le marché le bien le moins risqué, à savoir la parcelle de grande taille (Dubois and Halleux, 2003). Acosta (1994)

---

<sup>10</sup> Cette situation découle en grande partie de la façon dont ont été élaborés les Plans de Secteur en Belgique, voir sous-section 2.2.3.

résume cette situation en affirmant que le sol n'est pas considéré, en Belgique, comme un bien rare, ce qui peut engendrer une consommation excessive et un gaspillage de l'espace.

Cette faible propension de régulation de l'aménagement du territoire et de l'urbanisme est une autre spécificité du contexte belge. A l'inverse des Pays-Bas par exemple, où les ménages aspirent également à l'habitat unifamilial individuel, la Belgique n'a pas pu, ou pas voulu, via ses politiques d'aménagement du territoire, empêcher l'éparpillement spatial des nouvelles constructions. La production publique foncière néerlandaise, à l'opposé de la politique d'offre foncière wallonne, n'implique pas la nécessité d'une intervention privée lorsqu'il s'agit de transformer l'offre juridique potentielle<sup>11</sup> en offre effective<sup>12</sup>. Elle offre ainsi deux avantages : elle permet de collectiviser la rente d'urbanisation et, simultanément, de mieux contrôler la localisation des nouveaux développements (adéquation entre l'offre juridique potentielle et l'offre effective) (Halleux, 2008).

En termes d'évolution attendue, la situation créée par la surabondance foncière aux plans de secteur semble irrémédiable dans le sens où les plans de secteur, lors de leur élaboration, ont modifié la valeur foncière des terres. L'indemnisation des propriétaires lésés par un déclassement de leur bien de zone urbanisable à zone agricole ou verte semble énorme et compromet sérieusement toute tentative de révision du plan de secteur promouvant une utilisation plus parcimonieuse du sol.

### *ii. Les politiques du logement*

L'histoire de la politique du logement explique également la spécificité belge de l'autopromotion. Il existe, depuis les deux premières lois sur la politique du logement (1889 et 1892), une tradition forte de soutien à la propriété immobilière individuelle. La première loi avait pour but de lutter contre l'insalubrité des logements ouvriers en favorisant la construction de maisons ouvrières neuves, notamment par des coopératives, et la seconde prévoyait des allégements fiscaux et des taux préférentiels aux candidats bâtisseurs. Dans les faits, ces politiques n'ont surtout été favorables qu'à l'élite ouvrière<sup>13</sup>. En 1908, la loi est modifiée et supprime le lien entre octroi des avantages et statut du travailleur (ouvriers), au profit du prix d'achat de la maison. Elle devient ainsi une loi en faveur des petits propriétaires. D'autres outils ont ensuite permis à de « petits bourgeois » de placer leurs économies dans la construction d'immeubles de rapport, ce qui semble avoir retardé l'apparition du promoteur professionnel (Doucet, 1985).

Favoriser l'accès à la propriété était alors perçu à la fois comme un élément de « paix sociale » et comme un soutien à la croissance économique de type fordiste. Or, favoriser l'accès à la propriété à un grand nombre de ménages impose de pouvoir bénéficier de

---

<sup>11</sup> L'offre potentielle correspond à la totalité des biens fonciers existants, soit accessibles, soit juridiquement urbanisables, soit techniquement urbanisables, soit bâties HALLEUX, J.-M. 2008. Mobilité relâchée et surabondance foncière : pourquoi et comment gérer l'offre de manière parcimonieuse? In: MONTEVENTI WEBER, L., DESCHENEAUX, C. & TRANDA-PITTION, M. (eds.) *Campagne-ville. Le pas de deux. Enjeux et opportunités des recompositions territoriales*. Lausanne, Suisse: Presses polytechniques et universitaires romandes.

<sup>12</sup> L'offre effective correspond, à un moment déterminé, aux biens réellement disponibles sur le marché ibid.

<sup>13</sup> [www.swl.be](http://www.swl.be), consulté en mai 2012

nombreux terrains peu chers, et donc situés à des distances significatives des centres-villes à haute pression foncière. Comme nous l'avons montré plus haut, ces politiques d'incitation à la propriété n'ont pas été menées dans le cadre de politiques d'aménagement strictes visant à orienter la localisation des nouveaux développements résidentiels et ont directement favorisé l'étalement de la fonction résidentielle.

### *iii. Une fiscalité plus favorable au milieu périurbain*

En termes de fiscalité, on constate enfin que la taxation sur le patrimoine immobilier (via le revenu cadastral et la perception du précompte immobilier) est plutôt favorable aux ménages implantés en milieu périurbain. Pour des biens de même valeur vénale, le revenu cadastral est en effet plus élevé en milieu urbain car le calcul prend en compte la proximité des aménités et la disponibilité des transports en commun. Une bonne localisation en centre-ville, à proximité des services et des transports en commun, favorise les déplacements en transports en commun, à pied ou à vélo, là où une localisation plus excentrée n'offre que peu d'alternative à la voiture individuelle. La première est « pénalisée » via la perception annuelle d'un précompte immobilier plus élevé. Il s'agit d'une cause « perverse » dans le sens où seule une partie du coût est prise en compte lors de l'achat d'un bien (prix d'achat et taxe annuelle) et pas le coût, que l'on peut supposer croissant au vu de l'évolution du prix de l'énergie, induit par le choix d'une localisation excentrée, notamment en termes de déplacements quotidiens.

La fiscalité communale a également un rôle important dans la périurbanisation de la fonction résidentielle. Une part importante des rentrées d'argent au niveau communal, provient de la part locale de l'impôt sur les revenus des personnes physiques (taxe additionnelle sur l'IPP) (Teller, 2009). Ce système de fiscalité locale pousse les communes à attirer de nouveaux habitants, aisés de préférence, en permettant l'urbanisation de larges parcelles (Baudelle, 2010, Van Hecke and Savenberg, 2002). Cette « chasse à l'habitant » est particulièrement défavorable aux communes centrales qui présentent les atouts les plus faibles pour y concourir (environnement bâti dégradé, fiscalité importante, pression foncière excessive, etc.) (Dubois and Hanin, 2005).

Une autre part des rentrées d'argent provient de la taxe sur le patrimoine immobilier (centimes additionnels sur le précompte immobilier). Les constructions neuves ayant souvent une valeur moyenne plus élevée que les habitations existantes, et les transformations qui pourraient participer à la croissance de l'assiette d'imposition échappant souvent au contrôle de l'administration du cadastre, la part perçue par les contributions des centimes additionnels sur le précompte immobilier augmente également. Les responsables communaux sont ainsi plus enclins à œuvrer à l'urbanisation de leur territoire qu'à la rénovation ou l'adaptation du stock bâti existant comme vecteur privilégié permettant d'accroître les recettes fiscales sans rehausser les taux (Dubois and Hanin, 2005). Parmi les pistes de solutions proposées par ces auteurs, nous citerons la question de la supra-communalité qui, à l'image de certains projets français, permet, via la mise en commun d'une partie des recettes fiscales, aux autorités de penser plus librement l'aménagement de leur territoire et aux communes de retrouver une certaine autonomie de décision.

## 2.3. Des caractéristiques

En conséquence des éléments mis en évidence dans la section précédente, la périurbanisation en Wallonie est diffuse, peu dense et mono-fonctionnelle<sup>14</sup>. Ces caractéristiques sont explicitées ci-dessous et mises en perspective avec des territoires voisins.

### 2.3.1. La dispersion spatiale

La périurbanisation en Wallonie concerne des espaces éloignés des noyaux bâties existants contrairement, par exemple, à la Grande-Bretagne, où la tradition de maîtrise de l'étalement urbain est ancienne et profondément ancrée. Dans le sud de la Grande-Bretagne, pour une densité et une topographie similaires à la Wallonie, les développements immobiliers sont ainsi plus limités en campagne (Figure II-3). La volonté de contrôle des extensions urbaines, d'abord incarnée par les villes nouvelles et les ceintures vertes, ne s'est pas démentie depuis le début du 20<sup>ème</sup> siècle<sup>15</sup>. Les ceintures vertes en place autour des agglomérations occupent actuellement environ 13% du territoire de l'Angleterre. Elles abritent de nombreux villages et bourgs ruraux conservés dans leur état rural originel en raison des restrictions très sévères imposées à l'urbanisation. On peut remarquer que ces ceintures vertes portent quand même une ambiguïté. D'un côté, elles protègent contre l'étalement urbain et préparent les villages ruraux. Elles favorisent ainsi le renouvellement de la ville sur elle-même puisqu'il y a moins de disponibilités foncières en périphérie. D'un autre côté, elles sont utilisées par les « premiers arrivés » pour se protéger des nouveaux arrivants et les villages qui les constituent sont souvent des clos d'habitants très homogènes et privilégiés.

Aux Pays-Bas, la périurbanisation est plutôt marquée par une dispersion maîtrisée de l'habitat, qui, au contraire de la Wallonie, reste relativement concentrée autour de quelques villes moyennes (concentration dispersée). La limite entre zone urbanisable et zone non urbanisable est clairement définie. Le tissu périurbain flamand, enfin, est nettement plus dispersé qu'en Grande-Bretagne ou aux Pays-Bas mais reste plus dense qu'en Wallonie. Depuis maintenant quelques années, les autorités publiques flamandes mènent des politiques visant à limiter l'étalement urbain. Le Ruimtelijk Structuurplan Vlaanderen<sup>16</sup> prévoit ainsi de concentrer au minimum 60 % des nouveaux logements dans les espaces urbains et l'essentiel des 40 % restants au cœur des principales localités de l'espace périurbain et rural. Il propose aussi des normes minimales en matière de densité des lotissements qui limitent la taille des parcelles à 300 à 400m<sup>2</sup> en zone urbaine et 500 à 600m<sup>2</sup> en zone périurbaine ou rurale (Lambotte, 2010).

---

<sup>14</sup> Bien que l'étalement urbain touche également la fonction commerciale, l'éducation, etc., les quartiers périurbains résidentiels ne présentent pas de mixité fonctionnelle.

<sup>15</sup> La première « green belt », celle de Londres, date de 1938.

<sup>16</sup> Voir note de bas de page n° 17.

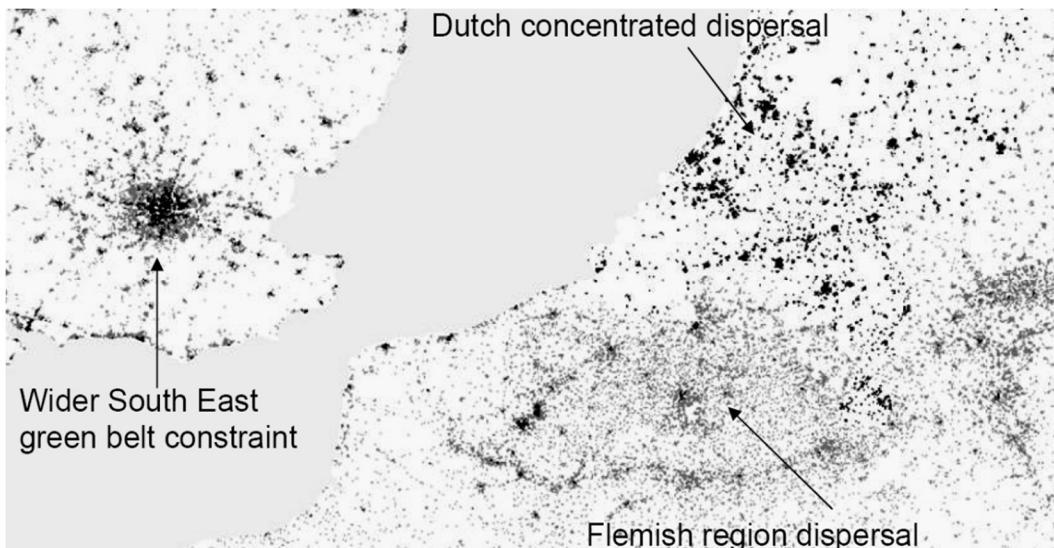


Figure II-3 : Etalement urbain en Angleterre, aux Pays-Bas et en Flandre ©(EPSRC, 2009).

### 2.3.2. Une faible densité

La périurbanisation en Wallonie est caractérisée par une densité faible. Les parcelles présentent de grandes superficies, que ce soit en ce qui concerne l'habitat comme en ce qui concerne les zones d'activités économiques. La superficie moyenne des terrains à bâtir, qui constitue un indicateur de l'évolution de la consommation de l'espace à des fins résidentielles, atteint environ 1.500m<sup>2</sup>, tant en 1990 qu'en 2004. Elle a eu tendance à croître, entre 1997 et 2001, pour atteindre une moyenne de 1.700m<sup>2</sup> (Figure II-4). On observe une amorce de décroissance à partir de 2002, qui pourrait s'expliquer entre autres par l'accroissement plus rapide du prix au m<sup>2</sup> (Cellule Etat de l'Environnement Wallon, 2007). La taille des parcelles s'élevait à 490m<sup>2</sup> en 1953 et à 1.230m<sup>2</sup> en 1970 pour les ventes de gré à gré. A titre de comparaison, la taille moyenne des parcelles aux Pays-Bas n'atteint que 400m<sup>2</sup>. Selon les chiffres de la Cellule Etat de l'Environnement Wallon (2007) toujours, en moins de 20 ans, la superficie totale des terres construites, des infrastructures et des équipements a ainsi augmenté de 18,2%. Alors que la superficie urbanisée s'élevait à 196.300 hectares en 1986 (soit 11,6% du territoire), elle atteignait 232.000 hectares en 2004 (13,7% de la superficie régionale). La progression de l'urbanisation s'opère non seulement par un étalement en « tache d'huile » mais aussi par la construction sur des terrains isolés de certains lotissements ou zones d'activités.

Les résidences (appartements, logements, fermes, garages et annexes, jardins et parcs) occupent la plus grande part des terres urbanisées. En 2004, la superficie couverte par les résidences occupait 106.600 hectares (soit 6,3% du territoire wallon), contre 85.000 hectares en 1986. Avec 26,5% de croissance, cette catégorie est celle qui a évolué le plus vite en une vingtaine d'années. L'ensemble des équipements publics (bâtiments scolaires, militaires, administratifs, hospitaliers et sociaux, églises, stations d'épuration, etc.) et infrastructures occupe presqu'autant d'espace que les résidences. De 1986 à 2004, la superficie occupée par les équipements publics est passée de 10.000 à 12.000 hectares et celle des infrastructures de transport de 83.000 à 87.000 hectares (soit une augmentation respective

de 23 et 4,3%). La croissance des infrastructures de transport a cependant ralenti depuis les années 90.

L'augmentation de la superficie urbanisée ne s'explique que très partiellement par la croissance de la population. Elle est plutôt liée à une plus grande consommation d'espace par personne, pour le logement, le commerce, le travail, etc. A titre d'exemple, la population wallonne a augmenté de 5,5% entre 1986 et 2004. Or, durant la même période, la superficie urbanisée est passée de 610m<sup>2</sup> à 680m<sup>2</sup> par personne, soit une augmentation de 11,5% (Dubois and Hanin, 2005).

La taille moyenne des terrains à bâtir diffère selon les sous-régions (Figure II-5). Les localités situées dans l'aire d'influence d'une ville importante subissent en général une pression foncière qui se traduit par une augmentation du prix au m<sup>2</sup> et donc une diminution de la taille des parcelles. Ainsi le Brabant Wallon, les Cantons de l'Est et la région d'Arlon connaissent une diminution de la taille des parcelles à bâtir due à la proximité, respectivement de Bruxelles, de l'Allemagne et du Luxembourg (Cellule Etat de l'Environnement Wallon, 2007). Les communes situées dans les agglomérations sont celles où l'urbanisation augmente le moins rapidement, avec une croissance comprise entre 10 et 20% (pour un total de +6.400 hectares) entre 1986 et 2004. Cet accroissement relativement faible s'explique par le volume moindre de terrains non bâtis disponibles en ville, et par leurs prix plus élevés, mais aussi par l'influence du modèle de la villa située dans une grande parcelle dans un environnement « vert » qui influence d'ailleurs de plus en plus l'implantation des entreprises. C'est dans le premier cercle autour des agglomérations, celui des communes de banlieue, que l'urbanisation progresse le plus avec une hausse de 20 à 30% (+8.100 ha). La grande banlieue, les petites villes et les communes rurales connaissent des évolutions comparables avec des taux d'urbanisation proches de 20% (+21.500 ha) (Cellule Etat de l'Environnement Wallon, 2007).

On remarque enfin une tendance récente au développement de logements collectifs périurbains qui prennent la forme de petits immeubles à appartements. Les blocages au recyclage morphologique en milieu urbain, mis en évidence par Halleux and Lambotte (2008), font que ce type de développement devient difficile et plus coûteux à réaliser en centre-ville. Les promoteurs préfèrent donc réaliser ces opérations en milieu périurbain. Cette tendance est essentiellement observée dans les périphéries de Bruxelles et de Liège. Si ces développements ont certains avantages (logements plus adaptés aux personnes seules ou âgées, etc.), leur intégration paysagère et la mobilité des nouveaux habitants devraient être sérieusement prises en compte lors du choix de leur localisation.

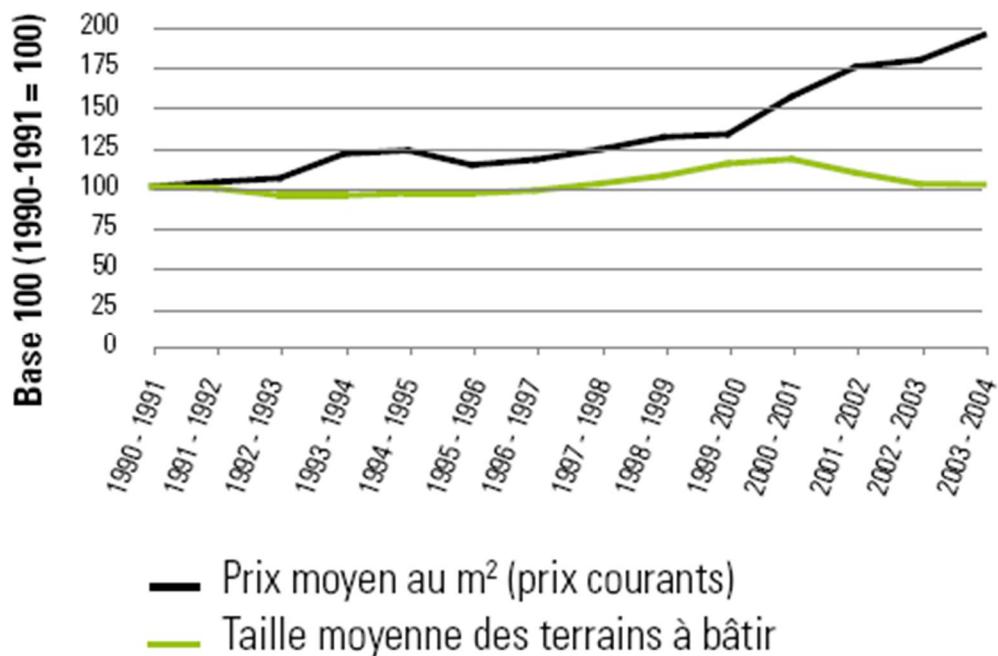


Figure II-4 : Evolution de la taille moyenne et du prix moyen au  $m^2$  des terrains à bâtrir vendus en Wallonie ©(Cellule Etat de l'Environnement Wallon, 2007).

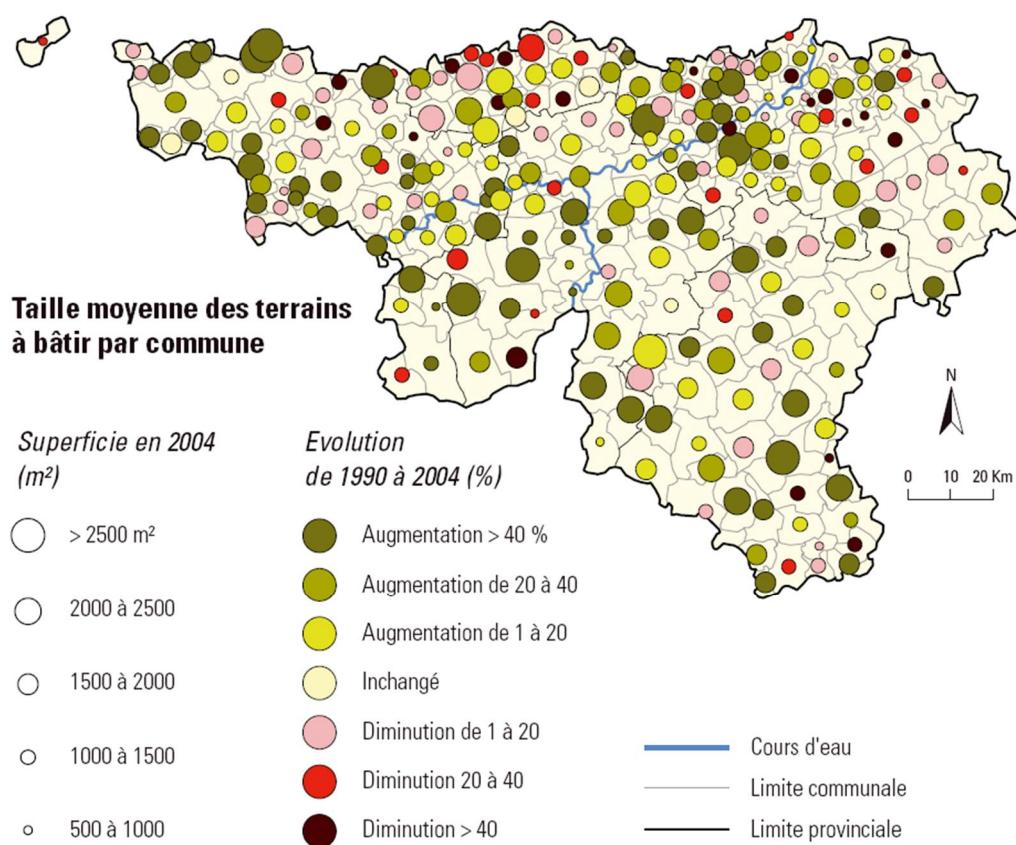


Figure II-5 : Taille moyenne des terrains à bâtrir par commune ©(Cellule Etat de l'Environnement Wallon, 2007).

### 2.3.3. La monofonctionnalité

La périurbanisation wallonne est monofonctionnelle et touche principalement le logement même si elle concerne aussi les activités économiques, culturelles, universitaires, de loisirs, etc. par opposition aux tissus centraux anciens qui mêlaient intimement logements, industries et autres fonctions. Pour Piron (2007), la périurbanisation des ménages est parfois elle-même liée à la périurbanisation des activités et des emplois puisque certains ménages déménagent en zone périurbaine pour se rapprocher du lieu de travail d'un des deux conjoints. Plus problématique, ces lotissements résidentiels monofonctionnels, qui constituent toujours la réponse idéale aux demandes de logement d'un grand nombre de ménages, démontrent, jusqu'à ce jour du moins, une véritable incapacité d'évolution vers une plus grande mixité du tissu (Mangin, 2004).

## 2.4. Des conséquences

### 2.4.1. La dépréciation des espaces centraux traditionnels

La périurbanisation en Wallonie est caractérisée par un double phénomène d'étalement spatial et de désurbanisation, ou dépression des espaces centraux traditionnels des centres-villes. Cette dépréciation est en partie due à la désindustrialisation, particulièrement criante dans l'ancien sillon minier, et aux nombreuses friches industrielles qu'elle a engendrées mais elle trouve aussi son origine dans la périurbanisation des ménages et des activités. Ce double mouvement est assez caractéristique de la Wallonie. En France par exemple, si on note également une tendance forte à l'étalement urbain, celui-ci ne se développe pas au détriment des espaces centraux qui restent habités majoritairement par des classes plutôt aisées. « *La situation des villes belges est en effet assez différente des villes françaises dans la mesure où on assiste à une inversion du gradient de pauvreté du centre vers la périphérie.* » (Teller, 2009) : p.552. La fuite des classes moyennes et aisées vers la périphérie a aussi amené une subdivision des logements unifamiliaux en petites cellules individuelles et la concentration, dans de nombreux quartiers de centre-ville, de ménages et d'individus à faible revenu.

### 2.4.2. Une source d'inégalités socio-spatiales

Le choix d'une localisation périurbaine, au-delà des préférences individuelles, découle d'un arbitrage « sous contraintes » (Kaufmann, 2002) entre coût de transport, temps de déplacement et prix foncier. Si les ménages sont, comme on l'a vu, désireux de s'établir en périphérie verte, ils sont contraints dans cette quête, par l'aspect financier. Une partie du territoire devient ainsi inaccessible financièrement pour les accédants à la propriété. La première couronne des grandes villes devient inabordable pour une partie des ménages qui doivent alors s'écartier encore des centres urbains où, suite au développement des bureaux, des commerces et des services, la rente foncière a augmenté, décourageant ainsi l'accès au logement sur ces territoires centraux. On remarque, de plus, que ce sont encore les populations les plus aisées qui réintègrent les quartiers centraux lorsque ceux-ci ont fait l'objet d'une rénovation ou d'une revitalisation. Cela conduit à augmenter la pression foncière et la crise du logement actuelle. Une partie de la population se voit donc

contrainte de vivre dans des petits logements en centre-ville, en location, ou de passer au-delà des premières couronnes, dans des zones souvent très mal desservies en transport en commun (Charmes, 2007). Compte tenu de leur éloignement des agglomérations et de la faible densité qui les caractérisent, il est extrêmement difficile d'y assurer une desserte correcte en transport en commun, ce qui constitue un deuxième type d'inégalités socio-spatiales. L'étalement urbain contribue à augmenter le nombre et la longueur des déplacements quotidiens mais aussi la dépendance à la voiture et aux carburants fossiles<sup>17</sup>, et ce d'autant plus que les emplois semblent être restés fortement concentrés dans les centres-ville, malgré quelques mouvements de délocalisation en périphérie (Decrop, 2002). L'évolution des modes de travail a également un rôle dans cette difficulté à desservir les quartiers périurbains : les horaires sont flexibles, certains lieux de travail sont décentralisés dans des zones d'activités de faible densité, les emplois à temps partiel se généralisent, etc.

L'étalement urbain tend ainsi à créer ou renforcer la concentration de classes sociales homogènes au sein de certains quartiers. Ce sont, par ailleurs, les ménages les plus favorisés qui sont les plus mobiles et donc, les plus aptes, par la conjonction d'une offre foncière étalée et de plus grandes capacités en termes de mobilité, à fuir les quartiers dégradés pour d'autres qui correspondent mieux à leurs attentes. En corollaire, la dépendance accrue aux énergies fossiles pour la mobilité et les prix fonciers dans les zones les plus accessibles et bien desservies en transports en commun risquent, à terme, de créer ce que Guilluy and Noyé (2004) nomment un « périurbain de relégation ».

Enfin, remarquons que pour Gordon and Richardson (1997), si les ménages les plus pauvres n'habitent pas dans un quartier résidentiel périurbain huppé, ce n'est pas à cause d'un zonage exclusif mais exactement pour la même raison que ces ménages ne peuvent rouler en Lexus ou en Mercedes : c'est parce qu'ils ne peuvent se le permettre financièrement.

#### 2.4.3. Les surcoûts de la désurbanisation

De nombreux auteurs s'accordent aujourd'hui à dire que l'étalement urbain coûte cher à la collectivité, en particulier en ce qui concerne les coûts de construction et d'entretien des réseaux (gaz, eau, électricité, téléphonie, etc.) et l'organisation des services (ramassage des ordures, distribution du courrier, etc.). La périurbanisation entraîne des coûts collectifs, c'est-à-dire des coûts supportés par l'intermédiaire des pouvoirs publics, qui ne profitent qu'à certains ménages privés qui tirent profit d'un environnement vert et peu dense (bénéfices privés) alors que les populations, souvent plus précarisées, du centre-ville financent en partie le bien-être de ces nantis de la périphérie : coûts des réseaux et de leur remplacement mais aussi perte d'espaces verts et agricoles, augmentation de la pollution atmosphérique, etc.

---

<sup>17</sup> Le taux de motorisation des ménages belges est, à titre d'exemple, passé de 40 voitures pour 1.000 habitants en 1950 à plus de 350 véhicules pour 1.000 habitants en 1985 DUBOIS, O. & HANIN, Y. 2005. Centres et périphéries : entre développement territorial soutenable et financement des collectivités locales. *Bulletin de documentation, Service Public Fédéral Finances*, 65, 87-106.

Halleux et al. (2002b) ont particulièrement étudié l'articulation entre désurbanisation et coût des services collectifs. Ils ont identifié trois types de surcoûts (un surcoût de faible densité, un surcoût de dispersion et un surcoût de faible planification) induits par la désurbanisation, par comparaison avec des développements plus compacts. Dubois and Hanin (2005) ont, par ailleurs, mis en évidence que le niveau des dépenses est systématiquement plus élevé en agglomération même si certaines communes périphériques peuvent présenter des valeurs élevées. Ils expliquent ces écarts par deux éléments principaux : des besoins de gestion plus élevés dans les agglomérations (notamment en raison de la densité plus élevée, du niveau de précarité plus élevé et de la vétusté du milieu bâti) et le rôle polarisant joué par les agglomérations (concentration de lieux d'emplois, d'activités culturelles, etc.). Les charges liées à ces « externalités » sont financièrement supportées par les citoyens du centre au bénéfice partiel de ceux de la périphérie, même si, toujours selon Dubois and Hanin (2005), les différences mentionnées peuvent être prises en charge, en partie ou totalement, par des transferts provenant des entités supérieures, par des subsides ou des dotations (notamment le fonds des communes).

#### 2.4.4. La banalisation des formes produites

De façon plus qualitative, on peut constater que la forte tendance à l'autopromotion, même si on y associe souvent des caractéristiques « d'authenticité » (Halleux, 2005), mène à une certaine banalisation des formes architecturales et urbaines produites car la conception des lotissements et des logements échappe le plus souvent aux urbanistes et architectes au profit de lotisseurs et promoteurs qui vendent leurs biens, certes personnalisables, sur catalogue. Le modèle de la « fermette 4 façades » n'est que très peu décliné en styles différents et s'implante souvent indifféremment du terrain, de son orientation ou des paysages environnants. Contrairement aux expériences et réalisations qui, de Thomas More au Congrès International d'Architecture Moderne (CIAM), se sont succédées dans l'histoire de l'urbanisme avec en filigrane la quête de la « cité idéale », le modèle périurbain ne se reconnaît aucun théoricien ni concepteur (Dias et al., 2008).

#### 2.4.5. Des conséquences non compatibles avec les principes du développement durable

L'étalement urbain, par ses causes et ses conséquences, présente un certain nombre d'éléments en rupture avec les principes du développement durable, en particulier en ce qui concerne son volet environnemental. La forte dépendance à l'automobile induite par l'étalement urbain n'est pas favorable à la diminution de la consommation d'énergie liée aux transports, ni à celles des pollutions atmosphériques et de l'effet de serre qui y sont liées. Ce type de développement monofonctionnel et peu dense entraîne également une consommation d'énergie accrue pour le chauffage de bâtiments périurbains car, à niveau d'isolation égale, une habitation de type « 4 façades » consomme plus d'énergie que d'autres formes urbaines plus compactes. Parmi les autres conséquences environnementales directes ou indirectes des développements périurbains, on peut citer une occupation irréversible et une imperméabilisation croissante des sols, une banalisation des paysages, un mitage des terres agricoles, etc. L'étalement urbain monofonctionnel et peu dense hors des limites de la ville traditionnelle engendre aussi

des conséquences socio-économiques problématiques : augmentation des coûts de la collectivité pour la gestion et l'entretien des réseaux et services, augmentation des tendances à la ségrégation sociale, « privatisation » de certaines parties du territoire qui deviennent inaccessibles à certaines catégories de la population, etc.

#### 2.4.6. Des avantages aussi

Comme nous venons de le montrer, il est généralement admis que l'étalement urbain impose des coûts économiques, sociaux et environnementaux importants. On parle le plus souvent des effets négatifs de l'étalement urbain, mais il y a aussi des éléments positifs à prendre en considération. Mentionnons que les études qui traitent de périurbanisation n'évaluent en général que les coûts de la désurbanisation et jamais les bénéfices qui sont, il est vrai, plus difficiles à quantifier.

L'impact de l'étalement urbain sur la biodiversité paraît, par exemple, relativement difficile à investiguer, faute de données chiffrées et d'inventaires. Certains auteurs mettent en avant la perte de biodiversité liée à la rupture des corridors et des zones écologiques continues par le développement de l'habitat alors que d'autres plaident pour un renforcement de la biodiversité par les cultures et plantes développées dans les jardins individuels. Dans la même veine<sup>18</sup>, une maison individuelle en zone périurbaine pourrait favoriser la culture potagère, plus difficile en ville, ce qui permet de diminuer les dépenses alimentaires, voire de dégager une marge pour la vente. En étendant le propos, certains prétendent que les territoires périurbains seraient plus résilients vis-à-vis d'une crise énergétique et permettraient à leurs habitants de vivre en autonomie de façon plus simple que les habitants du centre-ville. La maison individuelle avec jardin permet aussi à ceux qui ne disposent pas de moyens financiers pour partir en vacances (50% des ouvriers français) de profiter plus confortablement de la saison estivale qu'en appartement (Piron, 2007). En termes de déplacements, Gordon and Richardson (1997) avancent que la périurbanisation des entreprises, qui ont suivi les ménages, permet de réduire les distances domicile-travail et ainsi la congestion en détournant une partie du trafic des routes principales menant aux noyaux urbains vers des routes secondaires moins encombrées.

Les sciences économiques tendent également à mettre en avant les avantages de l'étalement urbain qui permet aux ménages d'acquérir plus de terrain à moindre prix et de rencontrer les besoins des entreprises qui ont besoin de plus d'espace que ne peuvent leur en offrir les localisations centrales. L'étalement urbain offre ainsi un plus large éventail de possibilités aux ménages et aux firmes (Kahn, 2006). Ces développements répondent aussi à une demande sociale. Le quartier résidentiel à faible densité est une forme urbaine recherchée par les ménages.

---

<sup>18</sup> Il s'agit ici de propos relatés par des acteurs non « scientifiques » qui ne sont étayés d'aucune base objective. Ils émanent notamment de David Holmgren, père de la permaculture et auteur du documentaire « Endurance of suburbia ». Il compare notamment la densité de zones agricoles auto-suffisantes au Vietnam avec la densité des banlieues australiennes pour expliciter son propos.

Enfin, le gisement solaire disponible, valorisable soit par des principes d'architecture bioclimatique, soit via l'exploitation d'énergies renouvelables basées sur l'énergie solaire, semble plus important en milieu périurbain car les obstructions potentielles sont nettement plus faibles qu'en milieu urbain dense. On remarquera enfin que les impacts, notamment environnementaux, de l'étalement urbain sont essentiellement externalisés, peu visibles et concernent surtout le long terme alors que les bénéfices présentés (qualité de vie, présence d'un jardin, etc.) sont immédiats.

## 2.5. Des interrogations

De l'état de l'art relatif à l'étalement urbain et à ses caractéristiques en Wallonie se dégagent à notre sens trois interrogations majeures relatives au renouvellement durable des quartiers périurbains. Elles constitueront le fil rouge des développements proposés dans cette thèse.

### 2.5.1. Le vieillissement des espaces déjà urbanisés et leur capacité d'évolution

Les quartiers périurbains sont relativement récents puisqu'ils datent pour la plupart de la seconde moitié du 20<sup>eme</sup> siècle. La question du « vieillissement » de ces quartiers commence à se poser et devrait entraîner des coûts importants, notamment en termes de remplacement des réseaux, de régénération du bâti pour satisfaire à des standards énergétiques plus élevés ou à de nouvelles réalités sociales (ménages plus petits, population plus âgée, etc.). L'étalement urbain semble, par ailleurs, largement irréversible, très peu de sols artificialisés ayant, à l'heure actuelle, pu être reconquis.

### 2.5.2. La pérennité du modèle dans l'optique d'une crise énergétique majeure

L'évolution des espaces périurbains et de leurs populations dans le cadre d'une crise énergétique majeure susceptible d'affecter de façon significative le coût de l'énergie (et notamment le coût des carburants) pose question, notamment sur la façon de garantir un accès aux services et emplois aux segments de population les plus vulnérables (personnes âgées ou précarisées) qui sont par nature les moins mobiles. L'aptitude à la mobilité est en effet une condition nécessaire à l'accès aux emplois et services pour les habitants de zones peu denses résidentielles puisque ce modèle de développement est basé sur la capacité des ménages à se déplacer rapidement, individuellement et sur de grandes distances. Cette dépendance risque d'entraîner une précarité et un isolement accrus de certains segments de population.

### 2.5.3. La perpétuation du modèle périurbain

Enfin, si la question du renouvellement des quartiers existants est un challenge important, il convient également de se positionner, au terme de cette thèse, sur la perpétuation de ce modèle peu dense, monofonctionnel et dépendant de l'automobile, et ce même si les standards de construction actuels sont plus sévères depuis l'introduction de la Directive

PEB et son renforcement progressif<sup>19</sup>. Cette question est également importante dans un contexte plus large puisque l'étalement urbain a maintenant tendance à se répandre dans de nombreuses régions du monde (voir par exemple da Silva et al. (2007) au Brésil, Nesamani (2010) en Inde ou Yaping and Min (2009) en Chine).

## 2.6. Des documents d'orientation et des politiques sectorielles

### 2.6.1. En matière d'aménagement du territoire et d'utilisation des sols

Terre d'industrialisation précoce, la Wallonie a subi de plein fouet le déclin industriel amorcé dans les années 50 et 60, puis les effets néfastes de la politique de désurbanisation pratiquée dans les années 60 et 70 et la récession économique des années 70 à 80. Les villes wallonnes, plus particulièrement celles situées dans l'ancien sillon industriel, souffrent ainsi depuis plusieurs décennies de phénomènes de déstructuration du tissu, de la présence de chancres industriels ou de la paupérisation de certains quartiers centraux. Plusieurs politiques de requalification et de renouvellement urbains ont bien été mises en place dans les années 60 pour favoriser le renouvellement des centres-villes. Les premières opérations furent pratiquées dans l'esprit du tout à l'automobile (les grandes percées pour amener l'autoroute au cœur des villes marquent ainsi une rupture assumée avec les typologies héritées) alors que les opérations menées dans les années 70 dénotent d'une attention plus marquée pour le patrimoine et les considérations sociales, encouragées par la mobilisation croissante des associations environnementales. La politique de rénovation urbaine de la Wallonie voit le jour dans ce contexte et vise à maintenir l'âme et la structure de quartiers centraux déshérités, en améliorant l'attractivité des centres urbains et en leur redonnant une dynamique sociale et économique.

La revitalisation urbaine est plus récente puisqu'elle n'apparaît qu'au début des années nonante et instaure la notion de partenariat public-privé (PPP), considéré comme un élément important pour le redéploiement des noyaux urbains, auquel les communes et, de manière plus générale, les autorités publiques, ne peuvent plus faire face seules, sans intervention financière du privé. Cette revitalisation est pratiquée dans une optique de retour en ville puisque la Wallonie prend à sa charge, moyennant l'existence d'une convention avec un ou des opérateurs privés, la réalisation des voiries et des espaces publics (alors que ces postes sont plutôt délégués au promoteur via le mécanisme des « charges d'urbanisme » dans les projets périphériques). Plus récemment, les différentes procédures de réhabilitation des friches industrielles et le remembrement urbain sont venus compléter l'arsenal wallon des outils visant à favoriser les investissements en centre urbain, en jouant sur la simplification administrative et la réduction des délais.

---

<sup>19</sup> La révision de la Directive PEB (adoptée par le Parlement Européen en mai 2010) prévoit d'imposer le standard « zéro énergie » pour les bâtiments publics construits à partir de 2018 et pour tous les bâtiments construits en Europe à partir de 2020.

L'objectif principal de ces différentes politiques est d'inciter les communes à planifier des développements suffisamment attractifs pour inciter les opérateurs privés<sup>20</sup> à investir des capitaux en milieu urbain et donc, en corollaire, tenter de freiner le phénomène d'étalement urbain. La Région ne s'est toutefois dotée, à ce jour, d'aucun outil concret permettant de réellement contraindre les développements périurbains (par exemple en réduisant l'offre foncière ou la superficie des parcelles) qui restent donc attractifs à de nombreux points de vue. Halleux (2008) cite ainsi un certain nombre de raisons qui poussent les investisseurs à préférer la périphérie plutôt que les centres urbains. Ces blocages au recyclage morphologique sont liés à l'acquisition foncière, aux surcoûts techniques, à la délivrance des autorisations ou encore à l'obtention de financements. Il est ainsi souvent plus facile et plus rentable pour un promoteur de construire du logement neuf en périphérie plutôt qu'en milieu urbain. Ces freins au renouvellement urbain favorisent donc à la fois la dépréciation des centres-villes et l'exode urbain des ménages.

Dans ses documents principaux d'orientation (l'article 1 du CWATUPE<sup>21</sup> en particulier), la Wallonie prône pourtant « *l'utilisation parcimonieuse du sol et de ses ressources, par la performance énergétique de l'urbanisation et des bâtiments, et par la conservation et le développement du patrimoine culturel, naturel et paysager* ». La désurbanisation a fait également l'objet d'attentions dans le SDEC<sup>22</sup> et le SDER<sup>23</sup> qui affirment clairement la volonté de revoir le schéma extensif qui s'est imposé durant un demi-siècle en imposant le modèle de la « ville compacte » (Dubois and Hanin, 2005). On retrouve ainsi dans le SDER des intentions visant à « *renforcer la centralité* », à « *densifier l'urbanisation* », à « *éviter la dispersion de l'habitat* », à « *gérer avec parcimonie le territoire régional* ». La déclaration de politique régionale pour la législature 2009-2014 prévoit également une amplification de la politique de reconstruction de « la ville sur la ville » et l'exploitation des potentialités des zones urbanisées existantes prioritairement aux nouvelles terres (point relatif au « territoire wallon : un atout à mobiliser »)<sup>24</sup>. Il faudrait ainsi « *densifier au maximum les zones habitables en les développant dans, et le plus près possible, des centres de villes* ». La

---

<sup>20</sup> Si on cherche à mieux localiser les nouveaux projets immobiliers, l'intervention des particuliers ne suffira pas (tendance à favoriser financièrement les particuliers avec des aides, etc.) et c'est l'action des promoteurs professionnels qui permettra de bien « territorialiser » les investissements. Si on tient à recycler la ville et à limiter la désurbanisation, c'est donc aussi l'action de ces opérateurs qu'il faut piloter. HALLEUX, J.-M. & LAMBOTTE, J.-M. 2008. Reconstruire la Ville sur la Ville. Le Recyclage Morphologique et le Renouvellement des Espaces Dégradés. Territoire(s) Wallon(s), 2, 7-22..

<sup>21</sup> Le Code Wallon de l'Aménagement du Territoire, de l'Urbanisme, du Patrimoine et de l'Energie (CWATUPE) comprend l'ensemble des dispositions applicables en Wallonie dans les domaines précités. S'il fixe brièvement les objectifs de l'aménagement du territoire, le CWATUPE traite surtout des procédures à respecter en matière d'aménagement et d'urbanisme, qu'il s'agisse d'adopter un plan ou de délivrer un permis. <http://www.iewonline.be>, consulté en novembre 2009.

<sup>22</sup> Le Schéma de Développement de l'Espace Communautaire (SDEC) vise à définir, à l'échelle de l'Union européenne, des objectifs politiques et des principes généraux de développement spatial en vue d'assurer un développement durable équilibré du territoire européen et respectueux de sa diversité. <http://europa.eu>, consulté en novembre 2009

<sup>23</sup> Le Schéma de Développement de l'Espace Régional (SDER) est un instrument de conception de l'aménagement du territoire wallon, transversal et évolutif. Il a pour but d'orienter les révisions des plans de secteur et de servir de référence pour les décisions concernant l'habitat, le cadre de vie, les déplacements, l'implantation des activités économiques, l'urbanisme, la conservation des milieux naturels, <http://www.sder.wallonie.be>, consulté en novembre 2009. Une actualisation du SDER est en cours.

<sup>24</sup> Déclaration de politique régionale 2009-2014, pt. 3.5. Le territoire wallon : un atout à mobiliser, p. 34.

déclaration prévoit également qu'il faut « *inciter les opérateurs de développement économique et commercial à recentrer leurs actions d'aménagement sur les noyaux urbains parfois délaissés au profit de projets périurbains* »<sup>25</sup> <sup>26</sup>. Dans ses lignes de force pour la politique d'aménagement du territoire pour le 21<sup>ème</sup> siècle, document qui vise à opérationnaliser les intentions synthétisées dans la déclaration de politique régionale, le Gouvernement wallon entend freiner l'étalement urbain en favorisant notamment la densification des noyaux d'habitat (qui devraient prochainement être définis et cartographiés). Enfin, les propositions d'objectifs pour l'actualisation du SDER, telles qu'approvées par le Gouvernement wallon en juin 2012, comprennent la création, par construction neuve, démolition/reconstruction de bâtiments anciens non adaptés<sup>27</sup> ou réhabilitation, de 350.000 logements à l'horizon 2040, dont 280.000 à localiser préférentiellement dans les territoires centraux en milieu urbain et rural (même si la définition même de ces territoires centraux n'est pas validée). Un des objectifs vise à maintenir l'identité des quartiers résidentiels, villages et hameaux situés hors territoires centraux en les complétant de logements de gabarit similaire à l'existant et en y prônant un mode d'urbanisation moins soutenu qu'à l'intérieur des territoires centraux en milieu urbain et rural.

Même si les documents d'orientation en matière d'aménagement du territoire wallon sont très clairs sur la volonté d'utiliser le sol de façon parcimonieuse, on ne note pour autant pas de politique publique pour lutter contre les blocages en centre-ville dont il est question plus haut et pour limiter de façon effective la périurbanisation. Certaines politiques sectorielles, en particulier celles relatives à la fiscalité dont il a été question ci-dessus, ont même tendance à œuvrer dans le sens inverse. La mise en œuvre concrète des principes généraux énoncés dans ces documents reste ainsi fort floue.

Plusieurs régions et pays européens ont pourtant réussi à mettre en place, parfois depuis de nombreuses années, des politiques et réglementations contraignantes visant à maîtriser l'étalement urbain. En Grande Bretagne, par exemple, le « Town and Country Planning Act » prévient, avec succès, la périurbanisation de plusieurs grandes villes, dès 1947. En Flandre, on note depuis quelque temps des politiques volontaristes pour tenter de contenir l'étalement urbain. Elles visent à la fois la rénovation urbaine et la planification plus durable du territoire. Le « Ruimtelijk Structuurplan Vlaanderen<sup>28</sup> » (sorte d'équivalent flamand du SDER wallon), adopté par le Gouvernement flamand en 1997, intègre ainsi les principes du développement durable dans ses objectifs et entend limiter la périurbanisation, notamment via la fixation d'un seuil de densité minimum pour les nouveaux quartiers (parcelles maximales de 4 ares par habitation urbaine et de 6,5 ares

---

<sup>25</sup> Déclaration de politique régionale 2009-2014, pt. 1.3. Valoriser l'espace disponible pour créer de l'activité économique, p. 51.

<sup>26</sup> Cet objectif est également mentionné dans le Plan Marshall 2. vert, dans son objectif « mobiliser le territoire ».

<sup>27</sup> Il est question d'atteindre un taux de démolition/reconstruction annuel du parc de logements de 0,20% (ce qui correspond à environ 3.500 logements par an) à partir de 2020 et de progressivement augmenter ce taux à 0,50% (soit 10.000 logements par an) à l'horizon 2040.

<sup>28</sup> Le Ruimtelijk Structuurplan Vlaanderen est, depuis 1997, le document-cadre qui régit l'aménagement du territoire en Flandre. Il vise à optimiser la qualité spatiale du territoire en protégeant les espaces libres et en revitalisant les villes. La vision proposée se développe en quatre axes : les zones urbaines, les zones périurbaines ou rurales, les zones économiques et les infrastructures. Traduit de <http://www.rsv.vlaanderen.be/nl/overRsv/>, consulté en mai 2012.

pour les autres). Ce document d'aménagement stratégique n'a pas de valeur légale mais le promoteur qui le respecte à plus de chance de voir son permis accordé par la commune. La conséquence directe est que la taille des parcelles diminue. Au vu des résultats, on voit donc que l'action de la puissance publique peut infléchir les évolutions. La Suisse, enfin, s'est fixé comme objectif stratégique la stabilisation de la surface d'urbanisation au niveau de 400m<sup>2</sup> par habitant, ce qui permettrait d'économiser, d'ici 2020, une surface d'environ 23.000 hectares par rapport à la poursuite de la tendance actuelle (Rey, 2007).

#### 2.6.2. En matière de transport et de mobilité

D'une façon générale, la gestion de la demande en transport des personnes est peu présente dans les objectifs politiques régionaux, fédéraux ou européens, l'accent étant davantage mis sur l'inter-modalité. Le livre blanc européen sur les transports, en 2001, recommande que la demande en transport des personnes soit découpée de la croissance économique, ce qui n'est pas vraiment le cas à l'heure actuelle en Wallonie. Les besoins en mobilité devraient par ailleurs idéalement être évalués en rapport avec la problématique de l'aménagement du territoire (recentrage de l'habitat et des activités en ville, mixité des fonctions, etc.). Le SDEC<sup>29</sup>, par exemple, s'inscrit dans cette logique en mentionnant, en page 24, que « *l'accessibilité a une influence notoire sur la qualité de vie, l'environnement et sur les performances économiques. Elle doit être favorisée par une politique de localisation coordonnée avec les plans d'occupation des sols et la planification des transports. Cela reviendrait à diminuer la dépendance à l'égard de la voiture individuelle et à promouvoir les modes de transport alternatifs (transports publics, vélos)* ». Le SDEC définit notamment les options politiques suivantes :

- « *La promotion d'une meilleure accessibilité dans les villes et dans les zones denses au moyen d'une politique de localisation et d'une planification de l'affectation des sols adéquates, qui favorisent la mixité des fonctions urbaines ainsi que l'usage des transports en commun* » (option 11, §88, p.25).
- « *Une meilleure articulation de la politique de développement spatial et de la planification de l'affectation du sol avec les planifications en matière de transports* » (option 30, §124, p.31).

Au niveau régional wallon, les relations entre aménagement du territoire et maîtrise de la mobilité sont abordées dans les principaux documents indicatifs. Le Plan de Mobilité et de Transport pour la Wallonie développe l'idée d'utiliser la politique d'aménagement pour limiter la demande de mobilité en s'inspirant directement des principes de la politique néerlandaise « ABC<sup>30</sup> ». Le SDER<sup>31</sup> et la dernière Déclaration de Politique Régionale du

---

<sup>29</sup> Le Schéma de Développement de l'Espace Communautaire (SDEC) vise à définir, à l'échelle de l'Union européenne, des objectifs politiques et des principes généraux de développement spatial en vue d'assurer un développement durable équilibré du territoire européen et respectueux de sa diversité. <http://europa.eu>, consulté en novembre 2009

<sup>30</sup> Il s'agit d'une politique de planification de l'urbanisme mise en place en 1988 aux Pays-Bas qui vise à promouvoir l'implantation des entreprises dans les localisations les plus adaptées à leurs besoins en transports. A cet effet, les zones urbaines sont réparties en 4 types de localisation (A, B, C ou Z) selon leur accessibilité.

<sup>31</sup> Le SDER stipule notamment que « pour éviter la dispersion de l'habitat et renforcer les villes et villages, il est nécessaire d'accroître la densité de l'urbanisation et particulièrement autour des lieux centraux : ceux-ci permettent en effet d'offrir une variété d'activités dans un espace restreint, facilitent l'organisation de services et moyens de transport performants, économisent l'espace et réduisent les coûts d'équipement », <http://www.sder.wallonie.be>, consulté en novembre 2009. Une actualisation du SDER est en cours.

Gouvernement wallon (2009-2014) mettent également l'accent sur la mobilité et l'aménagement du territoire en listant un certain nombre de grands principes généraux : « *freiner la dispersion des fonctions* », « *promouvoir l'habitat dans les noyaux d'habitat* », « *améliorer l'offre en transports en commun comme base d'une mobilité durable* », etc. Enfin, un des objectifs proposés pour l'actualisation du SDER (en cours) vise à développer des transports collectifs performants et à encourager un recours accru à la marche à pied et au vélo (30% de déplacements à pied d'ici 2020 dans les territoires centraux). Force est toutefois de constater que la concrétisation et la mise en œuvre de ces principes généraux sur le terrain restent fort vagues. Daxhelet et al. (2002) remarquent ainsi qu'en dehors d'un cercle restreint de spécialistes, la relation entre transport et urbanisme ne semble pas encore intégrée par l'ensemble des acteurs du territoire. Un travail de conscientisation du grand public, des décideurs locaux et du monde économique, à cet égard, est nécessaire, en particulier vers les acteurs qui prennent les décisions en matière de localisation des activités économiques (intercommunales de développement économique, par exemple). Par ailleurs, ces auteurs mentionnent également le manque concret d'outils pratiques (méthodes et documents) qui permettraient de déterminer les conséquences des projets d'implantation sur la demande de mobilité.

#### 2.6.3. En matière d'efficacité énergétique des quartiers et des bâtiments

Enfin, les réglementations et politiques concrètes visant à mettre en œuvre les objectifs d'efficacité énergétique avancés dans les différents documents d'orientation sont nettement plus nombreuses, mais elles ne traitent presqu'exclusivement que du bâtiment individuel, en construction neuve. Le premier règlement relatif à l'isolation thermique des bâtiments en Wallonie est ainsi entré en vigueur en 1985, dans la foulée des premières réflexions sur la performance énergétique des bâtiments qui font suite à la première crise pétrolière des années 70. Il impose, pour les nouveaux logements, un niveau d'isolation thermique global maximal  $K < K70$ . En 1996, un second règlement thermique wallon renforce la réglementation et exige :

- Pour le logement neuf :
  - Des valeurs de coefficient de transmission thermique  $U_{max}$  ( $W/m^2.K$ ) imposées pour les différents types de parois.
  - De ne pas dépasser un niveau d'isolation thermique global  $K < K55$  ou  $Be450$ .
  - De respecter la norme de ventilation NBN D50-00.
- Pour les rénovations de plus de  $1.000m^2$  avec permis d'urbanisme :
  - Des valeurs de coefficient de transmission thermique  $U_{max}$  ( $W/m^2.K$ ) imposées pour toutes les nouvelles parois de déperditions.
  - Des exigences pour la ventilation : conformité à la norme NBN D50-001 si changement d'affectation ou obligation d'insérer des ouvertures d'amenées d'air dans les châssis remplacés.

La Directive européenne sur la Performance Energétique des Bâtiments (DPEB 2002/91/CE) exige, dès 2002, des Etats Membres qu'ils appliquent des exigences minimales en matière de performance énergétique pour les bâtiments neufs et les rénovations de

plus de 1.000m<sup>2</sup> soumises à permis d'urbanisme, qu'ils veillent à la certification de la performance énergétique des bâtiments et qu'ils imposent l'inspection régulière des chaudières et systèmes de climatisation dans les bâtiments. Elle propose en outre une méthodologie commune de calcul de la performance énergétique intégrée des bâtiments. En Wallonie, la DPEB est transposée dans le Décret du 19/04/2007 intégré au CWATUPE<sup>32</sup>. Il comprend diverses définitions, décrit le champ d'application, la méthode de calcul, les exigences de la PEB, le certificat PEB, les sanctions, etc. Il est mis en application au travers de différents arrêtés du Gouvernement, accompagnés sur le terrain de formations et d'outils. L'entrée en vigueur des exigences de ce décret fut progressive :

- 01/09/08 : phase transitoire de la PEB avec passage de K<K55 à K<K45.
  - Pour les bâtiments neufs : K<K45, valeurs Umax et normes de ventilation.
  - Pour les bâtiments de plus de 1.000m<sup>2</sup> rénovés avec permis d'urbanisme : Umax et ventilation.
- 1/05/10 : application de la réglementation PEB, introduction d'indicateurs exprimés en litres de mazout par m<sup>2</sup> et par an.
  - Pour les bâtiments neufs : K<K45, Umax et Ew<sup>33</sup> <100, norme de ventilation, surchauffe, Ecar.ann.prim<sup>34</sup> <170 kWh/m<sup>2</sup>.an.
  - Pour les bâtiments de plus de 1.000 m<sup>2</sup> rénovés avec permis d'urbanisme<sup>35</sup> : Umax, ventilation.
  - Pour les changements d'affectation : Umax, K<K65, ventilation.
- 1/06/10 : démarrage de la certification énergétique progressive des bâtiments résidentiels existants pour les maisons unifamiliales mises en vente. Un an plus tard, le certificat est également obligatoire lors de la vente d'un appartement et lors du changement d'occupants des maisons unifamiliales et appartements.
- 1/09/11 : renforcement des exigences PEB
  - Ecar.ann.prim.<130 kWh/m<sup>2</sup>.an pour les bâtiments résidentiels.
- 1/06/12 : renforcement des exigences PEB
  - Renforcement des valeurs Umax et prise en compte obligatoire des nœuds constructifs.

Des contrôles devraient aussi être réalisés pour vérifier la bonne adéquation entre les résultats obtenus sur le terrain et les prévisions mentionnées dans le cahier des charges

---

<sup>32</sup> Le Code Wallon de l'Aménagement du Territoire, de l'Urbanisme, du Patrimoine et de l'Energie (CWATUPE) comprend l'ensemble des dispositions applicables en Wallonie dans les domaines précités. S'il fixe brièvement les objectifs de l'aménagement du territoire, le CWATUPE traite surtout des procédures à respecter en matière d'aménagement et d'urbanisme, qu'il s'agisse d'adopter un plan ou de délivrer un permis. <http://www.iewonline.be>, consulté en novembre 2009

<sup>33</sup> Niveau de consommation d'énergie primaire qui se calcule en multipliant par 100 le rapport entre consommation annuelle d'énergie primaire et consommation annuelle d'énergie primaire de référence. Le calcul intègre les caractéristiques de l'enveloppe, l'étanchéité, les équipements de chauffage, la ventilation, l'implantation, la compacité et l'orientation du bâtiment, les systèmes solaires passifs et actifs, l'éclairage, etc.

<sup>34</sup> Niveau de consommation caractéristique annuelle d'énergie primaire du bâtiment par m<sup>2</sup> de surface de plancher chauffé, en kWh/m<sup>2</sup>.an.

<sup>35</sup> La Commission européenne travaille actuellement sur la révision de la DPEB, les exigences en matière de rénovation des bâtiments existants devraient être renforcées.

lors de l'introduction d'une demande de permis. Si la Wallonie s'est dotée depuis plusieurs années d'outils réglementaires en matière de performance énergétique des bâtiments, en pratique la vérification du respect de ces exigences d'isolation et de ventilation par les communes est souvent sommaire, les contrôles sur chantier extrêmement rares, la poursuite des contrevenants presque inexiste. Un certain nombre de nouvelles constructions ne respecteraient donc pas les normes d'isolation en vigueur.

La DPEB est transposée et d'application depuis janvier 2007 en Région flamande et depuis juillet 2008 en Région Bruxelles-Capitale. La comparaison avec d'autres pays européens est plus complexe, en ce sens que les pays qui ont adopté une approche proactive en la matière travaillent déjà avec des consommations maximales exprimées en kWh/m<sup>2</sup>.an. Nous remarquerons toutefois l'initiative danoise, qui a imposé, lors de la transposition de la Directive européenne dans son cadre national, des impositions en matière de consommations d'énergie, également pour les bâtiments existants lorsqu'ils sont soumis à des travaux de rénovation (Tommerup and Svendsen, 2006).

Les objectifs de rénovation énergétique du parc existant ne sont, à l'heure actuelle, pas traduits dans des politiques d'action concrète même si de nombreuses primes à l'isolation individuelle sont disponibles en Wallonie. La politique énergétique évolue toutefois dans le sens d'une homogénéisation au niveau européen, grâce à l'implémentation de la DPEB. Sous l'impulsion de l'Union Européenne, les discussions en cours à l'heure actuelle devraient mener à renforcer les exigences tant pour les bâtiments neufs (qui devront respecter le standard « zéro énergie », en 2018, pour les bâtiments publics et, en 2020, pour tous les nouveaux bâtiments) que pour les rénovations soumises à permis d'urbanisme, quelle que soit la superficie des bâtiments concernés. Il y aura aussi une clause relative au «coût-efficacité». En prévision de l'implémentation de cette nouvelle directive, les Etats Membres sont invités à développer un plan d'actions concret dans les prochains mois. Ils disposent d'un cadre général fourni par l'Europe et doivent proposer une méthodologie concrète qui leur permettra d'atteindre les objectifs fixés.

On peut enfin remarquer, avec Reiter (2007), que les mesures techniques adoptées dans le cadre de ces différentes directives se limitent aux consommations d'énergie par m<sup>2</sup> bâti (augmentation du niveau réglementaire d'isolation des constructions neuves, etc.) mais ne permettent pas de diminuer les consommations de ressources imputables par personne, notamment en ce qui concerne l'utilisation du sol (parcelle mais aussi surface habitable plus grande dans une maison isolée que dans un immeuble collectif) ou les matériaux (une maison « 4 façades » nécessite plus de matériaux qu'une maison mitoyenne, etc.). Elles n'abordent pas non plus la localisation des nouveaux développements sur le territoire, au sein des zones urbanisables.

#### 2.6.4. Les incidences pratiques de ces politiques

Fraser and Maréchal (2003) remarquent que peu de quartiers ont pu être rénovés emblématiquement grâce aux différentes politiques de renouvellement urbain mises en place en Wallonie depuis les années 60. Les projets de rénovation à l'échelle des quartiers,

menés à l'initiative des pouvoirs publics, se concentrent exclusivement sur les logements sociaux, dont ils possèdent la maîtrise foncière et la propriété. Les interventions concernent essentiellement l'isolation de l'enveloppe des bâtiments et l'amélioration de la salubrité. Les expériences menées à l'échelle du quartier restent donc très peu nombreuses en Wallonie, en particulier en ce qui concerne la rénovation énergétique du stock bâti existant. D'une façon générale, si la qualité énergétique des bâtiments tend à s'améliorer en Wallonie comme en Europe, tant par l'introduction de réglementations plus strictes pour les nouvelles constructions que par la rénovation très progressive du stock bâti existant, les interventions sont le plus souvent menées ponctuellement à l'échelle individuelle par des particuliers qui profitent notamment des primes à l'isolation existantes. Seules quelques initiatives intéressantes ont vu le jour, à une échelle plus large que celle du logement individuel, en vue de favoriser, par exemple, les achats groupés et réduire les prix<sup>36</sup>.

### 3. Définition du champ de l'étude

Après avoir traité de l'étalement urbain sur les plans historique, urbain, social, économique, environnemental, il convient d'identifier et de spatialiser les territoires qui seront concernés par notre étude, c'est-à-dire identifier les quartiers wallons considérés comme périurbains dans le cadre de notre recherche. Pour ce faire, deux pistes ont été investiguées préalablement : les définitions spatiales de l'étalement urbain et les typologies de quartiers existantes. Nous positionnerons notre approche, en particulier en ce qui concerne l'échelle d'intervention et l'objet de notre étude, par rapport à ces définitions et proposerons, sur cette base, une typologie des quartiers périurbains wallons adaptée à des analyses de type morphologique (analyse des consommations énergétiques, analyse d'ensoleillement, etc.).

#### 3.1. Les définitions existantes

##### 3.1.1. La spatialisation de l'étalement urbain

Les deux sections précédentes ont mis l'accent sur la difficulté à définir l'étalement urbain. Il est protéiforme, à l'interface entre plusieurs domaines (mobilité, logement, agriculture, etc.), à la fois appréhendé par ses causes et par ses conséquences. Sa spatialisation pose également question. Pour Dumont and Bossé (2006) : p.1 « *les espaces périurbains présentent précisément cette spécificité d'être insaisissables parce que non bornés, non limités par des critères objectifs aisément applicables tels que ceux qui ont pu caractériser, et caractérisent encore, les espaces urbains qui constituent des formes plus ou moins compactes* ». Pour De Smet (2012) également, délimiter un territoire périurbain n'est pas chose aisée car si on peut connaître

---

<sup>36</sup> Notamment le projet SUN (Sustainable Urban Neighbourhoods) qui vise à inscrire 7 quartiers urbains de l'Eurégio Meuse-Rhin dans une dynamique de développement durable. <http://www.sun-euregio.eu/>, consulté en mai 2012.

la ville autour de laquelle s'est développée l'expansion périurbaine, il est par contre plus difficile de définir avec un minimum de précision et de consensus quelles sont ses limites.

En France, de nombreuses définitions ont été établies, et celle proposée par l'INSEE est considérée comme « officielle ». L'INSEE définit les couronnes périurbaines comme les zones qui « *recouvrent l'ensemble des communes de l'aire urbaine, à l'exclusion de son pôle urbain*<sup>37</sup> ». Cette définition est complétée par le fait que les communes périurbaines sont les communes qui n'appartiennent pas à une agglomération, au sens de la continuité du bâti (distance maximale de 200 mètres entre deux constructions) et dont 40 % des résidents actifs travaillent dans une aire urbaine.

En Belgique, Van der Haegen and Pattyns (1979) et Sporck et al. (1985) ont proposé une typologie des régions urbaines belges qui est couramment utilisée dans les travaux et recherches traitant de l'urbanisation en Belgique ainsi que dans les recensements INS (par exemple Merenne-Schoumaker et al. (1998)). La typologie a été mise à jour et adaptée par Van der Haegen (1991), puis par Van der Haegen et al. (1996), Eggerickx and Capron (2001) et Luyten and Van Hecke (2007). Cette classification (Figure II-6) s'appuie sur différents critères comme le degré d'urbanisation, le caractère continu de l'habitat, l'accroissement de la population, le revenu médian, les migrations au départ de la ville centre, etc. Des « complexes urbains » sont définis et représentent des ensembles territoriaux sous l'influence d'une ville centre. Pour la Wallonie, 7 complexes urbains sont identifiés (de l'ouest à l'est : Tournai, Mons, La Louvière, Charleroi, Namur, Liège et Verviers) auxquels on peut ajouter Bruxelles. Bien que la ville-centre ne soit pas située sur le territoire wallon, son complexe urbain s'étend en partie sur le Brabant wallon. Chaque complexe urbain est ensuite divisé en 3 types d'espaces :

- Les agglomérations morphologiques regroupent les ensembles de bâti continu (distance maximale de 250 mètres entre constructions). Elles sont composées des villes centrales (noyaux urbains et quartiers urbains à construction très dense) et de la couronne urbaine. Elles recouvrent 1.383 secteurs statistiques<sup>38</sup> pour 536,1km<sup>2</sup> ce qui représente 3,17% du territoire wallon<sup>39</sup>). Les agglomérations opérationnelles sont

---

<sup>37</sup> [www.insee.fr](http://www.insee.fr), consulté et mars 2010

<sup>38</sup> « Le secteur statistique est l'unité territoriale de base qui résulte de la subdivision du territoire des communes et des anciennes communes par l'Institut National de la Statistique. L'objectif était de pouvoir diffuser les données statistiques à une échelle plus fine que celle de la commune. Les secteurs statistiques ont été définis en 1970 pour le Recensement de la Population et des Logements (recensement INS de 1981) sur base de caractéristiques d'ordre social, économique, urbanistique ou morphologique. Ils ont été retouchés pour l'Enquête Socio-Economique de 2001 pour épouser les modifications des limites communales et intégrer les grandes modifications de l'utilisation des sols. », [www.statbel.fgov.be/fr/](http://www.statbel.fgov.be/fr/), consulté en mars 2010. De façon générale, on considère, qu'en zone urbaine, le secteur statistique s'approche de la notion du « quartiers » et qu'en zones rurales, il reprend un ensemble de hameaux.

<sup>39</sup> Détails pour chaque agglomération morphologique wallonne :

- Tournai : 50 secteurs statistiques couvrant 23,5km<sup>2</sup> (0,14% du territoire wallon).
- Mons : 193 secteurs statistiques couvrant 89,5km<sup>2</sup> (0,53% du territoire wallon).
- Charleroi : 375 secteurs statistiques couvrant 133,8km<sup>2</sup> (0,79% du territoire wallon).
- Bruxelles : 66 secteurs statistiques couvrant 36,1km<sup>2</sup> (0,21% du territoire wallon).
- Namur : 87 secteurs statistiques couvrant 36,4km<sup>2</sup> (0,22% du territoire wallon).
- Liège : 535 secteurs statistiques couvrant 191,9km<sup>2</sup> (1,14% du territoire wallon).
- Verviers : 77 secteurs statistiques couvrant 25,0km<sup>2</sup> (0,15% du territoire wallon).

définies de la même façon mais leurs limites sont étendues aux frontières communales, dans un objectif opérationnel (2.260 secteurs statistiques, 1.478,7km<sup>2</sup>, 8,75% du territoire wallon<sup>40</sup>).

- Les banlieues sont des zones de croissance naturelle de l'agglomération. Elles sont définies comme des zones de développement et de prospérité relative ayant de solides liens bilatéraux avec le centre-ville. Cette définition, assez vague, a fait l'objet d'une cartographie précise, adaptée également aux frontières communales (54 communes, 1.762 secteurs statistiques, 2.374,1km<sup>2</sup>, 14,05% du territoire<sup>41</sup>). Les banlieues et les agglomérations forment les régions urbaines qui concentrent 58% de la population et structurent l'espace belge. Elles constituent le moteur de mouvements migratoires importants (Van Hecke and Savenberg, 2002).
- Les zones résidentielles des migrants alternants sont des zones dans lesquelles au moins 15% de la population active migre quotidiennement vers l'agglomération (1.959 secteurs statistiques, 3.421,4km<sup>2</sup>, 20,24% du territoire<sup>42</sup>).

L'étalement urbain est couramment assimilé aux banlieues et zones des migrants alternants (Brück, 2002). Les communes et secteurs statistiques qui n'appartiennent pas aux complexes résidentiels urbains (agglomérations + banlieues + zones des migrants alternants) ne sont pas classés et recouvrent donc une série de réalités différentes (zone rurale, périurbaine mais aussi zone plus dense (Arlon par exemple), etc.).

Au Royaume-Uni, l'Office of Population Censuses and Surveys (OPCS) utilise une classification qui poursuit la même philosophie que celle adoptée pour la définition des aires urbaines belges (Dujardin et al., 2012a).

---

<sup>40</sup> Détails pour chaque agglomération opérationnelle wallonne :

- Tournai : 1 commune couvrant 215,4km<sup>2</sup> (1,27 % du territoire wallon)
- Mons : 6 communes couvrant 252,6km<sup>2</sup> (1,49 % du territoire wallon)
- Charleroi : 5 communes couvrant 200,4km<sup>2</sup> (1,19 % du territoire wallon)
- La Louvière : 4 communes couvrant 122,7km<sup>2</sup> (0,73 % du territoire wallon)
- Bruxelles : 2 communes couvrant 73,6km<sup>2</sup> (0,44 % du territoire wallon)
- Namur : 1 commune couvrant 176,0km<sup>2</sup> (1,04 % du territoire wallon)
- Liège : 13 communes couvrant 366,0km<sup>2</sup> (2,17 % du territoire wallon)
- Verviers : 3 communes couvrant 72,0km<sup>2</sup> (0,43 % du territoire wallon)

<sup>41</sup> Détails pour chaque banlieue wallonne :

- Tournai : 3 communes couvrant 101,9km<sup>2</sup> (1,27 % du territoire wallon)
- Mons : 3 communes couvrant 193,9km<sup>2</sup> (1,49 % du territoire wallon)
- Charleroi : 7 communes couvrant 418,9km<sup>2</sup> (1,19 % du territoire wallon)
- Bruxelles : 14 communes couvrant 557,9km<sup>2</sup> (0,44 % du territoire wallon)
- Namur : 4 communes couvrant 221,3km<sup>2</sup> (1,04 % du territoire wallon)
- Liège : 21 communes couvrant 690,0km<sup>2</sup> (2,17 % du territoire wallon)
- Verviers : 2 communes couvrant 190,3km<sup>2</sup> (0,43 % du territoire wallon)

<sup>42</sup> Détails pour chaque zone de migrants alternants wallonne :

- Tournai : 2 communes couvrant 100,7km<sup>2</sup> (0,60 % du territoire wallon)
- Mons : 4 communes couvrant 142,1km<sup>2</sup> (0,84 % du territoire wallon)
- Charleroi : 10 communes couvrant 656,1km<sup>2</sup> (3,88 % du territoire wallon)
- La Louvière : 2 communes couvrant 104,7km<sup>2</sup> (0,62 % du territoire wallon)
- Bruxelles : 26 communes couvrant 1323,9km<sup>2</sup> (7,83 % du territoire wallon)
- Namur : 5 communes couvrant 386,0km<sup>2</sup> (2,28 % du territoire wallon)
- Liège : 16 communes couvrant 654,6km<sup>2</sup> (3,87 % du territoire wallon)
- Verviers : 2 communes couvrant 53,3km<sup>2</sup> (0,32 % du territoire wallon)

L'Institut National des Statistiques a pour sa part défini des noyaux d'habitat. Ces noyaux d'habitat sont des unités morphologiques définies sur base de l'agglomération d'un ou plusieurs secteurs statistiques. Ils représentent des zones bâties continues appelées « zones d'habitations agglomérées » si elles sont habitées par plus de 200 personnes ou « zones d'habitations dispersées » sinon. Les noyaux d'habitat les plus peuplés sont principalement situés le long du sillon Sambre-et-Meuse et au nord de celui-ci. La dispersion est plus importante dans la partie sud de la Wallonie<sup>43</sup>.

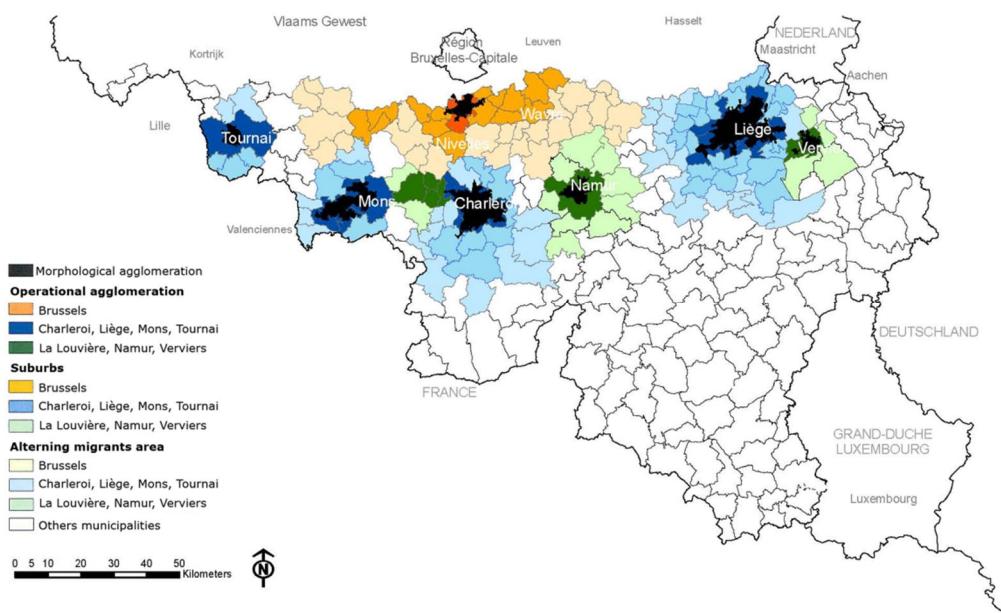


Figure II-6 : Les aires urbaines de Wallonie.

<sup>43</sup> Sder.wallonie.be, consulté en avril 2010

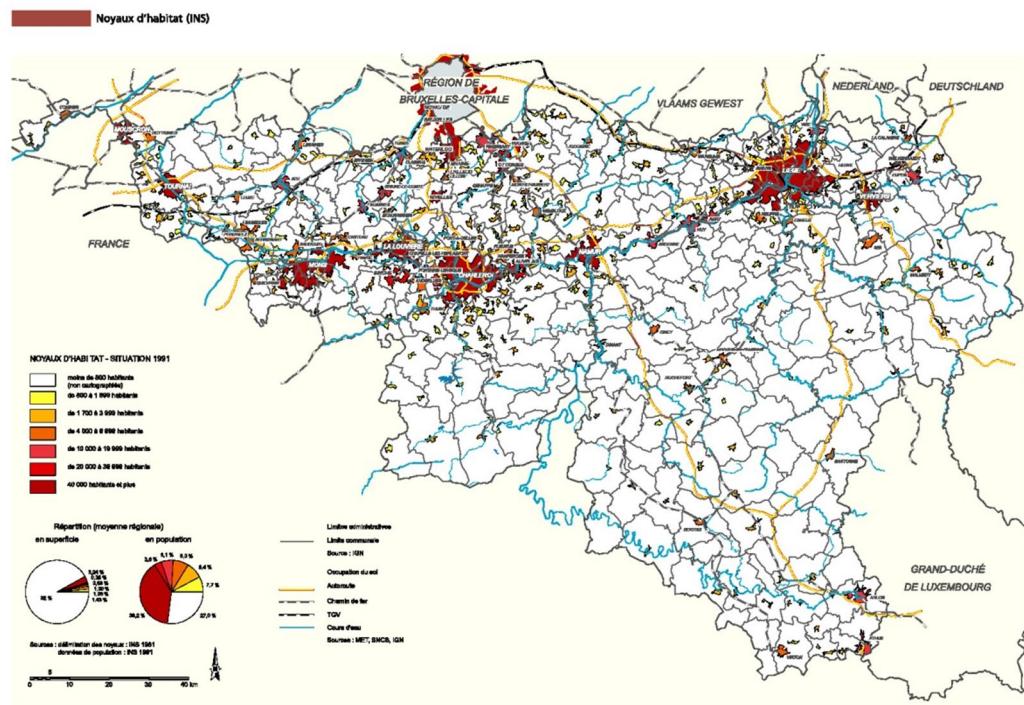


Figure II-7 : Les noyaux d'habitat de l'INS ©sder.wallonie.be.

Les noyaux d'habitat (Figure II-7) offrent deux avantages par rapport aux aires urbaines : ils ne sont pas étendus aux limites communales et ils représentent des ensembles bâtis continus (critère de type morphologique) alors que certaines catégories des aires urbaines sont définies hors de toute considération de type morphologique. La part des navettes vers l'agglomération par rapport à la population active occupée résidant dans la commune est, par exemple, le seul critère utilisé pour la définition des zones de migrants alternants (Merenne-Schoumaker et al., 1998). Toutefois, en dehors de ces noyaux, cette classification ne permet pas de distinguer zones périurbaines ou rurales.

### 3.1.2. Les typologies de quartiers existantes

De Smet (2012) a proposé, dans le cadre de sa thèse de doctorat portant sur la caractérisation des espaces périurbains, une méthode d'observation systématique basée sur une interprétation des caractères du bâti et de son substrat urbain, c'est-à-dire respectivement les constructions présentes sur un site et la maille périurbaine. Le travail a été réalisé sur base cartographique, à l'échelle de la région urbaine de Liège. Une des hypothèses de départ concerne néanmoins la possibilité d'élargir cette typologie à l'étude plus générale des territoires périurbains.

Le territoire de la région urbaine de Liège (hors agglomération opérationnelle) a été divisé en fenêtres d'observation de 200 mètres par 200 mètres. Ces fenêtres ont été soumises à un traitement systématique informatisé. La typologie qui en ressort se base sur la configuration géométrique des tissus (la hauteur des constructions n'est pas considérée), l'homogénéité des constructions, le caractère d'additivité des constructions et la densité

de l'urbanisation à l'intérieur de chaque fenêtre. Elle a permis de mettre en évidence les sept types de formes (péri) urbaines différenciés suivants :

- Le tissu mitoyen homogène est défini comme un ensemble de bâtiments mitoyens de surfaces homogènes (cité sociale).
- Le tissu urbain traditionnel et complexe est un ensemble de bâtiments principalement mitoyens de surfaces hétérogènes (œur de village).
- Le tissu de constructions isolées et mitoyennes est un tissu intermédiaire entre habitat groupé et diffus (hétérogène).
- Le tissu de constructions isolées homogènes (ou lotissement) constitue un ensemble de bâtiments principalement isolés et homogènes.
- Les bâtiments importants en taille (min 500m<sup>2</sup>, activités économiques).
- Le tissu de constructions isolées hétérogènes.
- Le tissu de très faible densité ou bâtiments isolés.

Le guide d'urbanisme pour la Wallonie édité par le Ministère de la Région wallonne est un instrument de dialogue entre les acteurs de l'aménagement du territoire ainsi qu'un outil d'aide à la conception et à l'accompagnement de prise de décisions qui formule et illustre un ensemble de principes généraux, sans caractère réglementaire, qui visent à encadrer et à stimuler la recherche et la création urbanistique et architecturale en Wallonie (MRW, 2004). Il distingue les 9 types d'« aires différenciées<sup>44</sup> » suivants :

- Le centre urbain en bâti continu : aire constituée du noyau originel des bourgs et villes ainsi que leurs premières extensions. Les rues sont disposées en mailles formant des îlots. Les bâtiments sont généralement implantés en mitoyenneté et à l'alignement. Ils comprennent entre 2 et 4 niveaux sous gouttières. La densité de construction est forte.
- Les premières extensions urbaines en bâti semi-continu : cette aire constitue une transition entre les aires de bâti continu du centre et les aires résidentielles des périphéries, notamment en ce qui concerne la densité des constructions. Les premières formes d'urbanisation en extension du centre sont de type urbain. Par la suite, les modes d'urbanisation ont évolué : parcelles plus larges, constructions à trois façades ou isolées implantées avec un recul important par rapport à l'alignement. La juxtaposition de ces modes d'urbanisation a contribué à créer un paysage bâti hétérogène.
- Les dernières extensions urbaines en bâti discontinu : cette aire correspond aux zones résidentielles des périphéries d'agglomération. La densité est faible. Le modèle dominant est celui de la villa isolée.
- Le parc résidentiel en bâti discontinu : il se distingue de l'aire de bâti discontinu par sa forte proportion d'espaces verts et sa très faible densité de logements. Cette aire résidentielle que l'on retrouve dans la périphérie de la plupart des grandes agglomérations, se compose de quartiers habités généralement par des personnes à hauts revenus.
- Les voies d'entrée dans les localités : l'urbanisation le long des voiries d'entrée dans les villes et villages a fortement évolué au cours des 30 dernières années. D'abord

---

<sup>44</sup> Ce sont des zones caractérisées par des problématiques semblables ou des modes d'urbanisation homogènes.

affectés principalement à la résidence, ces espaces inscrits le plus souvent en zone d'habitat au plan de secteur sont maintenant occupés par des activités de type commercial ou artisanal (garages, moyennes et grandes surfaces).

- Les ensembles bâtis homogènes : ensembles architecturaux composés notamment de logements bâtis de façon répétitive formant ainsi une rue, un îlot ou un quartier. Ces ensembles résultent d'opérations menées soit par les pouvoirs publics pour la création de logements sociaux, soit par des promoteurs immobiliers ou des entrepreneurs (logements moyens ou bourgeois).
- L'aire de village : correspond au territoire urbanisé du village. Elle comprend à la fois le noyau originel et ses extensions. Le noyau originel, souvent très homogène, est composé d'anciens bâtiments agricoles ou ouvriers. Les nouvelles habitations se sont développées en extension de ce noyau et parfois également au sein de celui-ci sous une forme totalement étrangère à sa structure : l'habitat pavillonnaire.
- L'aire rurale (en fonction du plan de secteur) : territoire non inscrit en zone d'urbanisation et se trouvant en zone agricole, forestière, d'espaces verts, etc.
- L'aire d'activités économiques (le guide distingue encore l'aire d'activités économiques mixtes du plan de secteur et l'aire d'activités économiques industrielles du plan de secteur) est destinée aux activités d'artisanat, de services, de distribution ou d'industrie.

L'Institut d'Aménagement et d'Urbanisme de la Région Ile-de-France, enfin, a élaboré un référentiel sur les densités et les formes urbaines afin de donner des repères communs, visuels et chiffrés sur la densité nette de différents types d'habitats dans la région Ile-de-France (IAURIF, 1995). Le choix d'échelle retenu correspond à l'îlot. Une typologie de 25 îlots urbains différents (sur base des 6 catégories du MOS<sup>45</sup> : individuel, individuel identique, rural, continu bas, collectif continu haut et collectif discontinu, Figure II-8) a été établie. Elle inclut une vue aérienne de chaque îlot et une analyse des plans, modes d'occupation et densité. Elle concerne les immeubles individuels et les immeubles collectifs. Les types qui pourraient être transposés à notre étude traitant des tissus périurbains wallons sont ceux repris sous les catégories « individuel » et « individuel identique ».

---

<sup>45</sup> Le Mode d'Occupation des Sols a été conçu pour permettre, au niveau régional, de repérer notamment les secteurs d'habitats.

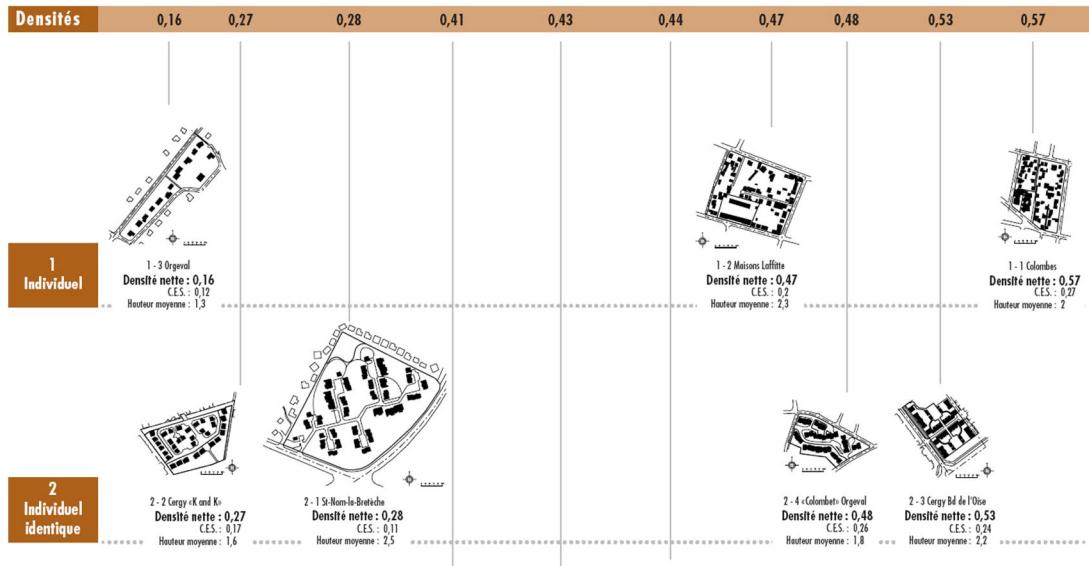


Figure II-8 : Les 25 îlots définis dans le référentiel de densités et de formes urbaines comprennent 7 types d'îlots à caractère périurbain ©IAURIF (1995).

### 3.1.3. Synthèse et confrontation à notre objet de recherche

Deux champs peuvent être investigués pour identifier les quartiers périurbains : les définitions spatialisées et les typologies de quartiers. Chacune présente ses avantages et ses inconvénients. L'élément principal qui ressort de l'analyse des définitions spatialisées, c'est la difficulté à définir spatialement le territoire périurbain. Tant les aires urbaines de Van der Haegen que celles de l'INSEE sont basées sur des zonages territoriaux continus et semblent incapables de retranscrire la réalité du phénomène qui a largement contribué à flouter la limite entre ville et campagne. Nous retiendrons en particulier la présence, au sein d'une même aire urbaine, de quartiers de morphologie très différente (comme illustré sur les Figure II-9 et Figure II-10).



Figure II-9 : Deux quartiers de Liège (Saint Léonard à gauche et Rocourt à droite) qui appartiennent tous les deux à l'agglomération opérationnelle de Liège.



Figure II-10 : Deux quartiers d'Houffalize (noyau historique et développement périurbain) qui ne sont pas répertoriés dans la classification des aires urbaines.

Les typologies de quartiers sont une deuxième piste intéressante, mais à l'exception de De Smet (2012), il n'est pas possible de lier type de quartiers et localisation spatiale. La zone d'étude adoptée par De Smet (2012) est toutefois limitée à la région urbaine de Liège (hors agglomération opérationnelle) et n'est pas, en l'état, transposable à l'ensemble du territoire wallon. La zone d'étude comprend en effet des zones à pression foncière forte ou moyenne et ignore vraisemblablement d'autres types de quartiers périurbains moins denses qui se développent dans des zones plus reculées où la pression foncière est moins élevée.

### 3.2. Une définition morphologique de l'étalement urbain et des quartiers périurbains

Partant des définitions présentées dans la section précédente, de leurs avantages et limitations et de l'objet de notre recherche, nous avons adopté une approche intermédiaire pour définir l'objet de notre recherche. Nous avons d'abord postulé que la définition de l'étalement urbain doit, dans le cadre de notre travail, être basée sur des critères de type morphologique, c'est-à-dire des critères qui ont un impact direct sur l'évaluation énergétique des quartiers. Il s'agit dans un premier temps de délimiter le territoire périurbain, en faisant abstraction de toute frontière administrative, pour appréhender ce territoire dans sa dimension morphologique puis, d'identifier en son sein, les types de quartiers périurbains wallons les plus représentatifs. Ce sont ces quartiers qui feront ensuite l'objet des évaluations énergétiques. Cette approche typologique, aussi employée par Jones et al. (2000) ou Maïzia et al. (2009), permet à la fois de dépasser l'approche monographique et non reproductible d'une analyse de cas et de permettre la généralisation des résultats obtenus à un territoire plus vaste sans adopter les hypothèses plus restrictives qui caractérisent souvent les analyses menées à l'échelle de l'ensemble du stock bâti d'une région (par exemple Dujardin et al. (2012) pour le stock bâti wallon ou Wallemacq et al. (2011) et Reiter and Marique (In press) pour la région urbaine de Liège). Nous reviendrons en détail sur cette approche typologique appliquée à l'évaluation énergétique des quartiers dans le chapitre IV.

### 3.2.1. Une définition spatiale morphologique

Dans la littérature internationale tout comme en Wallonie (voir section 2.3 ci-dessus), les caractéristiques les plus communément associées à l'étalement urbain sont la faible densité (*low-density developments*), qui est l'indicateur le plus couramment utilisé pour définir l'étalement urbain (Ewing and Rong, 2008), la monofonctionnalité (*separation of land uses*) et la discontinuité spatiale (*strip development, scattered development away from the central city or on isolated tracts separated from other areas by vacant land, leapfrog development*). Pour Ewing (1994), l'étalement urbain, tout comme la gestion de la croissance urbaine, comprend traditionnellement trois dimensions principales : la densité, l'usage des sols (*land use*) et le temps.

Ces trois indicateurs ont été appliqués aux secteurs statistiques de la Wallonie de façon à en extraire ceux qui seront qualifiés, selon notre définition, de « périurbains ». Si le secteur statistique reste une limite administrative, comme l'ancienne commune ou la commune, il a toutefois l'avantage d'être de superficie suffisamment restreinte que pour être considéré comme homogène. De plus, cette subdivision de la commune est établie sur base de similarités socio-économiques et architecturales (Brulard and Van der Haegen, 1972).

Les données utilisées pour le traitement cartographique sont :

- Le plan de localisation informatique (PLI) de la Wallonie (1/10.000) qui vise à enrichir le fond de plan cadastral de l'IGN<sup>46</sup> d'un référentiel cadastral continu sur l'ensemble du territoire wallon. Il comprend les communes, divisions, sections, parcelles et bâtiments issus des planches cadastrales vectorisées et recalées (en les déformant) sur les cartes topographiques de l'IGN. Une clé unique est attribuée à chaque parcelle et permet le lien avec la matrice cadastrale<sup>47</sup>.
- Le projet informatique de cartographie continue (PICC) wallon (1/1.000) est un référentiel cartographique de grande qualité métrique. Il reprend, selon leurs coordonnées x, y et z, tous les éléments identifiables du paysage wallon (bâtiments, éléments naturels, voiries, taques, limites, chemin de fer, etc.).
- La base de données du cadastre qui reprend la fonction de chaque bâtiment, sa date de construction et la date de modifications éventuelles apportées aux bâtiments.

Les trois indicateurs ont été combinés et appliqués aux 9.875 secteurs statistiques. La densité et la monofonctionnalité (fonction résidentielle) sont appréhendées selon un critère unique qui représente la densité nette de logements (c'est-à-dire la densité de logements par hectare urbanisé). La discontinuité spatiale étant intrinsèque à notre méthode de calcul qui s'applique secteur statistique par secteur statistique, elle ne fait pas l'objet d'un filtre supplémentaire. Enfin, si l'étalement urbain est une forme de croissance continue, la spatialisation des territoires périurbains est une description figée en un temps t fixé. Sa mise à jour périodique devrait ainsi être envisagée et pourrait constituer un indicateur de l'évolution de la périurbanisation en Wallonie.

---

<sup>46</sup> Institut Géographique National

<sup>47</sup> Dgo4.spw.wallonie.be, consulté en juillet 2011.

La répartition des secteurs statistiques selon la densité nette de logements par hectare s'exprime sous forme d'une courbe gaussienne (Figure II-11), dont il convient d'éliminer les zones denses des centres-villes et noyaux ruraux et les zones peu denses, à caractère plutôt rural. Sur base de la répartition gaussienne, nous avons posé l'hypothèse que notre zone d'étude s'étend entre les premier et troisième quartiles, ce qui signifie que les quartiers périurbains tels qu'ainsi définis présentent une densité comprise entre 5 et 12 logements par hectare.

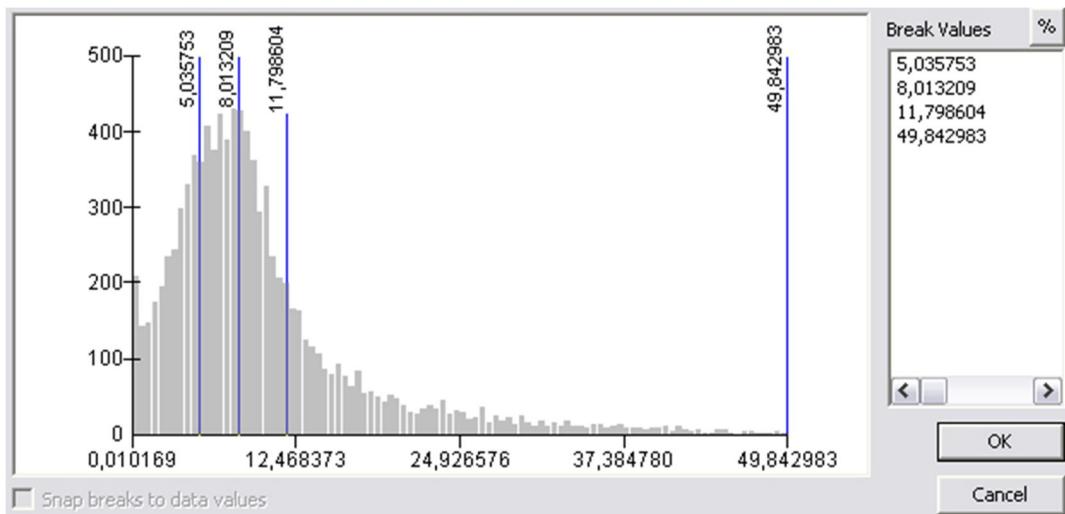


Figure II-11 : Répartition des secteurs statistiques selon la densité nette de logements par hectare.

Les Figure II-12, Figure II-13 et Figure II-14 représentent les secteurs statistiques de la Wallonie, selon les trois classes de densité définies. On retrouve, sur la Figure II-12, le territoire périurbain tel que défini ci-dessus (en bleu, identification des secteurs statistiques dont la densité nette est comprise entre 5 et 12 logements par hectare). Les villes et noyaux ruraux apparaissent clairement sur la Figure II-13 (en rouge, les secteurs statistiques dont la densité nette est supérieure à 12 logements par hectare). On retrouve, sur cette carte, les noyaux d'habitat de l'INS (Figure II-7). Enfin, la Figure II-14 reprend les secteurs statistiques dont la densité nette est inférieure à 5 logements par hectare. On y retrouve de nombreuses zones de la Province de Luxembourg.

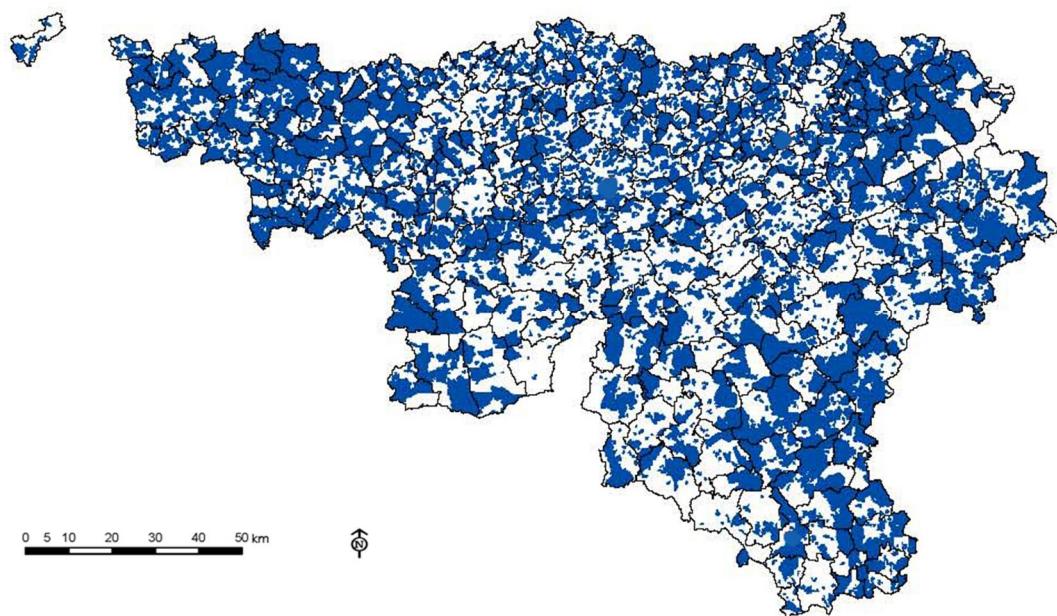


Figure II-12 : Identification des secteurs statistiques considérés comme périurbains (densité nette comprise entre 5 et 12 logements par hectare).

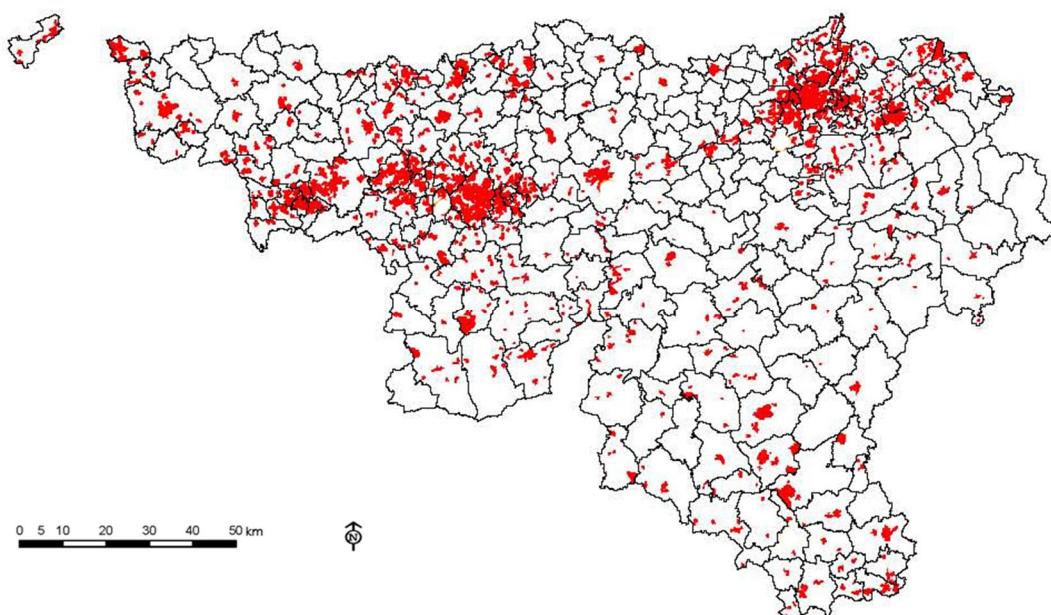


Figure II-13 : Identification des secteurs statistiques dont la densité nette est supérieure à 12 logements par hectare.

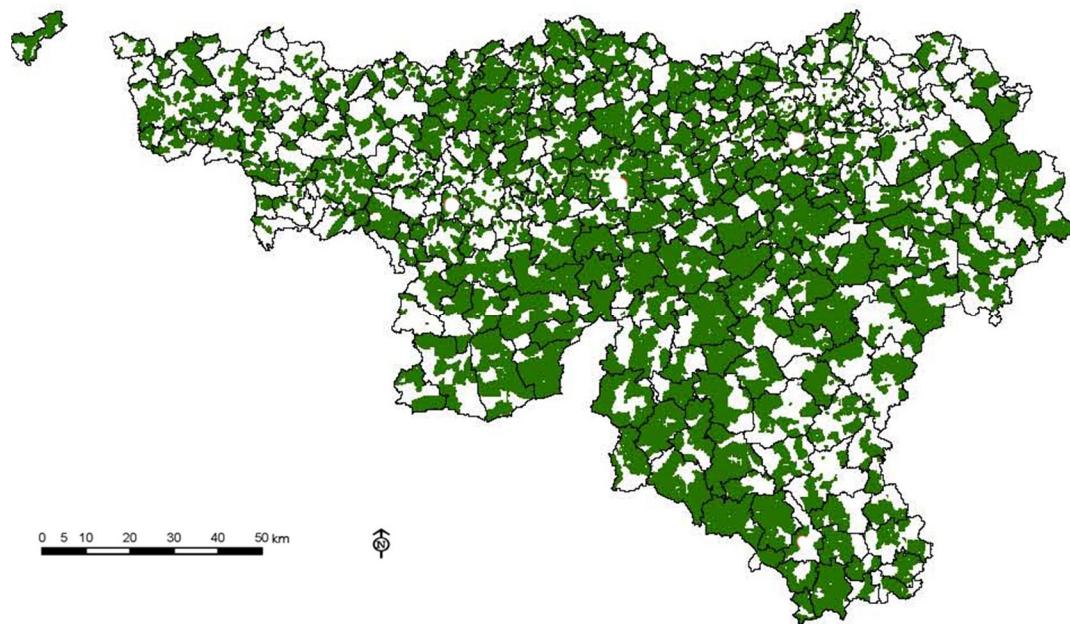


Figure II-14 : Identification des secteurs statistiques dont la densité nette est inférieure à 5 logements par hectare.

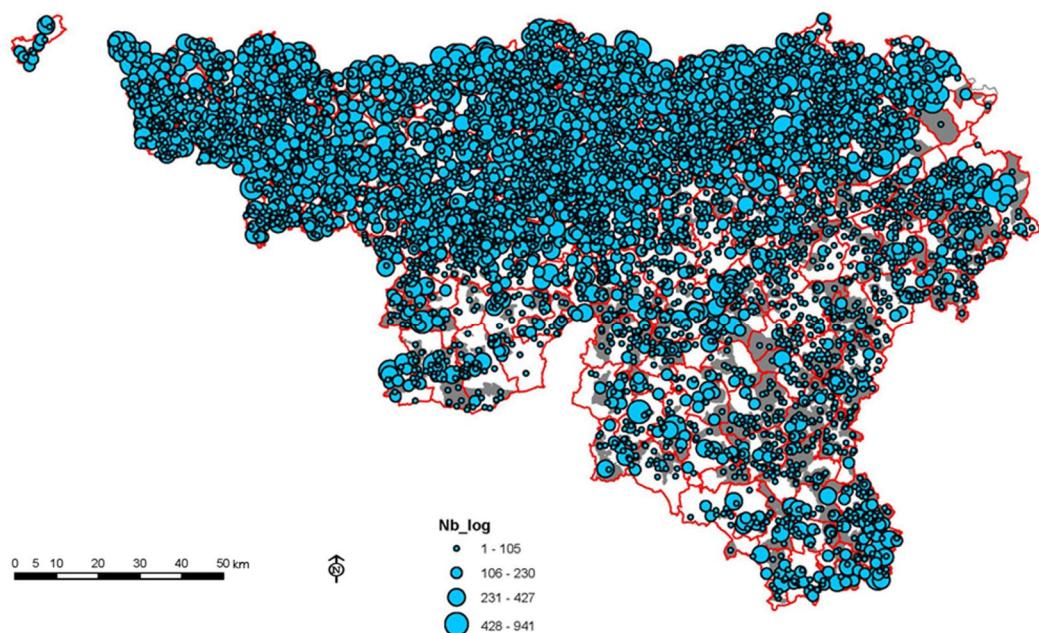


Figure II-15 : Nombre de logements par secteur statistique dit « périurbain » (densité nette comprise entre 5 et 12 logements par hectare).

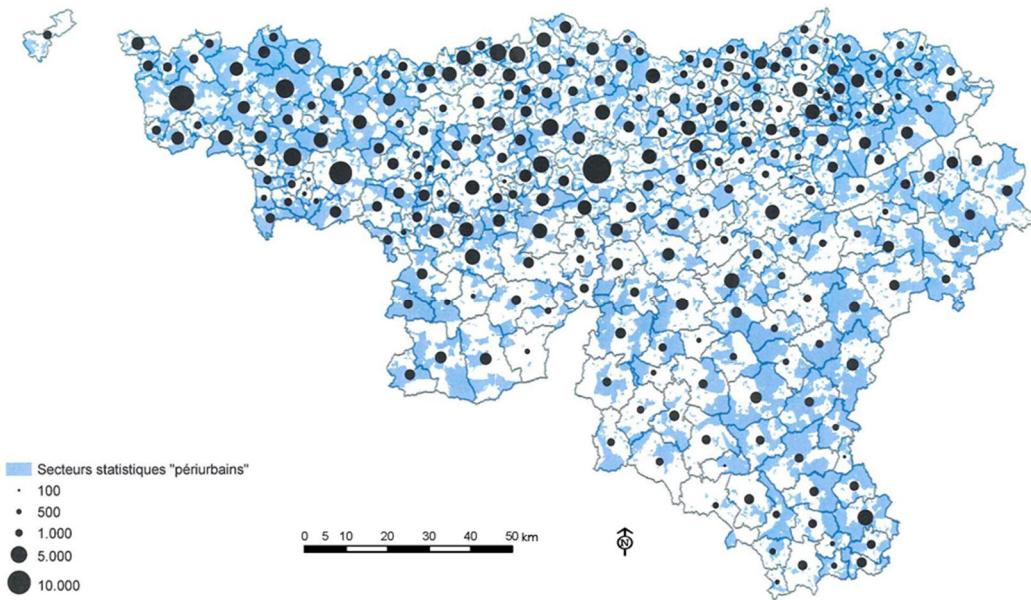


Figure II-16 : Nombre de logements présents dans des secteurs statistiques « périurbains », agrégation à l'échelle de la commune.

Nous avons enfin cartographié le nombre de logements présents dans chacun des secteurs statistiques considérés comme « périurbains » à l'échelle du secteur statistique puis à l'échelle de la commune, de façon à apporter une information supplémentaire à la Figure II-12 où la superficie des secteurs statistiques est surreprésentée. On remarque sur les Figure II-15 et Figure II-16 que les logements identifiés comme « périurbains » se concentrent surtout dans le Brabant wallon (zone essentiellement résidentielle située dans le complexe urbain de Bruxelles) alors que, dans la Province de Luxembourg, les secteurs statistiques sont de grande superficie mais accueillent un nombre plus réduit de logements. Les communes urbaines densément peuplées présentent également un nombre important de quartiers dont la densité est comprise entre 5 et 12 logements à l'hectare. C'est par exemple le cas de Namur, dont l'ensemble du territoire communal appartient à l'agglomération dans la classification des aires urbaines de Van der Haegen et al. (1996).

Enfin, afin de tester de façon purement informative la pertinence de notre classification, une enquête a été menée dans le cadre du travail de fin d'études de Charlotte Pierson (2010) sur un échantillon de 480 personnes, employées de l'Université de Liège. Il leur était demandé, parmi d'autres questions traitant de l'étalement urbain et de la qualité de vie, de spécifier le type de quartier dans lequel ils vivent (choix possible entre rural, périurbain ou urbain, sans autre complément d'information). Les adresses des répondants ont été encodées dans un système d'information géographique de façon à pouvoir identifier le type de quartier dans lequel elles se situent selon notre approche. Les résultats sont relativement bons dans le sens où la majorité des réponses données par le panel correspondent à notre classification basée sur la densité de logement. 2,7% des

répondants ont choisi « quartier périurbain » pour des quartiers de plus de 12 logements par hectare. 1,9% ont choisi « quartier périurbain » alors que leur logement se situe dans un secteur statistique de moins de 5 logements par hectare. Enfin 6% des répondants ont choisi « quartier rural » alors que la densité du secteur statistique est comprise entre 5 et 12 logements par hectare. Ce choix était motivé notamment par la distance à un centre-ville plutôt que par la densité. Remarquons enfin que parmi les critères utilisés par les répondants pour qualifier un quartier de « périurbain » et justifier leur choix, la faible densité, le caractère isolé du logement et la taille de la parcelle ou du jardin ainsi que sa localisation dans un environnement vert sont les plus cités.

### 3.2.2. Une typologie des quartiers périurbains wallons

Une typologie des quartiers périurbains a d'abord été esquissée sur base des approches typologiques présentées ci-dessus et d'une analyse visuelle. Seules les caractéristiques morphologiques des quartiers ont été prises en compte. Les quatre types suivants ont été mis en évidence :

- Le quartier de type « ruban » : il s'agit d'un ruban de constructions pavillonnaires qui se sont développées de part et d'autre d'une voirie reliant deux noyaux existants. Ce type est à rapprocher du type « voie d'entrée dans les localités » de MRW (2004), mais présente, en milieu périurbain, des densités très faibles. Ce type de quartier est absent de la version finale de la typologie de De Smet (2012) qui concerne uniquement l'aire urbaine de Liège (plus forte pression foncière).
- Le quartier de type « semi-mitoyen » est à rapprocher du « tissu mitoyen homogène » de De Smet (2012), de « l'ensemble bâti homogène » de MRW (2004) et de « l'individuel identique » de IAURIF (1995). Il s'agit d'un ensemble de constructions mitoyennes ou semi-mitoyennes homogènes bâties de façon répétitive. C'est typiquement le genre de structure qu'on retrouve dans les quartiers de logements sociaux. Il témoigne de la volonté des pouvoirs publics, en tant que promoteurs des logements sociaux, d'orienter leurs constructions vers les franges urbaines où les terrains à bâtir étaient moins chers (Van Hecke and Savenberg, 2002).
- Le quartier de type « nappe » est à rapprocher des types « tissus de constructions isolées homogènes » de De Smet (2012), « dernières extensions urbaines » et « parc résidentiel en bâti discontinu » de MRW (2004) et « individuel » de IAURIF (1995). Il s'agit d'un tissu de constructions individuelles « 4 façades » (type lotissement), construites de façon individuelle par les ménages, souvent selon la formule du « clé sur porte ».
- Le quartier de type « mixte » enfin se rapproche des types « tissu urbain traditionnel et complexe » et « tissu de constructions isolées et mitoyennes » de De Smet (2012) et des « aires de villages » de MRW (2004). Il s'agit ici d'un tissu hétérogène, tant au niveau de la forme, de l'époque des constructions que des fonctions. Ce type se développe en général autour d'un noyau ancien, auquel il vient s'adjointre des développements plus récents.

L'objet de cette approche n'est nullement de proposer une classification typologique exhaustive des quartiers périurbains wallons (comme c'était le cas notamment pour De

Smet (2012) dans sa zone d'étude) mais d'identifier, de façon suffisamment robuste, les types de quartiers périurbains wallons les plus représentatifs. Pour vérifier la représentativité des quatre types mis en évidence dans la typologie « visuelle », trois cents points ont été tirés de façon aléatoire dans le territoire périurbain défini par l'approche cartographique de l'étalement urbain. Cette analyse a été réalisée en deux temps (200 points puis 100 points) par deux personnes différentes de façon à pouvoir comparer les résultats obtenus par un classement qui reste très subjectif. Les résultats obtenus sur base des deux échantillons sont très proches.

Le quartier de type « ruban » représente ainsi, selon cette analyse cartographique, 21% des quartiers périurbains wallons de l'échantillon analysé. Les quartiers de type « semi-mitoyen », « nappe » et « mixte » représentent respectivement 8%, 20% et 30%. Les quatre types prédefinis permettent ainsi de couvrir 79% des quartiers de l'échantillon total de 300 points. Neuf pourcents des quartiers présentent des caractéristiques relatives à deux des types principaux (par exemple nappe et semi-mitoyen). Enfin, 12% des quartiers ne peuvent être classés dans aucune des catégories précitées. Il s'agit, le plus souvent, de quartiers de faible densité où il est difficile de mettre en évidence une structure spatiale particulière. Nous considérons comme acceptable ce biais dans une étude qui traite de l'ensemble de stock périurbain wallon (voir aussi la section relative aux limites de notre approche, ci-dessous). La Figure II-17 présente quatre cas représentatifs de chacun des quatre types principaux de quartiers périurbains identifiés.



Figure II-17 : Exemples de quartiers répondant aux quatre types principaux mis en évidence : (a) un quartier de type « ruban » à Tintigny-Bellefontaine ; (b) un quartier de type semi-mitoyen à Fontaine-L'Evêque ; (c) un quartier de type « nappe » à Jambes et (d) un quartier de type « mixte » à Rotheux.

### 3.2.3. Une typologie de logements périurbains

Les caractéristiques des logements correspondant aux 300 points de l'échantillon ont également été extraites et analysées (superficie, volumétrie (appréhendée via la hauteur sous corniche renseignée dans le PICC), mitoyenneté, année de construction), comme celles des parcelles sur lesquelles ces logements se situent (superficie).

Des analyses ont été réalisées sur les caractéristiques des logements identifiés. Les Tableau II-2 et Tableau II- 3 présentent respectivement la répartition de l'échantillon par classes de superficies et par classes d'âge. La classe de superficie la plus couramment rencontrée est la classe 101-150m<sup>2</sup>. La taille moyenne du stock étudié est de 120m<sup>2</sup> (déviation standard=40m<sup>2</sup>). On remarque une corrélation entre superficie du logement et type de quartier. Les quartiers de type "ruban" sont préférentiellement composés de logements de taille comprise entre 101m<sup>2</sup> et 150m<sup>2</sup> et plus. Les logements les plus grands sont préférentiellement implantés dans des quartiers de type « nappe » tandis que les logements les plus petits (moins de 100m<sup>2</sup>) se retrouvent presqu'exclusivement dans les quartiers de type « semi-mitoyen ». Le type « mixte » se caractérise par une plus grande variété de types de logements. Les logements de plus de 200m<sup>2</sup> sont exclusivement implantés dans les quartiers de type « nappe » (maison de grande superficie construite sur une large parcelle par un ménage aisé) ou « mixte » (ancienne ferme). La taille des parcelles ne semble pas corrélée à la superficie du logement dans le sens où un coefficient de détermination R<sup>2</sup> de seulement 0,2 a pu être calculé.

*Tableau II-2 : Répartition de l'échantillon de logements périurbains par classes de superficie.*

Répartition par classes de superficie			
50-100m <sup>2</sup>	101-150m <sup>2</sup>	150-200m <sup>2</sup>	> 200m <sup>2</sup>
31,5%	47,5%	15,0%	6,0%

*Tableau II- 3 : Répartition de l'échantillon de logements périurbains par classes d'âge.*

Répartition par classes d'âge				
Avant 1930	1931-1960	1961-1980	1981-1996	Après 1996
38,3%	14,3%	30,0%	10,4%	7,0%

En ce qui concerne l'année de construction, les logements construits avant 1930 et entre 1961 et 1980 sont les plus représentés ce qui traduit deux phénomènes distincts : la relative ancienneté du parc de logement wallon et la vague de périurbanisation particulièrement importante entre 1961 et 1980. Les logements les plus anciens sont essentiellement localisés dans les quartiers de type « mixte ». Il s'agit des noyaux existants autour desquels se sont développés des logements plus récents. Les logements construits entre 1961 et 1980 sont surtout implantés dans les quartiers de type « nappe » et dans une moindre mesure dans les quartiers de type « ruban ». Les logements implantés dans des quartiers de type « semi-mitoyen » sont répartis de façon relativement équivalente dans

chacune des classes d'âge, ce qui tend à prouver que ce type de développement (essentiellement du logement social construit par les pouvoirs publics) a été développé de façon continue dans le temps.

Les caractéristiques relatives aux logements (superficie du logement, mitoyenneté, âge de construction, type de quartier dans lequel le logement est implanté) ont enfin été combinées de façon à mettre en évidence les types les plus représentatifs :

- Maison "4 façades" de 101m<sup>2</sup> à 150m<sup>2</sup> construite avant 1930 dans un quartier de type « mixte » (11,9% du stock bâti résidentiel périurbain).
- Maison "4 façades" de 101m<sup>2</sup> à 150m<sup>2</sup> construite entre 1961 et 1980 dans un quartier de type « ruban » (6,9%).
- Maison "2 façades" de 50m<sup>2</sup> à 100m<sup>2</sup> construite avant 1930 dans un quartier de type « mixte » (5,1%).
- Maison "4 façades" de 101m<sup>2</sup> à 150m<sup>2</sup> construite entre 1961 et 1980 dans un quartier de type « nappe » (5,0%).
- Maison "4 façades" de 101m<sup>2</sup> à 150m<sup>2</sup> construite entre 1981 and 1996 dans un quartier de type « nappe » (5,0%).

### 3.2.4. Limites de notre approche

Une typologie des quartiers périurbains wallons a été développée et cartographiée, sur base de données cadastrales et cartographiques. L'objet de cette analyse était de proposer une définition des quartiers périurbains wallons adaptée à des études de type morphologique (analyse des consommations énergétiques du bâti, analyse relative à l'ensoleillement, etc.) et de montrer, dans notre champ de recherches particulier, la pertinence d'une représentation non continue, par opposition notamment aux aires urbaines. Il ne s'agissait donc pas de produire une typologie exhaustive des formes bâties périurbaines (au contraire notamment de De Smet (2012) pour la région urbaine de Liège) mais de mettre en évidence, de façon suffisamment robuste, les types de quartiers et de bâtiments périurbains les plus représentatifs. Ces types représentatifs seront ensuite soumis à des évaluations énergétiques pour approcher avec une précision suffisante les performances énergétiques du stock périurbain existant et étudier des scénarios concrets d'intervention dans les quartiers existants. C'est la raison pour laquelle certains biais sont considérés comme acceptables (notamment l'incapacité de classer 9% de l'échantillon) et la taille de l'échantillon jugée suffisante.

# Chapitre III

## Energie et Forme Urbaine

### 1. Introduction

Les domaines des consommations d'énergie et des émissions de gaz à effet de serre<sup>1</sup> liées aux activités humaines au sens large sont des champs de recherches largement investigues dans la littérature, depuis la première crise pétrolière des années 70. Les secteurs du transport et du bâtiment (ménages et services confondus) représentaient en effet respectivement 32% et 37% de l'énergie finale consommée en Europe<sup>2</sup> en 2007. En Wallonie, la part des consommations finales d'énergie pour le transport et pour le logement représentait, en 2004, respectivement 24,3% et 23,5%. La part du transport des ménages s'élevait à 8,5% des consommations totales. Le secteur du transport présente par ailleurs la particularité d'être un des seuls en croissance continue. Il ne représentait, en 1990, que 26% des consommations d'énergie en Europe. En raison de l'augmentation croissante des niveaux de mobilité, la demande énergétique pour le transport en 2030 devrait augmenter de 28% par rapport à la demande enregistrée en 2005 (European Commission, 2008).

Augmenter l'efficacité énergétique des bâtiments et des transports, réduire leur dépendance aux énergies fossiles et diminuer les émissions de gaz à effet de serre sont ainsi devenus des éléments centraux des politiques européennes, nationales et locales. Ces considérations restent extrêmement préoccupantes à l'heure actuelle pour trois raisons au moins : (1) il y a maintenant un consensus scientifique sur le fait que le climat terrestre change à cause des émissions de gaz à effet de serre provenant des activités humaines (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007), en particulier des secteurs du bâtiment et du transport qui sont très liés à l'aménagement du territoire ; (2) l'épuisement des ressources pétrolières se précise (on parle notamment de l'imminence du « pic pétrolier » qui caractérise le moment à partir duquel la production commence à stagner

---

<sup>1</sup> Les émissions de gaz à effet de serre sont liées aux consommations d'énergie mais la relation qui les lie n'est pas linéaire (elle dépend, entre autres, du vecteur énergétique). Dans cette thèse, nous ne traiterons que des consommations d'énergie.

<sup>2</sup> <http://ec.europa.eu/energy/publications/doc/statistics/>, consulté en mai 2012

puis à diminuer et ne peut plus rencontrer la demande) et ; (3) l'augmentation continue du prix de l'énergie (en lien avec la raréfaction des ressources) impose de repenser nos comportements en matière d'énergie.

Dans ce chapitre, nous abordons la question des consommations énergétiques, appréhendées conformément à l'objet de notre recherche à l'échelle du quartier, par l'étude de l'influence de la forme urbaine sur les besoins et les consommations, tant en matière de bâtiments que de transport. Une revue de la littérature relative à l'impact de la forme urbaine sur les consommations d'énergie pour le transport des personnes et sur les consommations d'énergie dans le secteur du bâtiment résidentiel est d'abord proposée (Section 2). Nous détaillons ensuite les méthodes et approches existantes pour évaluer les consommations d'énergie dans ces deux secteurs (Section 3). La Section 4 synthétise ces différentes approches et positionne l'intervention de la thèse dans le cadre ainsi défini.

Deux remarques préliminaires s'imposent. Premièrement, dans ce chapitre, les approches, méthodes et résultats relatifs au bâtiment individuel ne sont pas présentés. Nous avons en effet posé comme hypothèse en introduction de cette thèse que les actions entreprises à l'échelle du bâtiment individuel ne pouvaient rencontrer, à elles seules, les challenges énergétiques auxquels notre société doit faire face mais que c'est à une échelle plus large que se situe le plus grand potentiel de diminution des consommations d'énergie pour le chauffage des bâtiments et le transport des personnes. Il s'agit donc ici d'aborder l'impact des paramètres relevant de l'aménagement du territoire et de la forme urbaine sur les consommations d'énergie dans les secteurs du bâtiment et du transport dans les quartiers périurbains.

Deuxièmement, si cette thèse concerne les quartiers périurbains, force est de constater que de nombreux travaux relatifs à l'influence de la forme urbaine sur les consommations énergétiques concernent des zones urbaines denses, voire très denses, qui n'existent pas en Belgique, à l'exception de Bruxelles. Ces travaux sont toutefois incontournables, notamment par les méthodologies qu'ils développent et les débats, parfois contradictoires, qu'ils suscitent. Nous abordons donc ici les plus significatifs et les mettons, dans la mesure du possible, en relation avec des études du même type traitant des milieux périurbains.

L'objectif de l'approche développée dans ce chapitre est double. Il s'agit, d'une part, de dresser une synthèse des études, méthodes et résultats pertinents dans le domaine et, d'autre part, de positionner notre propre approche d'élaboration d'une méthode d'évaluation énergétique des quartiers périurbains par rapport à ce corps de la littérature, notamment en termes de méthodologies et d'objectifs opérationnels.

## 2. Forme urbaine et énergie, état de l'art

### 2.1. Forme urbaine et transport

L'influence de la forme urbaine sur les consommations d'énergie pour le transport est souvent appréhendée à partir d'un critère de densité. Très rapidement popularisés, les travaux de Newman and Kenworthy (1989) et (1999) ont mis en évidence un lien entre la densité et la consommation d'énergie, pour 32 grandes villes situées sur quatre continents<sup>3</sup>. La courbe liant consommation de carburant et densité urbaine met en évidence que la consommation annuelle de carburant diminue significativement quand la densité urbaine (calculée ici comme le nombre d'habitants par hectare) augmente et inversement (Figure III-1).

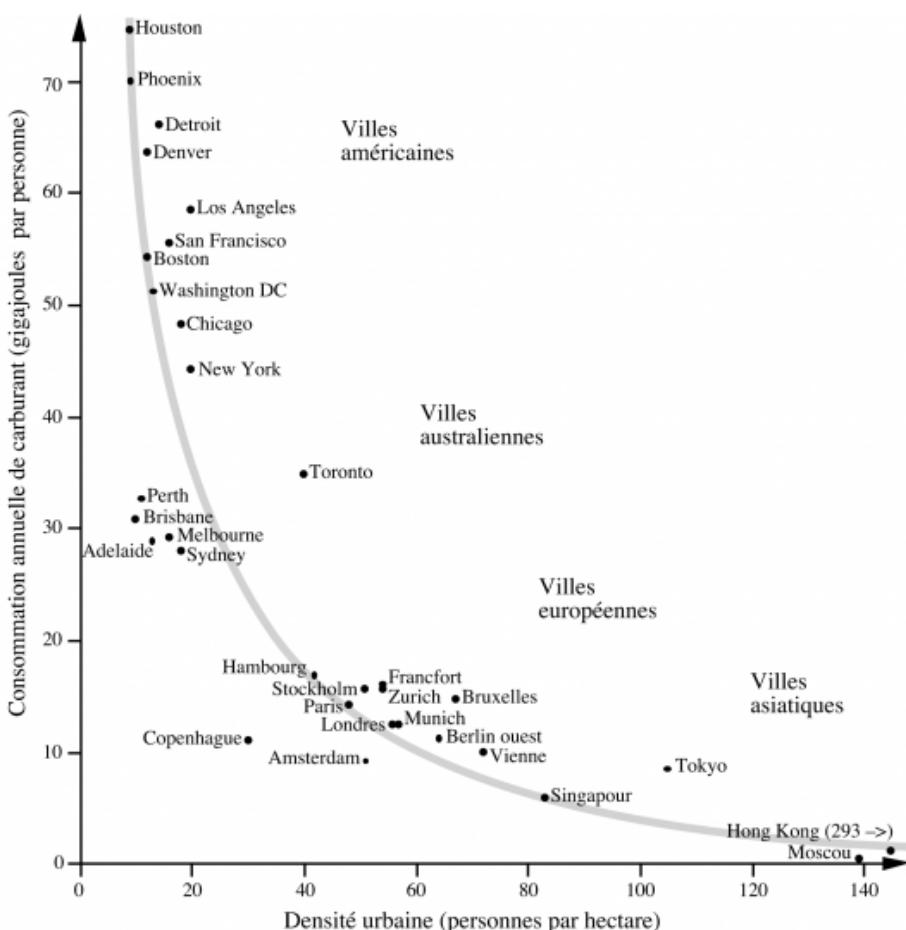


Figure III-1 : Consommation de carburant et densité urbaine, d'après Newman et Kenworthy (1989a), traduit en français par Heran (2001).

<sup>3</sup> Houston, Phoenix, Détroit, Denver, Los Angeles, San Francisco, Boston, Washington DC, Chicago, New York, Toronto, Perth, Brisbane, Melbourne, Adélaïde, Sydney, Hambourg, Stockholm, Francfort, Zurich, Bruxelles, Munich, Paris, Londres, Copenhague, Amsterdam, Berlin Ouest, Vienne, Singapour, Tokyo, Moscou et Hong Kong.

Les villes asiatiques seraient ainsi celles qui consomment le moins de carburant grâce à une très haute densité de population, au strict opposé des villes américaines, Houston en tête (facteur de 18 par rapport à Hong-Kong). Les villes européennes présentent une situation intermédiaire. Environ 5 fois plus denses que les villes américaines du panel, elles consomment 3,6 fois moins d'énergie.

Naess et al. (1996) ont également observé une réduction des consommations pour le transport avec l'augmentation de la densité, dans 22 villes du nord de l'Europe alors que Banister et al. (1997) avancent que les effets positifs de la densité sur le transport résident dans un meilleur report modal vers les transports en commun et des distances parcourues plus faibles. Cette relation entre densité et réduction des consommations d'énergie pour le transport, bien que très souvent mobilisée par les opposants à l'étalement urbain et les défenseurs de la ville compacte, est toutefois régulièrement remise en question, essentiellement pour des raisons d'ordre méthodologique (Mindali et al., 2004, Owens, 1995, Gordon and Richardson, 1989). Elle soulève ainsi une controverse sur la validité des arguments mobilisés et finalement sur la faisabilité des principes de durabilité véhiculés par les défenseurs de la ville compacte.

Banister (1992) a appliqué le même type de méthodologie à des villes britanniques et a mis en évidence, sur base de données empiriques et statistiques provenant d'enquêtes nationales, que les consommations énergétiques relatives au transport sont légèrement plus élevées dans Londres que dans des villes plus petites, ce qui réfute les observations de Newman et Kenworthy. Breheny (1995) a mis en évidence des réductions mineures en termes de diminution des consommations énergétiques dues au transport grâce au modèle de la ville compacte. En assignant à différentes zones anglaises des performances égales à celles des districts métropolitains et villes principales (zones qui présentent les consommations les plus faibles), le gain total en matière d'énergie due au transport s'élève à 34%. L'hypothèse adoptée est par ailleurs irréalisable. Il en déduit donc que les gains obtenus par la ville compacte ne pourraient, au mieux, engendrer des diminutions de l'énergie consommée pour le transport que de 10 à 15%, et ce, moyennant beaucoup de temps et des politiques très strictes, difficiles à implémenter. Owens (1986) recentre le débat sur la question de la densité en spécifiant qu'il s'agit d'une condition nécessaire pour limiter les déplacements et réduire les consommations d'énergie dues au transport mais qu'elle n'est pas suffisante. Selon cet auteur, l'impact de la mixité des fonctions sur la demande en transport est moins important que celui de la densité.

Ewing and Cervero (2001) avancent, sur base d'un grand nombre d'études de cas, que l'impact de la densité sur la réduction des déplacements en voiture reste marginal. Ils évaluent l'élasticité à -0,05 ce qui signifie que doubler la densité d'un quartier réduit simplement les déplacements en voiture de 5% puisque la congestion va augmenter. Au mieux, les consommations d'énergie et les émissions de CO<sub>2</sub> vont diminuer légèrement. Au pire, elles augmenteront car les performances des moteurs sont nettement moins bonnes s'il y a de la congestion. L'élasticité de l'accessibilité de la destination finale est estimée à -0,2 ce qui conduit les auteurs à avancer que des zones très accessibles (par exemple des centres-villes) pourraient mener à des consommations d'énergie pour le

transport réduites, en comparaison avec d'autres zones denses et mixtes mais moins accessibles. Ewing et al. (2008) ont estimé que les villes américaines les plus denses généreraient 35% de distances parcourues par personne de moins que les zones les plus périurbaines. Pour Ewing and Cervero (2010), réduire la distance au centre-ville de 10% engendrerait une diminution de 2,2% des véhicules-kilomètres moyens, réduction comparable à celle (2,0%) engendrée par une augmentation de 10% des emplois proposés en ville. Enfin, toujours selon ces auteurs, des développements plus compacts, qui prennent en compte à la fois la densité, la mixité fonctionnelle et l'accessibilité pourraient réduire les déplacements motorisés par personne de 25 à 30%. Dans le même ordre d'idée, Stead (2001) avance que, si 43% de la variation des distances parcourues peut être expliquée par des facteurs d'ordre socio-économique, 27% de cette variation est directement attribuable aux variables relevant de l'aménagement du territoire, ce qui est considérable.

Steemers (2003) avance par ailleurs qu'augmenter la densité de population d'une ville sans avoir au préalable implémenté des politiques et infrastructures de transport efficaces est contre-productif et ne pourrait se traduire que par une augmentation de la mobilité en voiture individuelle et donc une augmentation significative de la pollution atmosphérique et sonore. Fouchier (1997) a également constaté que l'équation « densification = moins d'usage de la voiture = moins de pollution » n'est pas directement valable et qu'il faut être prudent dans les conclusions à tirer. L'idée qu'une forte densité favorise l'usage des modes de transports alternatifs n'est applicable qu'à un certain type de déplacements, celui du domicile-travail caractérisé par la régularité et l'unicité de l'origine comme de la destination. L'impact de la densité sur les déplacements périphériques ou pour d'autres motifs que le travail est mineur. S'ajoute à cela le fait que la concentration de plusieurs millions d'habitants et de toutes les activités économiques de la ville peut conduire à de graves problèmes de congestion et ainsi contrarier les objectifs écologiques de sauvegarde de l'environnement et d'économie d'énergie. Ainsi, les avantages de la concentration peuvent se transformer en désavantages si les coûts économiques, sociaux et environnementaux liés à la congestion dépassent les bénéfices en termes de gain énergétique de la ville compacte (Bochet, 2007). Au-delà de la seule densité, d'autres facteurs relevant de la forme urbaine conduisent donc également à influencer la consommation énergétique liée aux déplacements. Une bonne mixité fonctionnelle en particulier, et une localisation adéquate des activités sur le territoire, qui lui est fortement liée, peuvent conduire à des distances parcourues plus courtes et des parts modales plus favorables aux transports en commun et aux modes doux (Fouchier, 1997, Cervero and Kockelman, 1997, Hanson, 1982).

Différents auteurs ont déconstruit la simple relation causale entre haute densité et diminution des déplacements et étudié l'impact de facteurs d'ordre socio-économique sur les consommations d'énergie pour les déplacements. Souche (2010) a étudié 10 villes et montré que les deux facteurs qui influencent le plus les consommations d'énergie pour le transport sont le coût du transport et la densité urbaine. Gordon and Richardson (1997), Breheny and Gordon (1997) et Gordon (2008) ont démontré que si le prix réel du carburant, comparé au revenu, est inclus dans l'analyse, la densité ne joue plus qu'un rôle

mineur dans la variation de la consommation d'énergie. Boarnet and Crane (2001) et Van de Coevering and Schwanen (2006) ont également souligné l'impact du prix du carburant et des facteurs de type socio-économique sur les comportements liés à la mobilité. Après avoir analysé plusieurs cas d'étude, ils estiment que si l'utilisation du sol et la forme urbaine influencent les comportements de transport, c'est en agissant sur le prix des déplacements (la densité fait diminuer le coût des transports plutôt que la densité est la cause de la diminution de la consommation de carburant). Les villes qui possèdent des moyens de transport bon marché (coût des véhicules et coût du carburant) permettent à leurs habitants de se déplacer plus loin pour se loger et ainsi bénéficier de plus d'espace (pour autant que les prix fonciers en périphérie soient inférieurs aux prix en centre-ville). Il en résulte des développements à faible densité.

L'impact de l'étalement urbain, en particulier, sur les déplacements des personnes et les consommations d'énergie qui y sont liées a également été investigué par de nombreux auteurs. L'étalement urbain crée une séparation spatiale entre les activités, ce qui résulte en une augmentation significative des distances parcourues, une plus forte dépendance à la voiture individuelle et donc une augmentation des consommations d'énergie pour les déplacements (Desjardins and Llorente, 2009, García-Palomares, 2010, Jenks and Burgess, 2002, da Silva et al., 2007, Travisi et al., 2010). Hickman and Banister (2007) ont mis en évidence, pour les territoires périurbains de Surrey, un impact des variables relevant de la forme urbaine sur les consommations d'énergie pour le transport pouvant aller jusqu'à 10%. Les variables explicatives utilisées<sup>4</sup> ont toutes un pouvoir explicatif relativement faible mais deviennent importantes lorsqu'elles sont considérées ensemble. Ces observations ne sont toutefois pas unanimement partagées par l'audience scientifique et Gordon and Richardson (1989) notamment avancent que la périurbanisation des emplois et des ménages mène à une réduction des consommations d'énergie pour le transport. Ils avancent également que la périurbanisation est engendrée par des choix personnels et que toute tentative visant à plus de compacté est dès lors vaine. Pour Schwanen et al. (2001), la périurbanisation des ménages n'implique pas nécessairement une augmentation des consommations pour les déplacements domicile-travail mais elle mène à une diminution des parts modales pour les transports en commun et les modes doux, car elle encourage le recours à la voiture pour les autres motifs de déplacements.

Il existe, comme on vient de le montrer, un corps relativement important de littérature qui supporte le rôle que la forme urbaine joue en influençant les choix modaux et les consommations d'énergie pour les déplacements des adultes. Les déplacements domicile-travail sont les plus couramment, et le plus souvent les seuls, étudiés dans la littérature relative à la forme urbaine et au transport. Au contraire, il n'existe à l'heure actuelle que relativement peu de connaissances sur l'impact de la forme urbaine sur les déplacements des enfants, notamment sur les déplacements scolaires, et les résultats d'études

---

<sup>4</sup> Les caractéristiques d'occupation du sol utilisées sont la densité de population, la densité d'emploi au lieu de résidence et au lieu d'emploi, le volume de population et de travailleurs, la distance aux centres urbains et les infrastructures, la balance entre lieux de travail et logements, le type de déplacements domicile-travail, la configuration du quartier, l'accessibilité aux transports publics et la localisation des résidents (en lien avec les « green belts »).

empiriques sectorielles restent peu concluants (McMillan, 2005, Mitra and Buliung, 2012). Depuis les premiers travaux de Hillman et al. (1990), les recherches traitant de la mobilité des enfants et des jeunes se sont principalement intéressées à trois thèmes : le déclin des parts modales de la marche et du vélo (ou « active commuting »), la promotion de la mobilité individuelle des enfants sans le recours à un adulte accompagnant (ou « children's independent mobility ») et l'augmentation de l'obésité et de l'inactivité physique chez les enfants (Buliung et al., 2012, Gilbert and O'Brien, 2005). Ces recherches ont ainsi tenté d'examiner les corrélations entre des facteurs personnels, familiaux, sociaux et environnementaux et la mobilité douce des enfants entre le domicile et l'école, principalement du point de vue de la santé et de l'obésité. Les résultats de ces recherches convergent vers deux éléments principaux : (1) la probabilité de se rendre à l'école à pied ou à vélo diminue fortement avec l'augmentation de la distance à parcourir et (2) l'impact de la sécurité des routes et des contraintes temporelles des ménages est important (Dellinger and Staunton, 2002, Faulkner et al., 2010, Ewing et al., 2004, McDonald and Aalborg, 2009, McMillan et al., 2006, Mitra et al., 2010, Sjolie and Thuen, 2002, Timperio et al., 2006, Trapp et al., 2011, Yeung et al., 2008, Ziviani et al., 2004). L'absence de supervision par un adulte responsable, l'âge de l'enfant et la peur des agressions sont d'autres facteurs qui expliquent également la diminution des parts modales de la marche à pied et du vélo. A cet égard, McDonald (2012) et McMillan et al. (2006) ont mis en évidence le rôle du genre, les garçons étant plus susceptibles que les filles de se rendre à l'école à pied et surtout à vélo. McMillan (2007) a, en particulier, mis en évidence que la forme urbaine est un facteur qui affecte significativement le choix modal pour les déplacements scolaires mais que ce n'est pas le seul. La perception de l'environnement, la sécurité, la sécurité routière, les comportements de mobilité des ménages et les normes culturelles et sociales ont une influence plus importante que la forme urbaine.

Un champ émergent de la littérature concerne des aspects plus qualitatifs liés à la perception de l'environnement bâti qu'ont les parents mais aussi les enfants (Faulkner et al., 2010, Line et al., 2010). L'enfant devient ainsi un « agent actif » capable d'exprimer ses propres besoins en termes de mobilité scolaire (Fusco et al., 2012). Enfin, des études récentes ont mis en évidence l'intérêt de prendre en compte à la fois des facteurs sociaux et environnementaux (Gilbert and O'Brien, 2005, Feng et al., 2010, McMillan et al., 2006, Saelens and Handy, 2008) et tenté, sur cette base, d'identifier des pistes d'actions concrètes pour améliorer la mobilité individuelle des enfants, à l'échelle urbaine. Ces stratégies peuvent être groupées en trois thèmes : les modifications à apporter à la forme urbaine et aux systèmes de transport, les modifications à apporter au niveau de l'aménagement des quartiers et les changements de valeurs sociales (Tranter and Sharpe, 2012).

Trois limites aux études existantes relatives à la mobilité des enfants peuvent être mises en évidence. La première concerne l'absence de consensus sur les catégories étudiées et leur dénomination. Dans le domaine qui nous occupe et dans la continuité des travaux de Holloway and Valentine (2000) et de Nayak (2003), Buliung et al. (2012) avancent que cette construction varie selon le temps et l'espace considéré. Ils rejoignent ainsi le point de vue couramment accepté dans les sciences sociales et historiques (voir par exemple Aries (1962) et James and Jenks (1996)). Pour des raisons d'ordre statistique, on remarquera que

de nombreuses organisations (Banque Mondiale, Unicef, Human Right Education, etc.) ont adopté la définition suivante : les jeunes (ou « youth ») sont âgés de 15 à 24 ans et les enfants (ou « children ») sont âgés de moins de 14 ans. Parmi cette catégorie, Hillman et al. (1990) distinguent encore les juniors des seniors selon qu'ils soient âgés de moins ou de plus de 11 ans.

La seconde limitation relève du fait, qu'à quelques exceptions près (Hillman et al. (1990) en Angleterre, Sjolie and Thuen (2002) en Norvège ou Susilo and Waygood (2012) au Japon), les recherches existantes concernent majoritairement l'Amérique du Nord (USA et Canada), ce qui pose la question de la transférabilité des résultats proposés dans d'autres contextes, comme l'ont notamment mis en évidence Cervero et al. (2009) pour le cas de Bogota (Colombie). En Europe, en particulier, il existe peu de connaissances relatives à la mobilité scolaire et à ses liens avec la forme urbaine alors que les territoires européens ont des différences très significatives avec les pays abordés ci-dessus.

Enfin, les études existantes sont réalisées sur base d'enquêtes statistiques menées sur des échantillons de taille variée (de 200 à quelques centaines d'individus), ce qui pose la question de leur comparabilité et de la transférabilité des résultats à des échantillons plus grands.

## 2.2. Forme urbaine et bâtiment

Pour Ewing and Rong (2008), si l'impact de la forme urbaine sur les consommations d'énergie pour le transport a, comme on vient de le voir, été étudié de façon extensive dans la littérature, l'influence de la forme urbaine sur les consommations d'énergie dans le secteur résidentiel est un domaine de recherches qui reste moins investigué. Weiner (2008) avance qu'une des raisons de ce constat est que le secteur du transport est géré par les autorités publiques alors, qu'au contraire, les espaces résidentiels et commerciaux relèvent le plus souvent du secteur privé. Une autre difficulté majeure tient du fait que les consommations d'énergie relèvent d'un ensemble complexe de facteurs qui dépendent à la fois de variables relatives à la forme urbaine et de variables non spatiales, certaines étant difficilement, voire pas prédictibles. Owens (1992) conclut de ces interactions diverses entre facteurs hétérogènes qu'il est impossible de prédire qu'un type de forme urbaine pourrait être plus efficace énergétiquement que d'autres types.

Les études et recherches relatives aux consommations d'énergie du bâtiment résidentiel restent ainsi pour la plupart concentrées sur l'échelle du bâtiment individuel. De nombreux modèles et techniques ont, en effet, été développés et validés ces dernières années pour étudier et simuler le comportement des bâtiments en vue d'en améliorer les performances énergétiques et environnementales.

Ces modèles adoptent, en général, la perspective du bâtiment en le considérant comme une entité autonome et en négligeant l'importance de phénomènes qui apparaissent à des échelles plus larges (Ratti et al., 2005). Or, si le contexte urbain a été largement ignoré dans les analyses traitant de la qualité environnementale des bâtiments, l'approche « bâtiment » n'est plus suffisante du point de vue de l'aménagement durable du territoire et de la

raréfaction des ressources. Sur base de ce constat, un champ grandissant de la recherche s'est attaché, à partir de la fin des années nonante, à étudier l'impact de la forme urbaine sur les consommations d'énergie pour les bâtiments. Elles ont mis en évidence que les décisions prises à l'échelle d'un quartier ont des conséquences importantes sur les performances énergétiques des bâtiments. Celles-ci dépendent en effet de nombreux critères définis au stade du plan masse : compacité, orientation, valorisation des apports solaires, etc. (Popovici and Peuportier, 2004). Les paramètres identifiés comme les plus influents concernent notamment le volume et la superficie bâtie, l'orientation des façades, le pourcentage de surfaces vitrées et la présence d'obstructions.

Kahn (2000) a montré, sur base des données du recensement américain de 1993 traitant des consommations d'énergie pour le bâtiment résidentiel, qu'il n'y avait pas de différences significatives entre les consommations d'énergie des zones centrales et périurbaines d'une même aire urbaine. La distinction qu'il opère entre ces deux types de zones est toutefois critiquée par d'autres auteurs (notamment Ewing (1997)) ce qui soumet l'interprétation de ces résultats à beaucoup de précaution.

Steemers (2003) a exploré l'impact de la densité urbaine sur les consommations d'énergie pour le chauffage des bâtiments résidentiels en Angleterre. Il estime qu'à l'échelle urbaine la densité peut être augmentée de trois façons : (1) une augmentation de la profondeur des bâtiments (notamment par la construction d'annexes en façade arrière), (2) une augmentation de la hauteur des bâtiments ou une réduction de la surface entre les bâtiments et (3) une augmentation de la compacité (par exemple la construction d'appartements au lieu de maisons « 4 façades »). Les bénéfices en termes de consommations d'énergie pour le chauffage sont mitigés. La densification compacte induit, d'une part, une diminution favorable des pertes de chaleur mais, d'autre part, réduit les gains solaires potentiels et la lumière naturelle disponible<sup>5</sup>. Il en conclut qu'augmenter simultanément la densité urbaine et l'efficacité énergétique des bâtiments implique d'augmenter la compacité du tissu urbain en limitant la profondeur des bâtiments à 10 à 12 mètres, là où l'orientation est appropriée, de façon à assurer un accès correct de la lumière, du soleil et de l'air. Des densités urbaines relativement élevées peuvent toutefois être atteintes avant que les effets négatifs de la densité sur les consommations d'énergie ne deviennent significatifs (il estime ce seuil à 200 logements par hectare, sur base de logements de 125m<sup>2</sup> de superficie).

Ratti et al. (2005) ont postulé que les performances énergétiques des bâtiments dépendent de quatre critères : la géométrie urbaine, le design du bâtiment, l'efficacité des systèmes et le comportement des occupants. Selon Baker and Steemers (2000), le design du bâtiment peut induire une variation de 2,5 fois la consommation d'énergie. Les facteurs de variations liés à l'efficacité des systèmes et aux comportements des habitants sont tous deux évalués à 2. L'impact de la géométrie urbaine, qui se manifeste selon ces auteurs essentiellement via les apports solaires disponibles et l'impact en termes de microclimat

---

<sup>5</sup> Même si ce n'est pas l'objet ici, signalons que l'auteur a également mené des investigations pour les bâtiments de bureaux. La densification a un impact négatif, essentiellement parce qu'elle induit une perte de lumière naturelle.

local, est difficile à évaluer en raison de la complexité des paramètres relatifs à ce critère (Figure III-2). Ils estiment toutefois que, le design du bâtiment, l'efficacité des systèmes et le comportement des occupants pouvant conjointement mener à un coefficient total égal à 10, la forme urbaine est un paramètre significatif car on peut observer des variations dans les consommations d'énergie d'un bâtiment allant jusque 20 fois. Les auteurs ont démontré, sur base de l'application à trois cas d'études (Londres, Toulouse et Berlin), d'un modèle digital d'élévation (DEM<sup>6</sup>) combiné à un outil de prédition des consommations d'énergie, que la forme urbaine impacte les consommations d'énergie pour le bâtiment, à l'échelle urbaine, de façon significative. A cet effet, le ratio entre les zones passives et les zones non-passives, qui quantifie le potentiel de chaque zone du bâtiment à bénéficier d'apports solaires et de lumière naturelle, est un indicateur particulièrement pertinent.

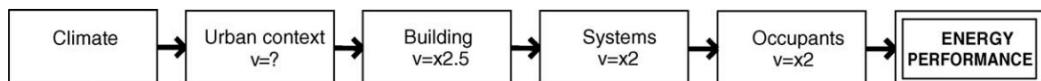


Figure III-2 : Facteurs qui affectent la consommation d'énergie dans le bâtiment ; selon Baker and Steemers (2000) ; l'impact de la forme urbaine n'est pas quantifié.

Ewing and Rong (2008) ont proposé un cadre conceptuel (Figure III-3) liant forme urbaine et consommation d'énergie via trois biais : les consommations d'électricité et les pertes du réseau (T&D Losses), les besoins d'énergie selon le type de stock bâti (Housing Choices) et les besoins en chauffage et en climatisation en association avec les îlots de chaleur urbains (UHI)<sup>7</sup>.

Ewing and Rong (2008) considèrent que la forme urbaine agit de façon très limitée sur les pertes électriques mais impacte le stock bâti et l'îlot de chaleur urbain. Sur base d'investigations basées sur des données nationales, ils arrivent à la conclusion que les consommations d'énergie pour le bâtiment résidentiel varient selon le type et la superficie du bâtiment, caractéristiques qu'ils lient au niveau d'étalement urbain. Un ménage urbain consomme ainsi moins d'énergie pour le bâtiment qu'un ménage périurbain. L'îlot de chaleur urbain est nettement plus important dans les milieux urbains compacts et réduit les consommations pour le chauffage mais augmente la demande en climatisation. L'influence du stock bâti est partout plus importante que celle de l'îlot de chaleur urbain ce qui conduit les auteurs à affirmer que l'étalement urbain augmente les consommations d'énergie pour le bâtiment résidentiel et les émissions de gaz à effet de serre qui y sont liées. Remarquons toutefois, avec Randolph (2008), que l'assertion utilisée par Ewing and Rong (2008) liant étalement urbain et augmentation de la superficie bâtie (et donc des consommations) est évidente. Pour cet auteur, la forme urbaine est un concept peu approprié à l'étude de l'efficacité énergétique qui devrait se concentrer sur l'échelle du

<sup>6</sup> Un modèle de type DEM permet de stocker des informations en trois dimensions en utilisant une matrice en deux dimensions : chaque pixel représentant une hauteur.

<sup>7</sup> Il s'agit d'un terme utilisé pour caractériser une élévation localisée de la température en milieu urbain, en comparaison avec les zones périphériques.

logement. Des limitations importantes (utilisation de plusieurs bases de données différentes, etc.) questionnent aussi la reproductibilité des résultats.

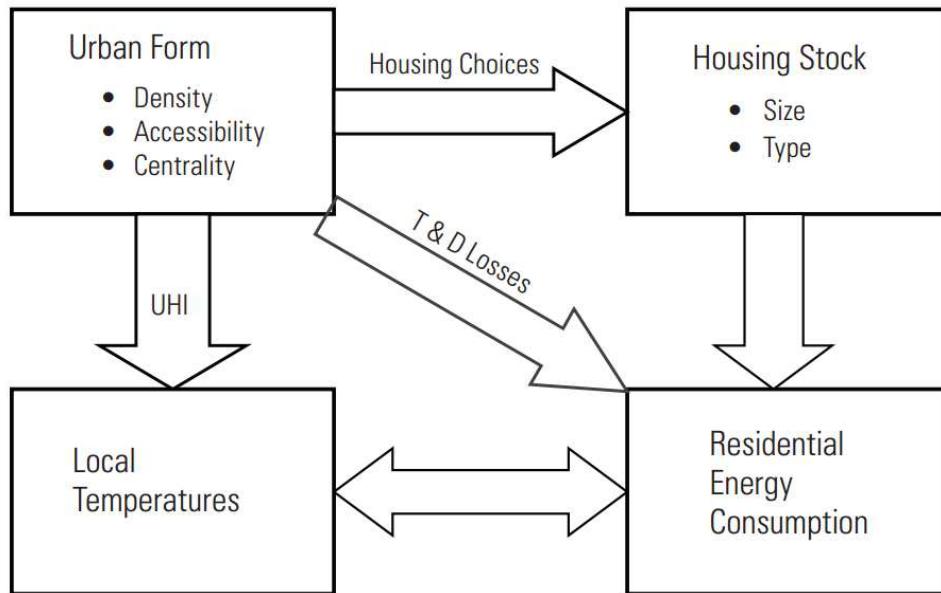


Figure III-3 : Cadre conceptuel proposé par Ewing and Rong (2008) pour lier forme urbaine et consommation d'énergie dans le secteur du bâtiment résidentiel.

Les caractéristiques de l'enveloppe du bâtiment, en particulier la compacité et la mitoyenneté, ont également été investiguées et il apparaît logiquement que les tissus de faible densité, notamment ceux composés d'habitations isolées de type « 4 façades » requièrent plus d'énergie pour le chauffage que les développements collectifs ou les habitations mitoyennes (Steadman et al., 1998, Ewing and Rong, 2008). Toutefois, ce type de développement dispersé et peu dense favorise des gains solaires potentiels plus importants. Le recours à des concepts d'architecture bioclimatique offre ainsi un plus grand potentiel de réduction des consommations attendues pour le chauffage et l'éclairage qu'en milieu urbain dense (Steemers, 2003).

Le domaine de la climatologie urbaine a également participé à augmenter les connaissances relatives à l'influence de la forme urbaine sur les consommations d'énergie dans le bâtiment, en particulier en étudiant l'impact du relief, des obstructions, des prospects, etc. sur la création d'îlots de chaleur urbains et le microclimat urbain. Si l'influence de la forme urbaine est avérée, son impact sur la consommation d'énergie dans les bâtiments n'est pas identifié.

Remarquons enfin, dans une perspective plus large, que l'organisation à l'échelle du quartier permet également de réduire le coût et d'augmenter l'efficacité des équipements collectifs (comme le chauffage urbain, le traitement des eaux ou des déchets) par rapport à des systèmes individuels (Hanson, 1996) alors que la localisation du quartier et ses caractéristiques en termes de mixité fonctionnelle notamment auront une influence sur les

habitudes de déplacements des habitants. Le choix de l'échelle du quartier répond ainsi à la nécessité de mettre en application un certain nombre de préceptes et de méthodes de gestion particuliers, qui touchent à l'énergie comme à d'autres thématiques comme les déplacements, les réseaux, etc. « *Situé entre l'échelle de la ville, qui peut présenter une complexité inhibante, et celle du bâtiment, trop parcellaire, l'échelle du quartier apparaît intéressante en termes opérationnels, car elle est particulièrement bien adaptée à l'expérimentation de pratiques spécifiques visant l'accroissement de la durabilité. Elle permet en effet d'appréhender la réalité urbaine dans une échelle suffisamment grande pour toucher à de multiples thèmes qui dépassent la dimension du bâtiment considéré, mais suffisamment restreinte pour visualiser des interventions concrètes* » (Rey, 2007) : p. 127. Le quartier constitue aussi un ensemble de vie cohérent et correspond mieux au niveau de résolution de nombreux problèmes (collecte des déchets, limitation des nuisances, etc.) (Cherqui, 2005), notamment en facilitant la concertation entre acteurs par rapport à des échelles plus larges.

En complément des consommations d'énergie en phase d'utilisation et dans le contexte de la montée en puissance de l'attention environnementale, l'analyse en cycle de vie (ou ACV) est devenue une partie indispensable du développement durable (Verbeeck and Hens, 2007). L'approche par analyse en cycle de vie (ACV) est ainsi adoptée le plus souvent au niveau international pour évaluer les impacts environnementaux d'un produit. Une analyse en cycle de vie se déroule traditionnellement en quatre phases : la définition des objectifs, l'inventaire, l'évaluation des impacts sur l'environnement et la recherche d'améliorations. Il s'agit de comptabiliser les substances émises et puisées dans l'environnement sur le cycle de vie d'un produit, depuis sa fabrication (y compris l'extraction des matières premières) jusqu'à sa fin de vie (y compris le traitement des déchets créés), en passant par toutes les étapes de son utilisation (ISO, 2006a, ISO, 2006b). La méthode d'analyse de cycle de vie consiste à évaluer les aspects quantifiables de la qualité environnementale et laisse donc de côté les aspects plus qualitatifs comme l'atteinte aux paysages, par exemple. Elle permet, via la quantification de l'ensemble des échanges physiques entre un système et son environnement, d'évaluer sa contribution à différents effets sur l'environnement, de préciser et d'expliciter les choix de réduction des impacts. En présentant des résultats détaillés, l'analyse en cycle de vie donne des possibilités de modélisation qui permettent de rechercher les améliorations du bilan global en tenant compte, en outre, des évaluations techniques, économiques et sociales.

En termes d'analyse en cycle de vie, les recherches et études présentées dans la littérature relative à la forme urbaine, aux bâtiments et aux questions énergétiques qui y sont liées ne concernent presqu'exclusivement que des bâtiments individuels (logements uni- ou multi-familiaux, bureaux, etc.). La prise en compte de la forme urbaine se limite, au mieux, à la prise en compte des masques environnants mais cet élément est souvent négligé. Il est important de rappeler que l'analyse en cycle de vie a été élaborée en premier lieu pour des produits industriels, construits en grandes séries. Son application au secteur du bâtiment, bien que fortement médiatisée à l'heure actuelle, doit donc s'effectuer de manière extrêmement prudente et prendre en compte les spécificités intrinsèques à notre domaine de recherche : chaque bâtiment est en général unique et entretient des liens forts tant avec le site dans lequel il s'implante qu'avec ses occupants, en fonction de leur mode de vie

(Peuportier and Polster, Non daté). La stabilité dans le temps sur laquelle repose l'analyse en cycle de vie est problématique dans le cas d'un bâtiment qui a une durée de vie longue (en comparaison avec les produits industriels classiquement soumis à analyse en cycle de vie) et qui subit de nombreuses modifications pendant sa durée de vie. Prévoir avec suffisamment de certitudes l'état des techniques de rénovation, de recyclage, de traitement des déchets des bâtiments à un horizon de quelques dizaines d'années est par nature fort difficile. La question de l'approvisionnement énergétique est également soumise à beaucoup de précaution, notamment dès lors qu'il est question de déterminer unanimement le mix énergétique utilisé pour la production de chaleur et d'électricité d'un bâtiment ou d'un quartier sur le long terme. La question des données et des inventaires utilisés pour réaliser les analyses en cycle de vie reste également problématique dans le sens où de nombreuses incertitudes pèsent sur ces inventaires et où la qualité des données d'entrée, que ce soit en termes de précision, de complétude ou de représentativité, peuvent affecter significativement les résultats. Blengini (2009) a réalisé une série d'études de sensibilité sur un bâtiment résidentiel multi-familial en comparant notamment différentes bases de données pour deux composants principaux (le béton et l'acier). Ses résultats montrent que les incertitudes restent acceptables pour les consommations d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre mais que les autres indicateurs sont plus fortement affectés par le choix de l'inventaire de données. De plus, un bâtiment est composé d'une multitude de matériaux différents, ce qui complexifie l'analyse. Enfin, la fin de vie des bâtiments, le recyclage de ses composants et les impacts liés aux chantiers sont rarement pris en compte ce qui limite l'application de ces outils pour traiter de l'impact de la démolition d'un bâtiment ou d'un quartier.

Au niveau des résultats proposés, les études relatives au cycle de vie des bâtiments mettent essentiellement en évidence l'impact environnemental important de la phase d'utilisation qui représente, selon les cas et les auteurs, de 80 à 98% de l'impact global sur le cycle de vie (Adalberth et al., 2001, Blengini, 2009, Huberman and Pearlmuter, 2008, Scheuer et al., 2003). Les phases de construction et de démolition représentent alors respectivement de 1 à 20% et de 0,2 à 5% des impacts totaux en cycle de vie.

### 2.3. Forme urbaine, transport et bâtiment

Peu d'études se sont attachées à étudier la question de la forme urbaine conjointement sur les secteurs du bâtiment résidentiel et du transport. Steadman (1979) et Steadman et al. (1998) sont les premiers à avoir pris en compte, de manière conjointe, les questions énergétiques relatives au transport et au bâtiment (logements et commerces<sup>8</sup>), en développant un point de vue théorique sur l'aménagement urbain qui aborde des critères de forme et de densité. Pour ces auteurs, une densité urbaine élevée pourrait réduire les besoins en énergie dans le secteur du transport mais contribuerait à augmenter les consommations d'énergie des bâtiments car les besoins en éclairage et en climatisation seraient plus élevés. Une densité élevée réduirait par ailleurs l'exploitation des gisements solaires tant en termes de conception bioclimatique que de potentiel en énergies

---

<sup>8</sup> Ils posent l'hypothèse que l'industrie est largement indépendante de la forme urbaine.

renouvelables solaires. Ils expliquent, qu'à l'inverse, un aménagement urbain peu dense contribuerait à un rendement énergétique plus intéressant dans le secteur du bâtiment, notamment grâce aux gains solaires importants, mais que la consommation d'énergie pour les déplacements des personnes augmenterait de manière significative. Les auteurs attirent toutefois l'attention sur le fait qu'une même densité urbaine peut engendrer des formes urbaines extrêmement contrastées et donc des consommations d'énergie très différentes. Dans la foulée des travaux de Steadman, d'autres auteurs (Maïzia et al., 2009, UrbanTaskForce, 1999, Randolph, 2008, Ewing and Rong, 2008) ont avancé que des formes urbaines plus compactes pourraient réduire de façon significative les consommations d'énergie, tant dans le secteur du transport que dans celui du bâtiment, en basant notamment leur argumentaire sur le fait qu'à niveau d'isolation équivalent, une maison « 4 façades » consomme plus d'énergie pour le chauffage qu'une maison mitoyenne.

Steemers (2003) a tenté d'identifier les interrelations entre consommations d'énergie dans le bâtiment et pour le transport en milieu urbain. Il relève que le transport urbain consomme environ deux fois moins d'énergie que les bâtiments et que ces deux secteurs sont intimement liés. Réduire le transport individuel en ville au profit des modes de transport collectif pourrait avoir un double effet favorable en termes de consommations d'énergie : une diminution des consommations d'énergie pour le transport, d'une part, car une voiture individuelle consomme plus, par personne.kilomètre, qu'un transport collectif et une diminution de la consommation d'énergie pour le bâtiment, d'autre part, car réduire la part des véhicules individuels en ville permettrait de réduire la pollution atmosphérique et donc de rendre plus courante la ventilation naturelle des bâtiments (par opposition au recours à l'air conditionné). Il est ainsi primordial, pour cet auteur, d'améliorer l'environnement urbain au sens large, notamment en privilégiant les transports publics performants, préalablement à l'augmentation de la densité de population, de façon à ce que les bénéfices généraux en termes énergétiques dépassent les effets négatifs mis en évidence (perte de gains solaires dans les bâtiments à cause de la densité, en particulier). Enfin, les mesures à prendre en termes de transport sont à favoriser car elles sont plus rapides à mettre en œuvre et induisent des conséquences locales (réduction locale de la pollution atmosphérique et sonore) alors qu'agir sur le bâtiment est plus complexe (si une voiture est remplacée tous les 10 ans au maximum, la durée de vie d'un bâtiment est nettement plus longue) et doit être envisagé à des échéances plus longues.

Holden and Norland (2005) ont réalisé une analyse sur 8 quartiers résidentiels d'Oslo en partant de l'hypothèse qu'il existe une connexion entre les caractéristiques d'occupation du sol et les consommations énergétiques des ménages en termes de chauffage et de transport. Ils ont montré que la ville compacte peut être une forme urbaine durable mais que la concentration décentralisée peut mener à des consommations énergétiques plus réduites, et ce, de trois façons : (1) tandis que la durée des transports journaliers diminue dans les zones densément peuplées, les aires urbaines centrales représentent le plus haut niveau de transport pour les loisirs, notamment en avion, (2) l'accès à un jardin privé limite les besoins de transports de loisirs, (3) la différence de consommation d'énergie entre un logement unifamilial et un logement collectif se réduit significativement pour les

logements construits après 1980, ce qui indique que certaines conclusions établies sur le logement efficace énergétiquement devraient être remises en question.

Norman et al. (2006) ont mis en évidence, sur base de données empiriques récoltées à Toronto, que les consommations d'énergie (qui comprennent ici les phases de construction et d'utilisation du bâtiment ainsi que le transport) par  $m^2$  des développements denses du centre ville (appartements, 150 logements par hectare) et des développements périurbains peu denses (maisons unifamiliales, 19 logements par hectare) sont similaires. Ramené à une personne, des différences significatives apparaissent en raison des plus grandes superficies bâties par personne en milieu périurbain. Les émissions de gaz à effet de serre dues aux bâtiments sont en effet 2,5 fois plus élevées en milieu périurbain. Celles dues aux déplacements en voiture et en bus sont respectivement 3,5 et 6,5 fois plus élevées que dans le centre.

### 3. Méthodes d'évaluation énergétique existantes

#### 3.1. Les modèles et méthodes relatives au transport

##### 3.1.1. Les modèles de base de l'économie spatiale

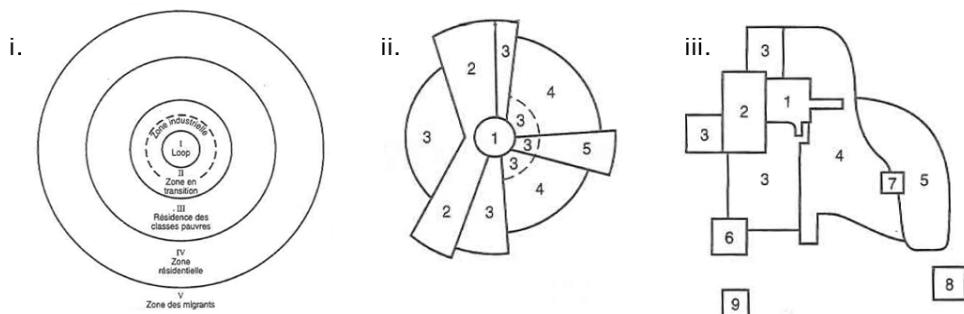
Les modèles de base de l'économie spatiale constituent les premières tentatives de modélisation des interactions entre utilisation du sol et transport. S'ils restent très théoriques, ils ont permis de comprendre certaines interactions relatives à la localisation des activités sur le territoire. Dès le début du 19<sup>ème</sup> siècle, Von Thünen a cherché à expliquer la localisation des activités agricoles (élevage, forêt, culture) autour des villes allemandes, sur base des rapports entre localisation et rente foncière, en fonction de la distance au centre. Il estime ainsi que la production d'une denrée agricole n'est rentable qu'à une certaine distance du marché : les productions de denrées ayant un coût de transport faible peuvent ainsi se localiser dans des zones où la rente foncière est faible. En 1964, Alonso étend la méthodologie aux choix résidentiels des ménages. Il lie proximité du centre et valeur foncière et développe le concept de rente d'enchères (bid-rent) qui représente le prix qu'un individu est disposé à payer, en chaque lieu, à utilité donnée pour un consommateur ou à profit donné pour un producteur (Mérenne-Schoumaker, 2003). A l'échelle inter-urbaine, le modèle de Christaller (1933) et la théorie des lieux centraux ont tenté d'expliquer, de façon théorique, la répartition spatiale, la taille, le nombre et la hiérarchisation des villes dans un espace régional, selon l'offre de biens proposés. Christaller identifie ainsi des centres de rangs différents (sept niveaux) dotés de caractéristiques propres en ce qui concerne les types de services qu'ils proposent. Ces centres sont reliés entre eux de façon à former un modèle constitué d'hexagones emboîtés.

##### 3.1.2. Les modèles de base de l'écologie urbaine

L'écologie urbaine, qui consiste en l'étude des interactions entre les êtres vivants et la ville, marque le début de l'application des sciences sociales à la ville (Cambien, 2011). Les

premiers modèles de base de l'écologie urbaine apparaissent au début du 20<sup>ème</sup> siècle et tentent de mettre en évidence le lien entre transport et forme urbaine. Ils restent toutefois assez descriptifs et analytiques. Ils tentent principalement d'expliquer la localisation des activités sur le territoire et les lieux de résidence de la population, en lien avec des caractéristiques sociales.

En 1925, Burgess a développé, au départ du cas de la ville de Chicago, un modèle concentrique constitué de cinq zones qui correspondent chacune à une spécialisation (Figure III-4). On retrouve, du centre à la périphérie, le centre d'affaires, la zone industrielle / en transition, la résidence des classes pauvres, la zone résidentielle et la zone des migrants qui s'organisent autour de noyaux plus dispersés. Hoyt (1939) a construit, sur base de l'étude de 142 villes américaines, un modèle basé sur les lieux de résidence, en relation avec la répartition des revenus. Il estime que la structure spatiale d'une ville ne résulte pas d'une répartition aléatoire des activités. Elle ne peut pas non plus être assimilée à des zones rectangulaires ou concentriques mais plutôt à des secteurs organisés selon une structure radiale et affectés par les infrastructures de transport (une cause principale de la création d'un secteur est par exemple le développement d'une ligne de chemin de fer). Le transport a donc un effet directionnel sur le territoire. Un troisième modèle, développé par Harris et Ullman, en 1945, tente de rendre compte des mutations qui touchent les villes américaines (augmentation de la motorisation des ménages, périurbanisation, etc.) et montre que les villes s'articulent, non plus autour d'un centre d'affaires central, mais plutôt autour de plusieurs noyaux différenciés et spécialisés qui sont liés par quatre caractéristiques : l'accessibilité différenciée (accès au rail, aux voies navigables, etc.), l'incompatibilité de certaines activités et l'attraction que d'autres exercent entre elles (par exemple les activités bancaires et les sièges de grandes entreprises), et la capacité à payer une rente foncière élevée (certaines activités ne peuvent se permettre de payer une rente élevée et se localiseront donc dans des zones plus abordables financièrement).



1. CBD, 2. commerce de gros et industrie légère, 3. résidences des classes, 4. résidence des classes moyennes, 5. résidence des classes riches, 6. industrie lourde, 7. centre secondaire des affaires, 8. banlieue résidentielle et 9. banlieue industrielle

Figure III-4 : Modèles d'utilisation des sols en milieu urbain : (i) généralisation du modèle de Burgess aux villes industrielles en croissance, (ii) modèle en secteur de Hoyt et (iii) modèle polynucléaire de Harris et Ullman, adapté de Carter (1995) par Mérenne-Schoumaker (2003).

Bien que ces modèles de base de l'écologie urbaine n'apportent que de faibles justifications théoriques et sont limités, voire dépassés, pour décrire la situation des villes actuelles, en particulier en Europe, ils ont fourni un cadre de simulation urbaine important et une base solide sur laquelle s'appuient des travaux plus récents (Deymier and Nicolas, 2005).

### 3.1.3. Les modèles d'interactions spatiales et de prédition des flux

Les premiers modèles d'interactions spatiales traitent de l'évolution des flux en fonction de la distance. Les modèles dits gravitaires, par analogie avec la loi de la gravitation d'Isaac Newton<sup>9</sup>, sont une application de ces interactions spatiales. Les interactions entre deux lieux dépendent ainsi de l'attraction de chacun (en termes de population, de richesse, etc.) et de la facilité des communications entre eux. Cette relation peut s'exprimer, dans sa version la plus simple, de la façon suivante, où  $F$  est le flux entre les lieux  $i$  et  $j$ ,  $P_i$  et  $P_j$  sont les populations des lieux  $i$  et  $j$ ,  $d$  la distance qui les sépare et  $k$  une constante fixée arbitrairement ou déterminée lors de l'ajustement du modèle (elle dépend notamment de la période de temps considérée) :

$$F_{ij} = k \cdot P_i \cdot P_j / d_{ij}$$

Les modèles gravitaires sont aussi couramment employés pour définir des zones de chalandise et des flux migratoires (voir notamment les travaux de Converse (1938)). Ils ont un pouvoir explicatif correct dans les zones où l'accessibilité est relativement homogène et les déplacements réguliers (par exemple les déplacements domicile-travail dans un bassin d'emploi considéré). Le principe de base des modèles gravitaires est aussi repris dans de nombreux modèles plus récents et plus complexes.

Les modèles gravitaires sont souvent considérés comme les précurseurs de formalisations théoriques plus générales des flux (Cambien, 2011). De nombreux modèles d'interactions entre transport et urbanisme (aussi appelés modèles « LUTI » pour Land Use Transport Interaction) et de prédition des flux ont ensuite été développés. Ils visent à considérer ensemble planification de l'urbanisation et politiques de transport, sous forme de systèmes, en identifiant les liens, interactions et rétroactions qui s'opèrent entre transport et urbanisation. Ils sont aussi appelés modèles intégrés. Remarquons que l'aspect « urbanisme » revendiqué par ces modèles n'aborde pas le stock bâti. Ces modèles diffèrent très fortement, notamment selon les échelles et temporalités considérées. La Figure III-5 présente, par exemple, la boucle de rétroaction des interactions entre transport et urbanisation définie par Wegener (1994) et qui repose sur les 5 sous-systèmes suivants :

- Le changement très lent : réseaux, occupation des sols.
- Le changement lent : lieux d'emplois, logements.
- Le changement rapide : emploi, population.
- Le changement immédiat : les décisions de déplacements.

---

<sup>9</sup> Cette loi stipule que l'attraction entre deux corps est proportionnelle à leur masse et inversement proportionnelle à la distance qui les sépare.

- Le changement « complexe » : l'environnement, qui subit des impacts directs et indirects, à court terme comme à très long terme.

Cette formalisation est à l'origine de nombreux autres modèles intégrés.

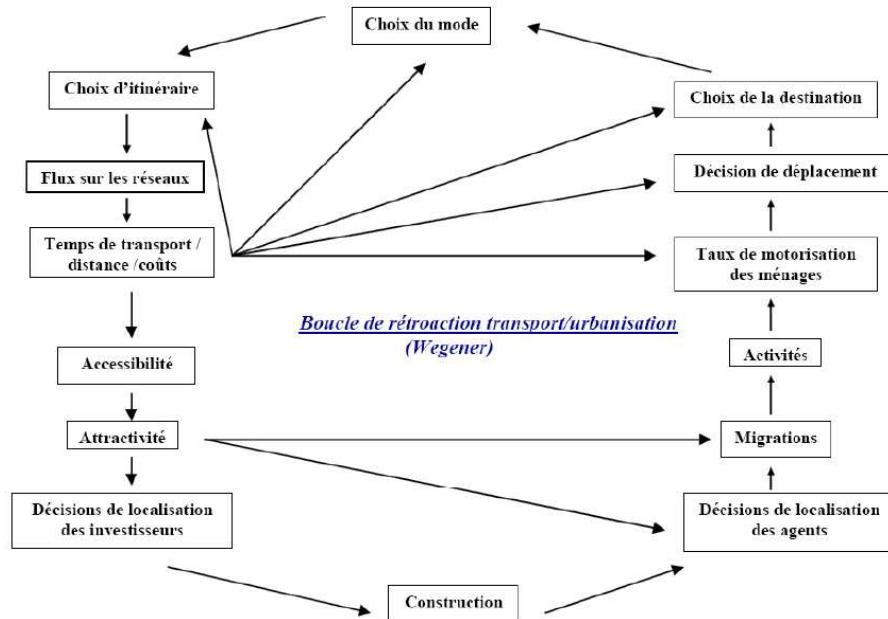


Figure III-5 : Boucles de rétroaction transport / urbanisme ©Wegener (1994), cité par Lefèvre (2007) et repris par Desjardins and Llorente (2009).

Les modèles LUTI sont ainsi devenus une réponse scientifique classique pour prendre en compte les mobilités quotidiennes et résidentielles dans une aire urbaine (Antoni, 2011). Les modèles LUTI proposent toutefois des approches parfois très différentes en ce qui concerne les éléments théoriques sur lesquels ils sont basés, les techniques de modélisation utilisées ou les temporalités, plus ou moins longues, prises en considération. Wegener (2004) a proposé une synthèse de nombreux modèles de type LUTI<sup>10</sup> et mis en évidence des caractéristiques communes : ces modèles ont un caractère prospectif ou prédictif qui prend en compte des caractéristiques relatives au secteur du transport (infrastructures, flux, etc.) et des caractéristiques relatives à l'utilisation du sol (localisation des résidences, etc.). Ils sont utilisés dans une optique générale de réduction des consommations et des émissions de gaz à effet de serre. Au-delà de ces caractéristiques communes, chaque modèle possède ses spécificités propres et ses limitations. Ces modèles imposent donc de faire des choix, parfois très restrictifs, et d'interpréter les résultats en conséquence et dans le champ de conditions au sein duquel ils sont valables (les considérations relatives à l'influence de la rente foncière sur la localisation des activités ne sont par exemple pas prises en compte). S'ils sont très intéressants pour appréhender les interactions entre occupation des sols et génération de

<sup>10</sup> On citera, par exemple, TRANUS (Transport and land-use model, Venezuela) qui comprend un système de localisation des ménages et des activités et un système de transport basé sur l'offre multimodale, URBANSIM (Microeconomic model of location choice of households and firms, USA), TESIS (Transportation and environment strategy impact simulator, Australie), etc.

flux et pour évaluer et comparer l'impact de scénarios prospectifs, ils restent toutefois une représentation, parfois très simplifiée, d'une réalité complexe. Nous renvoyons le lecteur intéressé par plus de détails sur la comparaison des modèles existants aux nombreux travaux sur le sujet (en particulier ceux de Wegener).

Parmi les exemples d'application de ces modèles, on peut citer le travail de Steadman et al. (1998) qui ont évalué 5 scénarios d'évolution différents grâce au modèle TRANUS (modèle de simulation de l'utilisation des sols et des transports). Etant donné un réseau de transport et une distribution des emplois, le logiciel calcule la distribution des autres activités (logements, services, etc.) en zones, selon les contraintes de terrains disponibles. Il prédit ensuite le nombre de déplacements qui en résultent (domicile-travail et domicile-services), séparés par mode de transport (voiture privée, bus). Ces déplacements sont attribués aux routes du réseau en prenant en compte les temps de déplacements et les effets de congestion. Le modèle permet de calculer les consommations de carburant pour les secteurs du bâtiment domestique et du transport des personnes.

### 3.1.4. Les méthodes basées sur des enquêtes statistiques

Evaluer les consommations énergétiques, ou les émissions, attribuables au transport des personnes nécessite de connaître les flux de déplacements (kilomètres parcourus, modes de transport utilisés, etc.). Un certain nombre de méthodes proposent d'utiliser des données existantes, provenant notamment des recensements nationaux de population. Nous présentons ci-dessous quelques méthodes et approches qui exploitent ce type de données pour estimer les consommations d'énergie et/ou les émissions de gaz à effet de serre relatives aux déplacements des personnes.

Le « Bilan Carbone » est une méthode développée par l'ADEME<sup>11</sup> qui permet de comptabiliser les émissions de gaz à effet de serre d'une entreprise ou d'une collectivité. Le tableur développé permet d'estimer les émissions de gaz à effet de serre engendrées par une activité, soit directement (à cause d'une chaudière par exemple), soit indirectement (à cause de l'électricité utilisée, du transport des matériaux, de la construction d'un bâtiment, de la fin de vie des déchets, etc.). Le but de la méthode « Bilan Carbone » est de fournir un diagnostic qui servira à la mise en place d'actions visant à réduire les émissions de gaz à effet de serre. Le module « territoire » applique cette vision globale (émissions directes et indirectes) à l'ensemble des activités prenant part sur un territoire donné. En ce qui concerne les transports des personnes, la méthode se base sur une enquête transport menée en 1993 et en 1994 par l'INSEE<sup>12</sup> qui donne le nombre de déplacements, la distance parcourue et la répartition modale pour 8 zones en France. Les émissions de gaz à effet de serre sont obtenues grâce à un coefficient qui dépend du parc automobile français et de ses performances. Pour calculer les émissions attribuables à un

---

<sup>11</sup> L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) est un établissement public français à caractère industriel et commercial, placé sous la tutelle conjointe des ministères en charge de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie et de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche. L'ADEME participe à la mise en œuvre des politiques publiques dans les domaines de l'environnement, de l'énergie et du développement durable. <http://www2.ademe.fr>, consulté en décembre 2009.

<sup>12</sup> L'Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques (INSEE) a pour mission la collecte, la production, l'analyse et la diffusion des informations sur l'économie et la société françaises.

utilisateur des transports en commun pour le trajet domicile-travail, la méthode utilise simplement la distance moyenne française (12 km) multipliée par 220 jours ouvrables et un coefficient qui permet de donner des émissions de gaz à effet de serre (ADEME, 2007).

En Belgique, les cartes d'accessibilité de la CPDT<sup>13</sup> exploitent également les données provenant d'enquêtes statistiques, ici le recensement général de la population réalisé par l'INS<sup>14</sup> en 1991 (« recensement de la population et des logements au 1<sup>er</sup> mars 1991 »). Ces données sont disponibles à l'échelle fine du secteur statistique<sup>15</sup>. L'objectif de ces cartes d'accessibilité est d'identifier les lieux où il existe une bonne accessibilité par les modes alternatifs à la voiture et de les distinguer de ceux où il existe une forte dépendance à la voiture individuelle. La mesure représente ainsi une estimation de la répartition modale associée à un lieu. L'accessibilité mesurée tient compte de l'offre en bus et en train ainsi que de la facilité à se déplacer à pied et en vélo. Pour l'accessibilité en transports en commun, l'étude prend en compte la fréquence de passage des trains et des bus aux gares et aux arrêts et la distance entre ces gares et arrêts et chaque point du quartier (carré de 50 pixels). Pour les modes doux, les critères utilisés pour quantifier l'accessibilité sont la densité de population et une fonction basée sur la probabilité de se déplacer uniquement à pied ou à vélo qui dépend de la distance à parcourir. Parmi les hypothèses considérées, il est admis qu'un marcheur ne parcourt pas plus de 500 mètres et/ou ne gravit pas plus de 60 mètres sur cette distance<sup>16</sup>. Les cartes d'accessibilité traitent uniquement des déplacements domicile-travail et sont établies au lieu de résidence et au lieu de travail. L'outil permet, lors de tout projet d'urbanisation, d'analyser sa localisation sous l'angle de l'accessibilité par les alternatives à la voiture mais ne donne pas de données chiffrées sur les consommations énergétiques ou les émissions de gaz à effet de serre associées à ces déplacements.

L'IBI group (2000) a développé, pour la Société Canadienne d'Hypothèques et de Logement et pour Ressources Naturelles Canada, un modèle des émissions de gaz à effet de serre provenant du transport urbain des personnes. Ce modèle permet de faire varier certaines caractéristiques des quartiers, la composition socio-économique et des facteurs de localisation. L'approche adoptée est basée sur des régressions multivariées qui permettent d'examiner comment une seule variable dépendante est affectée par les valeurs d'une ou plusieurs variable(s) indépendante(s). Le modèle IBI est composé de 3 sous-modèles : la possession d'une voiture, les véhicules-kilomètres relatifs à la voiture et

---

<sup>13</sup> La Conférence Permanente du Développement Territorial (CPDT) est une plate-forme multidisciplinaire de recherches, de formation et d'échanges qui rassemble des chercheurs de trois Universités (Université Libre de Bruxelles, Université catholique de Louvain et Université de Liège). Ses travaux constituent un outil d'aide à la décision pour le Gouvernement wallon.

<sup>14</sup> L'Institut National des Statistiques (INS), maintenant dénommé Direction générale Statistique et Information économique (DGSIE) assume la responsabilité de produire les statistiques nationales (officielles) de la Belgique. Elle est également chargée de la production de statistiques européennes. <http://stabel.fgov.be>, consulté en mai 2012.

<sup>15</sup> Les secteurs statistiques peuvent se définir comme étant la plus petite unité territoriale pour laquelle des informations statistiques existent. En zone urbaine, le secteur statistique se rapproche de la notion de quartier avec des caractéristiques structurelles d'ordre social, économique et/ou architectural spécifiques. <http://sder.wallonie.be>, consulté en décembre 2009.

<sup>16</sup> <http://cpdt.wallonie.be>, consulté en décembre 2009.

les passagers-kilomètres relatifs aux transports en commun. Un tableur est mis en place afin de faciliter l'utilisation du modèle mathématique pour évaluer les propositions d'aménagement en fonction des émissions de gaz à effet de serre. L'utilisateur introduit des données sur les caractéristiques du quartier et l'outil prévoit les émissions, par ménage, provenant des déplacements. Les résultats obtenus au moyen de l'outil servent à traiter, dans le cadre de l'étude, de la durabilité de 9 scénarios de quartiers. Ces scénarios sont obtenus par croisement de 3 concepts de quartiers (lotissement de faible densité monofonctionnel, lotissement de densité moyenne et lotissement néo-traditionnel) et de 3 contextes urbains (secteur interne, banlieue interne et banlieue externe, situés respectivement à 5, 10 et 30 kilomètres du centre-ville et intégrant divers degrés d'accès aux emplois et aux transports en commun). Le tableur a été élaboré à partir de données provenant d'un recensement réalisé pour la région métropolitaine de Toronto mais il n'a pas été testé ou validé pour d'autres villes.

Plus récemment, Boussauw and Witlox (2009) ont développé un indice de performance des déplacements domicile-travail et l'ont appliqué à la Flandre et à la Région de Bruxelles-Capitale (Belgique). Elaboré sur base des données du dernier recensement général de la population de l'INS (« Enquête socio-économique 2001 » ou ESE2001), cet indice de performance, ensuite réutilisé par Dujardin et al. (2012a), représente la consommation d'énergie moyenne d'un travailleur vivant dans le secteur statistique considéré. Il prend en compte le mode de transport principal utilisé pour les déplacements domicile-travail et le nombre de kilomètres parcourus. Des coefficients de consommation, empruntés à De Vlieger et al. (2006), sont utilisés pour convertir les distances parcourues par mode de transport en kWh. Cet indice doit permettre de quantifier les consommations d'énergie relatives aux déplacements domicile-travail, à l'échelle des secteurs statistiques. L'objectif de cette recherche était d'investiguer le lien entre la structure spatiale du territoire et les consommations d'énergie pour les déplacements domicile-travail à l'échelle régionale, et, en particulier, de cartographier des différences en termes de consommations d'énergie pour les déplacements domicile-travail à l'échelle urbaine. Les auteurs ont mis en évidence que le critère le plus important dans les consommations d'énergie pour les déplacements domicile-travail était la distance alors que le mode de transport utilisé n'a qu'un impact faible. La densité et la proximité d'infrastructures de transport jouent également un rôle dans la variation de l'indice de performance des déplacements domicile-travail mais leur impact dépend de la situation locale spécifique.

Ces quelques études basées sur des données empiriques permettent de donner des grandes tendances en termes de transport et restent relativement simples dans leur élaboration ou dans leur utilisation pour celles qui mènent à un outil concret. Il convient toutefois de prêter attention à trois éléments : la fiabilité des données utilisées, l'échelle de travail et la reproductibilité des résultats. Ces méthodes sont en effet basées sur des données locales qui présentent des spécificités et la transposition des résultats présentés ou des outils mis en place à d'autres territoires n'est pas envisageable. Enfin, derrière les tableurs proposés se cachent parfois des approximations importantes.

### 3.1.5. Les méthodes simplifiées

Enfin, à titre d'information, signalons que l'émergence des considérations environnementales et de durabilité dans de nombreux domaines, dont la construction et l'aménagement du territoire, ont conduit, comme nous l'avons déjà évoqué, au développement de méthodes de sensibilisation, d'évaluation des projets ou d'aide à la décision proposant aux concepteurs et autorités des outils simples pour évaluer la qualité environnementale des nouveaux développements ou des projets de rénovation de quartiers existants. Certaines de ces méthodes proposent un volet dédié spécifiquement au transport et permettent d'évaluer son impact en termes de consommations de ressources ou d'émissions de gaz à effet de serre.

Le logiciel d'analyse de cycle de vie EQUER est dédié à l'analyse en cycle de vie des bâtiments. Il propose toutefois de prendre en compte le transport des habitants, en parallèle à 4 autres domaines (l'eau, les déchets, les matériaux et l'énergie) qui sont décrits plus bas, dans la section relative aux méthodes d'analyse en cycle de vie. En fonction du type de site choisi (choix parmi les 4 possibilités suivantes : urbain, banlieue, rural ou isolé), des valeurs par défaut sont proposées pour les distances domicile-travail, domicile-école et domicile-commerce. Il est toutefois possible de modifier ces valeurs par défaut. Les autres paramètres pris en compte sont la présence de pistes cyclables, le pourcentage d'occupants effectuant le trajet journalier domicile-travail et le mode de transport en commun utilisé (train ou bus). Le modèle repose sur une série d'hypothèses très fortes sur la fréquence des trajets et leur nature :

- Les trajets domicile-travail sont effectués 5 jours par semaine et 47 semaines par an.
- Les trajets domicile-commerce sont effectués une fois par semaine pendant 47 semaines par an.
- Si la distance domicile-travail est inférieure ou égale à 250 mètres, le logiciel considère que ces trajets sont réalisés à pied ou à vélo.
- Si la distance domicile-arrêt du transport en commun est supérieure à 500 mètres, alors les trajets domicile-travail sont effectués en voiture, sinon ils sont effectués en transport en commun et le trajet domicile-arrêt du transport en commun est effectué à pied ou à vélo.
- Si la distance domicile-commerce est supérieure à 300 mètres, alors ces trajets sont effectués en voiture, sinon ils sont effectués à pied ou à vélo.

L'approche « transport » proposée par EQUER est assez réductrice et, si elle peut être utile dans le cadre d'une rapide comparaison entre deux sites d'implantation potentiels par exemple, elle reste trop simplifiée dans le cadre de l'étude qui nous occupe. On peut aussi remarquer que la méthode ARIADNE d'analyse environnementale à l'échelle du quartier (non disponible actuellement) se base en partie sur EQUER mais ne propose aucun complément quant à la prise en compte du transport des personnes dans l'évaluation.

L'étude SOLUTIONS (EPSRC, 2009) s'inscrit dans un contexte de pressions pour de nouveaux développements autour de la ville de Cambridge. L'objectif est de développer et d'évaluer, dans un contexte de développement durable, quatre scénarios alternatifs

d'urbanisation qui pourraient être appliqués dans les 30 prochaines années. L'étude, qui part du principe que les développements périurbains existants compromettent le développement durable, concerne le design, la forme urbaine et le transport et aborde tant les aspects quantitatifs que qualitatifs. Quatre types de développements sont définis sur base des pratiques anglaises : les « pods » (« culs-de-sac » monofonctionnels), les « cells » (développement de quartiers indépendants), les « cluster » (quartiers reliés entre eux) et les « linear » (développements mixtes le long des voies de transport principales). Un système d'indicateurs de durabilité est défini et comprend les éléments suivants :

- La superficie de terrains nécessaires pour construire le nouveau développement (nombre d'hectares par habitant).
- La distance moyenne de tous les logements à la sortie du développement.
- L'accessibilité aux écoles et commerces de proximité (appréhendée via le pourcentage d'habitants qui se situent à moins de 600 mètres d'une école primaire, moins de 1.500 mètres d'une école secondaire, moins de 800 mètres d'un centre local ou d'un supermarché).
- L'accessibilité aux transports publics (le critère est évalué comme « bon » s'il y a entre 5 et 11 services par heure, « médiocre » pour 2 à 4 services par heure et « pauvre » s'il y a moins de 2 services par heure). La distance à l'arrêt doit être inférieure à 400 mètres, sauf dans le cas d'un transport très fiable et régulier où une distance à l'arrêt de 600 mètres est admise.
- L'accessibilité à des espaces ouverts (distance à un parc, à la campagne, etc.).
- Les déplacements à vélo et à pied.
- La vitalité du commerce.
- L'acceptabilité politique et publique (approche qualitative basée sur des entretiens).
- La faisabilité institutionnelle et le marché (approche qualitative basée sur des entretiens).
- La praticabilité physique.

La méthode proposait à l'origine une approche assez simplifiée permettant de donner un état des lieux grâce à une évaluation rapide de chacun des indicateurs ci-dessus, sur base de l'observation. Elle a ensuite été élargie pour introduire les données relatives à chaque région dans des modèles qui prévoient le comportement probable des usagers jusqu'en 2031 et évaluent les impacts attendus des options alternatives. L'énergie utilisée pour les transports est évaluée avec le modèle TEMMS<sup>17</sup> et l'énergie consommée par les bâtiments est dérivée de profils types et d'une enquête logement. La méthode permet de calculer l'utilisation d'énergie dans le domaine du transport en abordant la longueur des routes, les flux de véhicules et la vitesse en fonction des consommations d'essence et d'énergie répertoriées pour 72 classes de véhicules.

---

<sup>17</sup> Le modèle TEMMS (pour Transport Emissions Modelling and Mapping Suite), développé par l'Université de Leeds, permet de modéliser et cartographier les émissions relatives au trafic routier en milieu urbain. Il est couplé au modèle anglais de trafic SATURN qui calcule les flux de véhicules, les vitesses et les consommations NAMDEO, A., MITCHELL, G. & DIXON, R. 2002. TEMMS: an integrated package for modelling and mapping urban traffic emissions and air quality. *Environmental Modelling & Software*, 17, 177-188.

## 3.2. Les méthodes relatives au bâtiment et au quartier

La recherche de la durabilité urbaine pose le problème de savoir comment évaluer les propositions pour de nouveaux développements ou simplement les améliorations à apporter aux bâtiments et quartiers existants pour en augmenter la durabilité. Sans une base acceptée pour comparer des alternatives, il peut être difficile de justifier le choix d'un projet par rapport à un autre. Les méthodes pour évaluer / mesurer la durabilité à l'échelle du quartier peuvent être regroupées en 3 catégories :

- Les méthodes basées sur des simulations thermiques et des modèles mathématiques.
- Les analyses en cycle de vie.
- Les méthodes simplifiées de type check-list.

### 3.2.1. Les méthodes basées sur des simulations thermiques et modèles mathématiques

Plusieurs approches existent dans la littérature en ce qui concerne les méthodes visant à mettre en lumière les relations entre forme urbaine et consommation d'énergie. On peut distinguer deux types d'approches de modélisation urbaine : les approches de type « top-down » et les approches de type « bottom-up ».

Les approches de type « top-down » considèrent le secteur résidentiel comme une consommation d'énergie globale et ne se préoccupent pas des utilisations finales différencierées, à l'échelle individuelle. Elles utilisent des valeurs de consommations d'énergies globales (via les données de consommations provenant des fournisseurs d'énergie, par exemple) et, sur base de régressions, étudient l'influence de variables telles que les indicateurs macroéconomiques (produit intérieur brut, taux de chômage, revenus des ménages, inflation, etc.), le prix de l'énergie et le climat général sur la consommation d'énergie globale du secteur du logement (Swan and Ugursal, 2009). Ces méthodes manquent de précision sur le comportement du stock bâti et ne permettent pas de rendre compte de l'impact de stratégies précises appliquées à l'échelle des bâtiments et des quartiers.

Les approches de type « bottom-up » extrapolent la consommation d'énergie estimée d'un ensemble donné (aire urbaine, région, pays) au départ de la consommation d'énergie d'éléments représentatifs de cet ensemble (logements, maisons, quartiers, etc.). Plusieurs approches de type « bottom-up » peuvent être distinguées suivant les données de base et les méthodes utilisées.

- La première approche est basée sur les modèles de simulation de bâtiments et de quartiers. Steemers (2003) a par exemple analysé des fenêtres de 400 mètres de côté dans la ville de Londres avec un outil de type LT<sup>18</sup>. L'objectif est d'établir des relations entre forme urbaine et énergie en considérant aussi des caractéristiques détaillées des

---

<sup>18</sup> Les modèles LT (pour Lighting and Thermal) sont des outils de simulation permettant de calculer les consommations d'énergie des bâtiments. Ces modèles sont adaptés à des analyses à l'échelle urbaine car elles permettent de rendre compte, de façon suffisamment précise, des interactions et flux entre bâtiments sans demander de temps de calcul trop importants. Elles requièrent toutefois l'introduction de nombreuses données d'entrée : caractéristiques thermiques des parois, réflexions, etc.

bâtiments (conductivité thermique des parois extérieures, pourcentage de fenêtres, etc.). L'analyse est basée sur trois paramètres géométriques (profondeur des bâtiments, prospect de la rue, compacité). Une analyse similaire est réalisée par Ratti et al. (2005). Les indicateurs sélectionnés par ces auteurs sont les distances entre façades, leur orientation et les obstructions à l'éclairage. L'analyse est appliquée à trois villes. L'avantage de cette approche est de permettre de singulariser l'impact de la forme urbaine sur la consommation d'énergie, bien que cette recherche couvre uniquement l'énergie du bâtiment et pas les transports. Maïzia et al. (2009) adoptent une approche relativement similaire, basée sur des simulations énergétiques appliquées à des blocs urbains (îlots) représentatifs.

- La seconde approche est basée sur des modèles statistiques qui visent à prédire la consommation des bâtiments. Le modèle EEP<sup>19</sup>, par exemple, développé par l'Université de Cardiff et l'« Engineering and Physical Science Research Council » a pour objectif de quantifier les consommations énergétiques et les émissions de CO<sub>2</sub> d'aires urbaines en prenant en compte les bâtiments, résidentiels et non-résidentiels, le transport et l'industrie. Il se base pour ce faire sur plusieurs sous-modèles qui abordent chacun de ces thèmes. L'outil est un outil d'aide à la décision et à la planification de villes plus durables. Il est utilisé par certaines autorités locales au Royaume-Uni. La méthodologie adoptée pour évaluer la consommation énergétique des bâtiments résidentiels se base sur une typologie des bâtiments réalisée principalement sur base de leur forme (20 groupes sont définis sur base de la surface chauffée, de la façade, du ratio fenêtres / murs, de la hauteur des étages, du périmètre exposé, de la typologie des bâtiments (mitoyen, etc.) et de leur âge (Jones et al., 2000)). A chacun des 100 types de bâtiments identifiés dans la classification typologique sont attribuées deux valeurs : une consommation d'énergie annuelle et une émission de CO<sub>2</sub>, calculées sur base d'enquêtes statistiques. Les sous-modèles sont tous validés, à l'exception de celui qui concerne les transports. Cet outil permet de comparer différentes politiques énergétiques au niveau urbain. La forme urbaine n'est pas prise en compte directement, mais intervient au travers de la typologie des bâtiments. Il est également possible d'appliquer cette méthode à des agglomérations urbaines plus larges, mais cela requiert de classifier tous les types de bâtiments de l'agglomération et donc d'étendre la classification typologique existante.
- La troisième approche est basée sur l'estimation des consommations d'énergie pour différents types d'occupation du sol. L'avantage de cette approche est de couvrir une large gamme d'occupation et de coupler bâtiment et transport. Steadman et al. (1998) ont adopté cette approche pour comparer différentes organisations urbaines de la ville de Swindon (ville compacte, développement polycentrique le long de lignes de transports, lotissements dispersés, etc.). Cette approche dépend fortement de la qualité et de la disponibilité des données pour les usages sélectionnés ainsi que du type de bâti (multi étages, maisons isolées, etc.). L'impact de la forme urbaine est ici évalué à l'échelle de l'agglomération et pas à celle, plus opérationnelle, du fragment urbain.

---

<sup>19</sup> Energy and Environmental Prediction model

L'utilisation de modèles mathématiques est souvent présentée comme l'approche la plus crédible pour améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments et des quartiers, dans une optique globale de durabilité. Cette approche permet, en particulier, de quantifier<sup>20</sup> certains aspects de l'environnement urbain, de prendre en compte un grand nombre de paramètres qui influencent la consommation énergétique et le comportement thermique des bâtiments et des quartiers et de mener des variations paramétriques visant à identifier les paramètres les plus influents et tester l'impact de différentes stratégies d'intervention. Elle permet ainsi de faire des simulations d'évolution de la consommation d'énergie en fonction de l'évolution de différents paramètres, ce qui n'est pas possible dans une approche basée sur des chiffres globaux de consommation (approches de type « top-down »).

### **3.2.2. Les méthodes d'analyse en cycle de vie (ACV)**

Les méthodes décrites ci-dessous sont des méthodes d'analyse en cycle de vie développées pour être appliquées aux échelles du bâtiment et du quartier, même si les approches développées à l'échelle du quartier restent encore assez peu répandues et l'outil mentionné non disponible à l'heure actuelle. Ces méthodes sont couplées à des outils de simulation thermique dynamique, qui permettent, en amont, de déterminer de façon précise, le comportement thermique d'un bâtiment.

- Le projet EQUER consiste à développer un outil d'évaluation de la qualité environnementale des bâtiments sur 4 phases (construction, utilisation, rénovation, démolition) afin d'aider les acteurs à mieux cerner les conséquences de leurs choix. C'est un outil de simulation simplifié qui permet de modéliser la construction, l'utilisation, le renouvellement des composants et la déconstruction d'un bâtiment, en tenant compte de la réutilisation et du recyclage éventuels. Le principe général suivi est d'améliorer la qualité de l'ambiance intérieure tout en réduisant les impacts environnementaux externes. L'objectif fonctionnel fixé est que le bâtiment doit permettre un certain nombre d'activités pour lesquelles il est prévu, avec un certain niveau de confort, de qualité de vie, etc. Ensuite, il faut chercher à minimiser l'impact environnemental en comparant des variantes répondant aux exigences fonctionnelles énoncées. L'objet d'étude, l'unité fonctionnelle au sens de l'analyse en cycle de vie, est donc un bâtiment répondant à ces exigences et considéré sur une certaine durée. Le champ d'analyse est élargi et permet des études plus globales : l'énergie, par exemple, n'est plus considérée comme une simple quantité de kWh mais appréhendée selon une série de critères environnementaux et ne concerne pas que le chauffage et l'éclairage du bâtiment. D'autres aspects non liés à l'énergie, sont pris en compte, de façon très simplifiée : la gestion de l'eau, les déchets et le transport des personnes. La méthode EQUER a été élaborée par une équipe comportant deux centres de recherches (le centre d'énergétique de l'école des mines et l'institut d'évaluation des risques industriels (INERIS)) et des professionnels de la construction. La base de

---

<sup>20</sup> Le sommet de la terre de Rio, par exemple, affirme, dès 1992, la nécessité de disposer d'une information quantitative pour mesurer les progrès vers la durabilité. Dans son chapitre 40, l'Agenda 21 invite les pays signataires à élaborer des indicateurs de développement durable (IDD) afin qu'ils constituent une base utile pour la prise de décision.

données Oekoinventare (version 1996), aussi connue sous le nom de Ecoinvent, et des données collectées dans le cadre du projet européen REGENER sont utilisées en ce qui concerne les impacts de fabrication des matériaux de construction et des autres procédés (Peuportier and Polster, Non daté). L'étude se réalise pour un bâtiment en particulier et les sorties se font sous forme d'éco-profil à 12 indicateurs environnementaux. Le logiciel ARIADNE complète un ensemble d'outils élaborés à l'échelle du bâtiment, dont le logiciel d'analyse en cycle de vie des bâtiments EQUER pour l'évaluation environnementale de chaque type de bâtiments du quartier. Il prend également en considération les autres composantes du quartier, y compris leur utilisation pendant le cycle de vie du quartier (pertes, consommation d'eau, d'électricité, etc.). C'est un outil d'analyse en cycle de vie d'un quartier, applicable aux projets d'aménagement dans le cadre du développement durable. Il permet de comparer différents projets ou alternatives (Popovici, 2006). Ce logiciel est toujours en phase de développement.

- La méthode ADEQUA développée dans le cadre de la thèse de doctorat de F. Cherqui se situe à l'interface entre méthode de type « check list » et analyse en cycle de vie. L'objectif est de proposer un outil d'aide à la décision lors de la réalisation ou de la réhabilitation d'un quartier résidentiel pour pouvoir visualiser les conséquences, positives et négatives, d'un projet. La démarche est basée sur 8 objectifs évalués à partir d'un ensemble d'indicateurs dont la grande majorité est quantifiable. La comparaison des alternatives est réalisée sur base de diagrammes « radar » qui permettent à l'utilisateur d'interagir grâce à la visualisation immédiate des changements en fonction de la modification des données (Cherqui, 2005). Cet outil fait l'objet d'améliorations et de tests et n'est pas disponible.
- Les feuilles de calcul ACV développées par Rossi et al. (2012a et 2012b) enfin, sont basées sur les inventaires Oekoinventare (version 1996), BEES et CRTI. Elles permettent d'évaluer les consommations d'énergie et les émissions de CO<sub>2</sub> relatives à un bâtiment individuel sur son cycle de vie. Le mix énergétique, le climat ou le système constructif (structure acier vs. structure béton) peuvent être rapidement paramétrés pour permettre la comparaison de plusieurs cas d'études.

Les limites principales des approches en cycle de vie portent en grande partie sur l'incertitude qui pèse sur les données d'entrée nécessaires à l'évaluation. L'analyse des résultats d'une analyse en cycle de vie « brute » d'un bâtiment ou d'un quartier devrait par ailleurs être mise en perspective avec d'autres aspects importants liés au cadre bâti, à la qualité de vie et aux aspects de type socio-économique, non pris en compte dans l'évaluation.

On pointera encore l'imprécision des évaluations des indicateurs (sur l'évaluation des flux et l'agrégation des effets) et les erreurs liées à la période d'analyse (il est difficile de prévoir l'évolution des techniques constructives et des méthodes de recyclage opérationnelles dans quelques dizaines d'années). L'analyse en cycle de vie est donc un outil utile pour comparer l'impact de deux variantes mais les résultats doivent être étudiés et communiqués avec beaucoup de précaution.

### 3.2.3. Les méthodes simplifiées de type « check list »

Enfin, les méthodes de type « check list » ou méthodes par points sont des méthodes d'évaluation de la durabilité très simplifiées qui sont constituées d'un certain nombre de critères avec cases à cocher. Si elles ne donnent pas de résultats chiffrés et restent très superficielles, elles tirent leurs avantages de leur simplicité d'utilisation et peuvent constituer un outil d'accompagnement et de sensibilisation utile pour les collectivités locales encore peu rodées aux concepts de la durabilité urbaine. Elles ne peuvent toutefois prétendre constituer un réel outil d'aide à la conception. Indirectement symptomatique de l'émergence relativement récente du champ d'investigation qu'est le quartier, les multiples labels (HQE, valideo, Lense, etc.) qui fleurissent aujourd'hui se limitent souvent à l'échelle du bâtiment individuel (Gontier, 2005). La méthode BREEAM, par exemple, a été élaborée par le Building Research Establishment au Royaume Uni. Le principe sur lequel elle se base consiste à accorder des points (« crédits ») à un projet en fonction de critères de performance (besoins énergétiques, émissions de CO<sub>2</sub>, etc.) ou techniques (présence d'un local vélo, hotte dans la cuisine, etc.). Le nombre de points accordé à chaque niveau de performance et à chaque technique n'a pas été justifié par un bilan environnemental, ce qui serait sans doute très difficile en toute généralité. Le principal intérêt de cette méthode est de constituer une « check list » permettant de ne pas oublier un point important dans la conception ou l'évaluation d'un projet. Son succès auprès des promoteurs tient aussi dans sa simplicité d'usage. La méthode a été étendue à l'évaluation de la durabilité des quartiers, sous l'appellation « BREEAM for Communities » et aborde huit domaines (climat et énergie, design urbain, participation, écologie, transport, ressources, économie et bâtiments).

A l'échelle du quartier toujours, la méthode HQE2R (haute qualité environnementale et économique dans la réhabilitation et le renouvellement des quartiers) est un projet de recherche et de démonstration, co-financé par la Commission Européenne. Il a réuni, entre 2001 et 2004, dix organisations et 13 villes partenaires dans sept pays européens avec comme objectif de proposer des outils, des méthodes de diagnostic et des guides de recommandations et d'aide à la décision pour les opérations d'aménagement et de renouvellement urbain. Il propose une méthodologie basée sur des thématiques susceptibles d'inclure le développement durable dans l'aménagement, à destination des collectivités locales et de leurs partenaires. La méthode aborde les différents domaines de la durabilité urbaine de façon sectorielle, ce qui ne permet pas de rechercher des optima globaux. La méthode permet notamment de faire des compensations (une cotation médiocre dans un domaine est compensée par une bonne cotation dans un autre). A titre d'exemple, une cible est intitulée « énergie » et comprend les sous-cibles : efficacité énergétique (chauffage et ventilation), efficacité énergétique (électricité), utilisation des énergies renouvelables, gaz à effet de serre.

De manière générale, une grande prudence est requise dans l'utilisation de ces méthodes simplifiées, en particulier en ce qui concerne les jugements de valeur qui sont implicitement contenus dans les évaluations (pondération, structuration entre critères, etc.). Ces méthodes généralistes répondent plus à des besoins à court terme, résultant souvent de démarches plus subjectives que techniques. L'expérience montre

qu'elles ne conduisent pas toujours à réduire les impacts environnementaux des bâtiments. Remarquons encore que la plupart des méthodologies existantes restent essentiellement présentées de façon sectorielle, thématique par thématique, et ne proposent pas d'approche globale. Elles constituent toutefois un outil intéressant de communication et de sensibilisation des acteurs du territoire et du bâtiment, encore souvent peu concernés par la problématique du développement durable au sens large

## 4. Synthèse et positionnement de la thèse

En préambule aux développements théoriques et aux applications pratiques relatives au renouvellement des quartiers périurbains existants qui constitueront le corps de cette thèse, la question de l'interaction entre forme urbaine et consommations d'énergie dans le bâtiment et pour les déplacements des personnes a été investiguée. Une revue de la littérature internationale traitant des interactions entre forme urbaine et consommations d'énergie pour le transport, pour le bâtiment et pour les deux secteurs considérés simultanément et une analyse des méthodes existantes pour évaluer ces consommations ont été menées. Il ressort de ces analyses les éléments suivants :

- Les résultats quantitatifs présentés dans la littérature peuvent diverger de façon significative selon l'échelle de travail utilisée (de l'échelle locale à l'échelle nationale), la méthodologie employée (de l'étude de cas aux analyses multivariées), les données de base utilisées (données empiriques, modélisations mathématiques, etc.) et la définition des indicateurs utilisés (en particulier la densité). La revue de la littérature a mis en évidence que l'impact de la forme urbaine est appréhendé via différents paramètres, souvent traités individuellement. La définition même de la forme urbaine peut varier significativement d'une étude à une autre.
- Les principaux paramètres qui jouent sur la relation entre forme urbaine et consommations d'énergie pour le bâtiment concernent principalement la compacité des formes bâties et la densité.
- Les liens entre consommations d'énergie pour le transport et forme urbaine sont controversés. L'optimum en termes de forme urbaine varie de la ville compacte à la concentration décentralisée selon les auteurs.
- La façon dont le transport est appréhendé varie selon les auteurs. Il est le plus souvent assimilé aux seuls déplacements domicile-travail qui sont ceux pour lesquels les données sont le plus souvent disponibles. Les choix modaux sont souvent discutés alors que des indicateurs composites (VMT<sup>21</sup>, indice de performance énergétique) sont moins utilisés.
- Les déplacements scolaires sont le plus souvent traités dans la littérature au travers de la notion d' « active commuting » (marche à pied et vélo), dans le cadre plus global d'études relatives à l'obésité des enfants et à la santé. Elles traitent essentiellement du contexte nord-américain.

---

<sup>21</sup> Vehicle Miles Traveled, nombre total de miles parcourus par tous les modes de transport sur une période de temps considérée et dans une zone géographique donnée.

- La question de l'échelle est souvent négligée dans les recherches et débats qui traitent de la ville compacte et des consommations d'énergie dans le secteur du transport (Neuman, 2005).
- Les consommations d'énergie pour le transport et dans le secteur du bâtiment résidentiel sont investiguées à des échelles différentes. Les études « transport » sont menées à l'échelle régionale ou nationale. Les études ciblant les consommations énergétiques du secteur du bâtiment adoptent, en général, une échelle plus réduite.
- Les études existantes ne sont pas transposables directement dans le contexte qui nous occupe car elles ciblent pour la plupart des zones urbaines denses à très denses.
- En matière de transport, les méthodes d'interaction spatiale permettent de déterminer des flux attendus sur base de la localisation des activités sur le territoire. Les hypothèses utilisées sont parfois très restrictives. D'autres méthodes permettent de dresser un état des lieux des consommations d'énergie pour les déplacements des personnes sur base de données empiriques disponibles. La taille des échantillons traités varient fortement selon les études.
- En matière de consommations d'énergie dans le secteur du bâtiment résidentiel à l'échelle du quartier, les méthodes basées sur des simulations thermiques et des modèles mathématiques sont présentées comme la façon la plus crédible d'étudier l'efficacité énergétique des bâtiments et des quartiers et l'influence de scénarios prospectifs. Les méthodes de type « bottom-up » permettent à la fois une précision suffisante des modèles utilisés et une généralisation à une plus grande échelle. Elles permettent également l'investigation de scénarios prospectifs fins appliqués aux bâtiments et aux quartiers.
- En termes de territoires périurbains, plusieurs auteurs ont mis en évidence que les faibles taux de mitoyenneté et de compacité qui caractérisent les formes périurbaines impactent les consommations énergétiques des bâtiments et des quartiers mais qu'un meilleur potentiel solaire existe grâce à la faible présence d'obstructions. Les études relatives au transport en milieu périurbain mettent en évidence une augmentation des distances parcourues et une plus forte part modale de la voiture individuelle.

Sur cette base, nous postulons, d'une part, qu'adopter une approche locale pour l'évaluation énergétique du transport pourrait mener à des résultats plus nuancés que les études réalisées à des échelles plus larges et, d'autre part, que les consommations d'énergie relatives aux bâtiments et aux déplacements des personnes doivent être étudiées de façon conjointe, en particulier en ce qui concerne les quartiers périurbains, souvent peu mixtes et éloignés des centres-villes. Notre champ de recherche, caractérisé par trois éléments particuliers ((1) l'interaction bâtiment + transport, (2) l'échelle du quartier et (3) le renouvellement périurbain) est peu investigué dans la littérature. Ces éléments serviront de fil conducteur lors de l'élaboration de la méthode d'évaluation énergétique des quartiers périurbains wallons (Chapitre IV).

En ce qui concerne l'évaluation énergétique des transports, les méthodes qui sont les plus adaptées à l'objet de notre étude sont les méthodes basées sur des données empiriques. Elles permettent de dresser un état des lieux des consommations d'énergie pour les

déplacements des personnes, sur base des données disponibles en Belgique et qui seront présentées dans le Chapitre IV.

En ce qui concerne l'évaluation énergétique des bâtiments, à l'échelle du quartier, les méthodes les plus adaptées à l'objet de notre étude sont les méthodes de type « bottom-up » qui permettent à la fois une précision suffisante des modèles utilisés et une généralisation éventuelle à une plus grande échelle des résultats obtenus sur des éléments représentatifs-types. Ce type de méthodes permet l'investigation de scénarios de renouvellement prospectifs, appliqués à l'échelle du quartier.

# Chapitre IV

## Méthode d'Evaluation Energétique

### 1. Introduction et objectifs

L'objet de ce quatrième chapitre est de développer une méthode d'évaluation énergétique des quartiers périurbains qui prenne à la fois en compte les consommations d'énergie relatives aux déplacements des personnes et celles relatives au chauffage des bâtiments, à l'échelle du quartier.

Les objectifs auxquels doit répondre la méthode sont :

- Prendre en compte les spécificités locales des quartiers périurbains wallons.
- Aborder la problématique des consommations énergétiques de façon globale en couplant microclimat, consommations d'énergie des bâtiments et du transport, de façon à dépasser l'approche la plus répandue qui consiste à considérer le bâtiment comme un élément étudié en dehors de son contexte.
- Permettre l'évaluation de scénarios prospectifs de renouvellement des quartiers et l'identification des paramètres relatifs à la forme urbaine les plus influents.
- Permettre le développement d'un outil de vulgarisation et d'aide à l'évaluation des quartiers existants, à destination des acteurs de l'aménagement du territoire et des citoyens<sup>1</sup>.
- Permettre la généralisation de certains indicateurs en vue de l'analyse de l'influence de la structure du territoire sur les consommations d'énergie, à plus grande échelle, dans le contexte global de l'étude de l'efficacité énergétique des territoires périurbains et des conditions de leur mutation vers un modèle plus durable.

---

<sup>1</sup> Tweed et Jones (2000) ont notamment mis en évidence le manque d'outils d'évaluation que les autorités locales pourraient utiliser pour évaluer les développements résidentiels existants ou en projet. TWEED, C. & JONES, P. 2000. The role of models in arguments about urban sustainability. *Environmental Impact Assessment Review*, 20, 277-287. De plus, et même si de nombreux outils ont été développés à l'échelle du bâtiment individuel, la plupart de ces outils restent conçus par des ingénieurs pour des utilisateurs entraînés. Ils ne sont pas appropriés aux acteurs de terrain et ne permettent pas une évaluation énergétique rapide des impacts d'un projet ou d'une stratégie d'action. GLICKSMAN, L. R. 2003. Promoting sustainable buildings. *HVAC&R Research*, 9, 107-109.

Les sections suivantes présentent les composants de la méthode d'évaluation énergétique des quartiers périurbains développée dans le cadre de cette thèse et publiée dans deux revues scientifiques<sup>2</sup>, respectivement en ce qui concerne l'évaluation énergétique des déplacements des personnes (Section 2) et l'évaluation énergétique des bâtiments en phase d'utilisation (Section 3). Les Sections 4 et 5 présentent deux outils qui seront utilisés, en complémentarité de la méthode proposée, pour évaluer, d'une part, le cycle de vie des bâtiments et, d'autre part, le gisement solaire à l'échelle des quartiers. Chaque section mentionne les hypothèses, outils et méthodes utilisés. La Section 6 discute enfin les limitations et la reproductibilité de la méthode et propose une synthèse des différentes applications possibles.

Rappelons, en préambule à ces développements, que les considérations d'ordre socio-économique (catégories socioprofessionnelles, âge, revenus, etc.) sortent du cadre de notre étude qui se concentre sur les paramètres relatifs à la forme urbaine. Ils n'interviennent donc pas en tant que paramètre.

## 2. Evaluation énergétique des déplacements

### 2.1. Objectifs

L'objet de cette section est de développer une méthode d'évaluation énergétique des déplacements des personnes qui puisse être utilisable dans deux cadres. Il convient d'abord de développer un module d'évaluation énergétique des déplacements qui permette ultérieurement la comparaison avec les consommations d'énergie relatives au chauffage des bâtiments. Cet outil doit permettre de dresser un cadastre énergétique des quartiers existants, d'identifier les paramètres les plus influents et de formaliser et évaluer, sur cette base, différents scénarios de renouvellement énergétique des quartiers (Chapitre V). Il s'agit également de pouvoir généraliser la méthode de façon à permettre l'analyse du rôle de la structure spatiale du territoire wallon, en particulier les impacts de l'étalement urbain, sur les consommations d'énergie pour les déplacements, à l'échelle régionale et à l'échelle locale (Chapitre VI et Chapitre VII).

La consommation d'énergie relative aux déplacements des personnes est un indicateur intéressant dans le sens où il s'agit d'une mesure composite qui prend en compte, à la fois, la distance parcourue, les parts modales et la fréquence des déplacements (Banister, 1998, Muniz and Galindo, 2005). La consommation d'énergie relative aux déplacements s'exprime en kWh, unité de consommation qui permettra une comparaison aisée avec les résultats de l'évaluation énergétique des bâtiments. Il aurait été également envisageable

---

<sup>2</sup> La méthode développée dans le cadre de cette thèse et présentée dans ce chapitre a été publiée dans deux revues scientifiques avec peer-reviewing. Le premier article est dédié plus spécifiquement à la partie « bâtiment » et le second à la partie « transport » :

MARIQUE, A.-F. & REITER, S. 2012b. A method to evaluate the energy consumption of suburban neighbourhood. HVAC&R Research, 18, 88-99.

MARIQUE, A.-F. & REITER, S. 2012a. A method for evaluating transport energy consumption in suburban areas. Environmental Impact Assessment Review, 33, 1-6.

de travailler en termes d'émissions de gaz à effet serre (exprimées en kilos d'équivalent CO<sub>2</sub>, par exemple), les deux indicateurs étant liés de façon non linéaire par le mode de transport. Nous avons toutefois pris le parti de travailler sur base des consommations d'énergie en kWh car cette unité permet, dans la partie dédiée aux bâtiments, de cibler l'impact de différents types de formes périurbaines, indépendamment du vecteur énergétique choisi pour le chauffage des bâtiments<sup>3</sup>.

Dans la suite de la thèse, nous adopterons le terme « structure du territoire » pour désigner le système défini par trois éléments principaux : (1) la localisation des lieux de travail, des services, commerces, etc. sur le territoire, (2) la distribution spatiale des populations selon le lieu de résidence et (3) les infrastructures (réseaux techniques et de transport). Le terme « forme urbaine » renvoie aux caractéristiques morphologiques des quartiers.

L'étude s'intéresse uniquement aux déplacements domicile-travail et domicile-école, compte tenu des limitations des sets de données disponibles. Bien que ces deux motifs de déplacements deviennent de moins en moins significatifs dans les modèles de déplacements quotidiens, eu égard à l'augmentation très importante des autres motifs de déplacements (commerces et loisirs, en particulier) (Graham, 2000, Lavadinho and Lensel, 2010, Pisarski, 2006, Hubert and Toint, 2002), ils gardent un pouvoir structurant plus important que les autres motifs de déplacements car ils sont systématiques et répétitifs (Dujardin et al., 2011). Sur base de l'enquête MOBEL (base : 2.828 déplacements de 1.619 écoliers et étudiants et 6.961 déplacements de 3.076 actifs employés), Hubert (2004) estime que les déplacements domicile-travail et les déplacements scolaires représentent respectivement 30% et 17% de l'ensemble des déplacements des personnes en Wallonie. En termes de distance, leur part respective s'élève, selon la même étude, à 45% et 9%.

Les chaînes de déplacements ne sont pas abordées ici. Cette approche est consistante avec la littérature étudiée dans le cadre de l'état de l'art. Hickman and Banister (2007) et Boussauw and Witlox (2009), par exemple, assimilent les comportements en matière de transport aux seuls déplacements domicile-travail pour mettre l'accent sur les liens entre les lieux de résidence et d'emplois et la façon dont on peut les influencer, mais également parce que ce sont le plus souvent les seules données disponibles dans les recensements de population utilisés.

## 2.2. Données et hypothèses

Les données de base utilisées proviennent des deux derniers recensements statistiques de la Direction générale Statistique et Information économique (appelé Institut National des Statistiques jusque 2003) : le recensement de la population et des logements au 1<sup>er</sup> mars 1991 et l'enquête socio-économique générale de 2001 (ou ESE 2001). Des recensements de ce type sont organisés en Belgique tous les dix ans depuis le milieu du 19<sup>ème</sup> siècle mais

---

<sup>3</sup> Les consommations de chauffage sont déterminées sur base des besoins énergétiques qui sont indépendants du type et de l'efficacité du système de production ou de distribution. Voir la sous-section 3.2 pour plus de détails sur la différence entre besoins et consommations.

ont récemment été abandonnés (il n'y a pas eu de recensement en 2011). L'objet de ces recensements est de fournir aux décideurs politiques et aux chercheurs des données détaillées sur la population, les ménages et leurs logements. Le dernier recensement diffère des précédents dans le sens où il est davantage axé sur la collecte d'informations de nature démographique et socio-économique, comme le niveau d'éducation, le logement, la mobilité, etc. au niveau individuel. Il inclut des questions relatives à l'opinion des individus, notamment sur la perception de leur environnement. Les données du recensement de la population et des logements au 1<sup>er</sup> mars 1991 sont disponibles à l'échelle du secteur statistique et celles de l'enquête socio-économique générale de 2001 à l'échelle individuelle. Des filtres ont été appliqués aux données brutes des recensements de façon à éliminer les répondants qui n'ont pas rempli, ou pas rempli correctement, l'ensemble des questions utilisées dans le cadre de l'évaluation énergétique. Les secteurs statistiques présentant moins de 10 répondants ont été éliminés.

#### 2.2.1. Les déplacements domicile-travail

Seuls les travailleurs disposant d'un lieu de travail fixe et distinct de leur lieu de résidence ont été appelés à remplir le questionnaire des recensements. Les travailleurs « itinérants » (représentants commerciaux, services à domicile, etc.) et les travailleurs à domicile (profession libérale, etc.) ne font pas partie de l'échantillon. L'échantillon final pour 1991 comprend 797.733 individus. Celui de 2001 comprend 966.247 individus.

Les données du recensement de la population et des logements au 1<sup>er</sup> mars 1991 utilisées et les hypothèses qui leur sont appliquées sont :

- Les distances parcourues entre le domicile et le lieu de travail. Ces données sont agrégées, à l'échelle du secteur statistique, en huit classes. La valeur moyenne de chaque classe est utilisée (Tableau IV-1).

Tableau IV-1 : *Hypothèses posées sur les classes de distances du recensement de 1991.*

<b>Classes de distance dans le recensement 1991</b>	<b>Valeur moyenne utilisée</b>
[0 – 3 km[	1,5 km
[3 – 5 km[	4 km
[5 – 10 km[	7,5 km
[10 – 20 km[	15 km
[20 – 30 km[	25 km
[30 – 50 km[	40 km
[50 – 70 km[	60 km
Plus de 70 km	85 km

- Le moyen de transport principal utilisé pour les déplacements domicile-travail. Les hypothèses posées sur le choix du mode de transport sont présentées dans le Tableau IV-2 :

Tableau IV-2 : Hypothèses posées sur les modes de transport du recensement de 1991.

Mode de transport dans le recensement 1991	Mode de transport et vocable utilisé
Train	Train
Transport organisé par l'employeur	Non considéré
Voiture en tant que conducteur	Voiture
Voiture en tant que passager	Voiture
Bus, tram, métro	Bus, tram, métro synthétisés sous le vocable bus
Moto, scooter	Non considéré
Vélo, vélomoteur	Vélo
A pied	A pied

Le transport organisé par l'employeur n'est pas pris en considération car il représente une part modale très faible. De plus, le type de transport mis en place peut varier significativement selon l'entreprise (taxi qui va chercher un employé, mini-bus de ramassage de quelques personnes, etc.). La moto n'est pas considérée car elle représente une part modale très faible. Enfin, la voiture en tant que conducteur et la voiture en tant que passager sont agrégées. Un facteur de remplissage sera appliqué au facteur de consommation de la voiture.

- Le nombre de personnes actives et occupées par secteur statistique.
- Le temps de travail de la population active occupée. La valeur moyenne de chaque classe est prise en compte selon le Tableau IV-3.

Tableau IV-3 : Hypothèses posées sur les classes de temps de travail du recensement de 1991.

Classes de temps de travail dans le recensement 1991	Valeur moyenne utilisée
Moins de 10 heures par semaine	2 trajets par semaine
De 10 à 19 heures par semaine	4 trajets par semaine
De 20 à 29 heures par semaine	6 trajets par semaine
De 30 à 40 heures par semaine	10 trajets par semaine
Plus de 40 heures par semaine	10 trajets par semaine

Les données de l'enquête socio-économique de 2001 utilisées et les hypothèses qui leur sont appliquées sont :

- Le nombre de kilomètres parcourus entre le domicile et le lieu de travail. Il s'agit des distances précises renseignées par chaque répondant.
- Le mode de transport principal utilisé, selon les mêmes hypothèses que pour le recensement de 1991. Dans l'enquête socio-économique de 2001, la possibilité était toutefois laissée aux répondants de renseigner plusieurs modes de transport. Dans

l'évaluation, seul le mode principal est pris en compte. Le mode de transport principal est déterminé selon la hiérarchie suivante : train / voiture / bus / vélo / à pied. Cette hiérarchie est établie sur base de la vitesse des différents modes et du constat que le mode le plus rapide est souvent celui utilisé pour parcourir les plus longues distances.

- Le nombre de personnes actives et occupées.
- Le temps de travail de la population active occupée.

#### 2.2.2. Les déplacements scolaires

Les hypothèses appliquées aux distances parcourues et aux modes de transports utilisés pour les déplacements scolaires sont identiques à celles présentées pour les déplacements domicile-travail, en ce qui concerne le recensement de 1991. La répartition des étudiants par niveau de scolarité (maternel, primaire, secondaire ou supérieur) n'a pas pu être obtenue, ce qui rend l'interprétation des résultats de cette année de référence plus limitée.

Pour l'enquête socio-économique de 2001, les hypothèses appliquées aux distances parcourues et aux modes de transports utilisés pour les déplacements scolaires sont identiques à celles présentées pour les déplacements domicile-travail. Quand un étudiant dispose à la fois d'une résidence principale et d'une résidence secondaire (kot), seule la résidence secondaire est prise en compte. Les étudiants sont distingués selon leur niveau scolaire : maternel et primaire (les données de l'enquête socio-économique 2001 ne concernent que les enfants âgés de plus de 5 ans, donc une partie de la population scolaire du maternel n'est pas considérée), secondaire et supérieur. Les spécificités de chaque niveau sont rappelées dans le Tableau IV-4. L'échantillon final est composé de 183.617 étudiants des 734.000 étudiants résidant en Wallonie et scolarisés en Wallonie, tous niveaux confondus (soit 25%). Remarquons qu'en cohérence avec les déplacements domicile-travail, les déplacements scolaires sont étudiés sur le territoire de la Wallonie (y compris donc les cantons de l'est d'expression germanophone) alors que l'enseignement est organisé par la Fédération Wallonie-Bruxelles et la Communauté Germanophone selon les communes considérées. La Fédération Wallonie-Bruxelles est compétente en matière d'enseignement dans les communes francophones de Wallonie et Bruxelles. La Communauté Germanophone est compétente en matière d'enseignement dans les 9 communes germanophones du pays. Le nombre de jours scolaires par an est fixé à 180 sur base des calendriers académiques de la Fédération Wallonie-Bruxelles<sup>4</sup>. Il convient enfin de remarquer que contrairement à d'autres régions ou pays européens, le choix d'un établissement scolaire est libre en Wallonie. En 2010, un décret dit « décret inscription » est entré en vigueur. Il vise à favoriser l'équité et la transparence dans le choix d'un établissement secondaire. Il est basé sur l'évaluation d'un indicateur mixte prenant en compte notamment la distance entre le domicile et l'école secondaire et des variables socio-économiques.

---

<sup>4</sup> [www.enseignement.be](http://www.enseignement.be), consulté en janvier 2012.

Tableau IV-4 : Synthèse des niveaux scolaires et de leurs caractéristiques principales.

Niveau scolaire	Age indicatifs des étudiants	Obligatoire/facultatif	Conditions d'admissions
Maternel	De 3 à 6 ans	Facultatif	Aucune
Primaire	De 6 à 12 ans	Obligatoire	Aucune
Secondaire (général/technique ou professionnel)	De 12 à 18 ans	Obligatoire jusqu'à 18 ans	Réussite de l'examen de primaire
Supérieur (hautes écoles et universités)	18 ans et plus	Facultatif	Réussite de l'examen de secondaire général

## 2.3. Méthode

La méthode proposée est une méthode quantitative qui vise à évaluer les consommations d'énergie relatives aux déplacements domicile-travail et aux déplacements scolaires. La méthode relative aux déplacements domicile-travail est basée sur le « commute performance index » développé par Boussauw and Witlox (2009) pour évaluer l'impact de la structure du territoire de la Flandre et de la Région de Bruxelles Capitale sur les déplacements domicile-travail. Il fait usage des mêmes données de base. Cet indice a été adapté au territoire wallon et complété par la prise en compte de différents types de carburants, l'adaptation des facteurs de consommation au contexte local et la prise en compte de consommations annuelles incluant le temps de travail des travailleurs. L'indice de performance est ensuite adapté aux déplacements scolaires.

### 2.3.1. Les facteurs de consommation

Des facteurs de consommation sont d'abord définis de façon à transformer des kilomètres parcourus par mode de transport en une unité commune, le kWh. Ils sont basés sur la consommation des véhicules (en litre / kilomètre) et leur taux d'occupation respectif. En ce qui concerne les voitures, il convient de distinguer véhicule diesel et véhicule essence dans le sens où leurs consommations et leurs caractéristiques diffèrent. Nous utiliserons la répartition moyenne wallonne actuelle, à savoir, 55% de véhicules diesel et 45% de véhicules essence (Cellule Etat de l'Environnement Wallon, 2007). Les consommations moyennes pour les véhicules diesel et essence utilisées sont des moyennes françaises provenant du bilan carbone de l'ADEME (2007). Les bus TEC<sup>6</sup> wallons utilisent le diesel. Leur consommation moyenne est de 45 litres de diesel par 100 kilomètres, selon les données transmises par la SRWT<sup>789</sup> et utilisées également par la CPDT (2005). Les taux

<sup>5</sup> L'âge des étudiants est donné à titre indicatif car il peut varier légèrement selon la date de naissance, l'avancement d'un an, un changement d'orientation ou la répétition d'une année d'étude.

<sup>6</sup> TEC : Transport en Commun, désigne les 5 sociétés de transport public actives sur le territoire de la Région wallonne

<sup>7</sup> SRWT : Société Régionale Wallonne du Transport, coordonne et contrôle l'action des 5 sociétés d'exploitation TEC.

d'occupation moyens sont fixés à 1,2 personne par voiture sur base d'une analyse des données du recensement statistique et à 10 passagers par bus (sur base des données reçues de TEC Liège-Verviers). Le taux de remplissage du bus est spécifique au milieu périurbain (en milieu urbain, le taux de remplissage du bus est plus élevé, ce qui réduit le facteur de consommation par personne et par kilomètre).

Les litres de diesel / essence doivent enfin être transformés en kWh. On se réfère aux facteurs de conversion moyens et pouvoirs calorifiques moyens des combustibles couramment utilisés et résumés dans le Tableau IV-5 pour obtenir finalement un facteur de conversion à appliquer aux kilomètres parcourus en voiture diesel, voiture essence et bus.

*Tableau IV-5 : Facteurs de consommation (par kilomètre et par personne) utilisés pour convertir des kilomètres parcourus par mode de transport en kWh.*

	<b>Voiture diesel</b>	<b>Voiture essence</b>	<b>Bus</b>
Consommation (litre/km)	0,068	0,080	0,45
Taux d'occupation, (personnes par véhicule)	1,2	1,2	10
Densité du carburant (tep <sup>10</sup> / litre)	$0,85 * 10^{-3}$ <sup>(11)</sup>	$0,77 * 10^{-3}$ <sup>(12)</sup>	$0,85 * 10^{-3}$
Facteur de conversion tep kWh	$11.630$ <sup>(13)</sup>		
<b>Facteur de consommation kWh/personne.km</b>	<b>0,56</b>	<b>0,60</b>	<b>0,45</b>

Le calcul des facteurs de consommation et les unités correspondantes sont formalisés par les deux expressions suivantes (1 et 2).

$$(1) \quad Fm = \text{consommation}/\text{personne}.\text{km} * \text{densité du carburant} * \text{facteur de conversion}$$

$$(2) \quad \frac{[kWh]}{[\text{personne}].[\text{kilomètre}]} = \frac{[\text{litres}]}{[\text{personne}].[\text{kilomètre}]} * \frac{[\text{tep}]}{[\text{litre}]} * \frac{[kWh]}{[\text{tep}]}$$

<sup>8</sup> TEC : quid des bus propres ? RTBF info, [www.rtbf.be](http://www.rtbf.be), article du 26 février 2010, consulté en janvier 2011.

<sup>9</sup> L'autobus hybride : réelle solution de mobilité durable. Terre En commun, l'e-magazine des utilisateurs du TEC. 10 février 2010, consulté en janvier 2011.

<sup>10</sup> Tep : tonne d'équivalent pétrole.

<sup>11</sup> La densité des carburants varie selon la température, la composition (l'essence est un mélange de 4 hydrocarbures), la présence d'adjuvant comme l'éthanol, etc. Les valeurs utilisées ici sont celles de l'ADEME.

<sup>12</sup> idem

<sup>13</sup> Le facteur utilisé pour convertir des tep en kWh varie selon les sources. Nous avons adopté la conversion proposée par l'Agence Internationale de l'Energie, à savoir 1 tep = 11.630kWh.

Le détail du calcul pour le diesel est donné à titre indicatif en note de bas de page<sup>14</sup>. Le facteur de consommation du train est défini sur base d'une méthodologie différente car la plupart des trains de voyageurs belges sont électriques. La consommation d'énergie totale des trains belges a été divisée par le nombre total de passagers kilomètres de l'année de référence, sur base des données de l'Institut Wallon de l'Evaluation, la Prospective et la Statistique et de l'Institut de Conseil et d'Etudes en Développement Durable (IWEPS (2007) et ICEDD (2009)). Le facteur de consommation du train est ainsi évalué à 0,15 kWh/personne.km. Il s'agit donc d'une valeur moyenne qui prend en compte tant les heures de pointe que les heures creuses. Les facteurs de consommation du vélo et de la marche à pied sont nuls comme ces modes de transport ne consomment pas directement d'énergie.

Remarquons que la définition et la justification de ces facteurs de consommation ne sont pas univoques dans la littérature. Les facteurs rencontrés varient ainsi fortement selon les études. Les facteurs de consommation attribués à la voiture et au bus varient par exemple du simple au triple entre les valeurs mentionnées par l'Agence Internationale de l'Energie (IEA, 1988) et reprises notamment par le Réseau wallon des Conseillers en Mobilité (CEM, 2002) et celles de l'Association Internationale des Transports Publics (UITP, 2003), pourtant spécifiquement calculées pour des transports urbains. Les facteurs de consommation utilisés dans d'autres travaux scientifiques comparables au nôtre diffèrent également. Boussauw and Witlox (2009) utilisent par exemple les facteurs de consommation définis par l'agence pour l'environnement flamande MIRA (2007) pour la Région flamande qui se sont eux-mêmes basés sur une recherche française (ENERDATA, 2004). Ces facteurs sont inférieurs à ceux définis ci-dessus, pour chaque mode de transport (par exemple les facteurs utilisés pour la voiture dans ces recherches s'élèvent de 0,43 à 0,53 kWh/personne.km alors que le nôtre a été évalué à 0,56 kWh/personne.km pour la voiture diesel et 0,60 kWh/personne.km pour les voitures essences). Saunders et al. (2008) utilisent des valeurs proposées par Kenworthy (2003) pour les villes de l'ouest de l'Europe. Ces valeurs sont plus élevées que celles précédemment discutées (0,92 kWh/personne.km pour la voiture individuelle). La définition des facteurs de consommation relève de considérations et hypothèses propres à chaque recherche, et ce d'autant plus que notre projet traite des territoires périurbains alors que les autres recherches citées visent des territoires plus larges. Les valeurs proposées dans la littérature doivent donc être appréhendées avec beaucoup de prudence. C'est la raison pour laquelle il nous a semblé opportun de définir nos propres facteurs de consommation, sur base de données locales de la Wallonie et en spécifiant de façon claire les hypothèses et données utilisées. De plus, la méthodologie de définition des facteurs de consommation adoptée permet une mise à jour aisée, par exemple pour prendre en compte ultérieurement des évolutions de la consommation des véhicules ou du taux de remplissage des transports en commun, ou encore pour permettre la reproductibilité de l'approche développée dans d'autres territoires.

---

<sup>14</sup> Exemple pour la voiture diesel :  $fdiesel = (0,068/1,2) * 0,85 * 10^{-3} * 11630 = 0,56 \text{ kWh/personne.km}$

### 2.3.2. Les indices de performance des déplacements

L'indice de performance (IPE) des déplacements domicile-travail est calculé sur base de l'expression (3) où  $i$  représente l'unité territoriale considérée (le secteur statistique, l'ancienne commune ou la commune),  $m$  représente le mode de transport,  $Dmi$  représente l'ensemble des distances parcourues par les travailleurs habitant l'unité  $i$  grâce au mode de transport  $m$ ,  $fm$  représente le facteur de consommation attribué au mode  $m$  et  $Ti$  représente la population active occupée de l'unité territoriale  $i$  considérée. Il s'exprime en kWh/personne.trajet.

$$(3) \quad IPE \text{ domicile-travail } (i) = (\sum m Dmi * fm) / Ti$$

L'indice de performance des déplacements scolaires est formalisé de façon similaire (équation (4)), pour chaque niveau scolaire  $I$  (maternel et primaire, secondaire, supérieur).  $Dmil$  représente donc l'ensemble des distances parcourues par les étudiants résidant dans l'entité  $i$  et scolarisés dans une école du niveau  $I$  grâce au mode de transport  $m$  et  $Til$  représente le nombre d'étudiants de l'entité  $i$  qui sont scolarisés dans une école de niveau  $I$ .

$$(4) \quad IPE \text{ domicile-école } I (i) = (\sum m Dmil * fm) / Til$$

### 2.3.3. Les autres indices

Trois autres indicateurs peuvent être discutés, en complément de l'indice de performance des déplacements. La distance parcourue s'exprime en km et représente la distance moyenne pour un trajet (aller simple) domicile-travail (ou domicile-école) parcourue par un travailleur (ou un étudiant) dans l'unité territoriale considérée (5).

$$(5) \quad Distance (i) = \sum m Dmi / Ti$$

La part modale exprime, en %, la fréquence d'utilisation de chaque mode de transport par unité territoriale, conformément à l'expression (6), où  $NDn$  représente le nombre de trajets domicile-travail (ou domicile-école) réalisés grâce au mode  $n$ .

$$(6) \quad Parts modales n (i) = NDn / \sum m NDm$$

Enfin, la consommation annuelle totale des déplacements domicile-travail (ou domicile-école) est calculée selon l'expression (7) où  $TDi$  représente le nombre total de trajets domicile-travail (domicile-école) dans l'unité territoriale considérée et prend en compte le temps de travail des individus.

$$(7) \quad \text{Consommation annuelle } (i) = IPE (i) * TDi$$

#### 2.3.4. Deux modules complémentaires

Comme rappelé en introduction de ce chapitre, la méthode d'évaluation énergétique des déplacements domicile-travail et domicile-école développée doit permettre la comparaison entre consommations d'énergie pour les déplacements des personnes et consommations d'énergie des bâtiments, à l'échelle des quartiers, ainsi que l'évaluation de stratégies d'intervention dans les quartiers périurbains existants.

Il est apparu intéressant de compléter la méthode générale proposée ci-dessus par deux modules complémentaires. Le premier permet de prendre en compte les déplacements du domicile à la gare, lorsque le train est le mode de transport principal utilisé. Si la part modale du train est relativement faible dans les déplacements domicile-travail, elle est traditionnellement plus importante dans le cas des déplacements scolaires. En milieu urbain dense, les déplacements du domicile à la gare pourraient être négligés dans le sens où ces tissus urbains sont généralement bien équipés en gare ferroviaire, alors que dans les quartiers périurbains qui nous occupent, on peut supposer que les trajets jusqu'à la gare sont effectués, le plus souvent, en voiture, compte tenu du faible niveau de service des transports en commun et de la distance qui les sépare des gares. Ne disposant pas de données statistiques relatives à ces déplacements, un module complémentaire a été développé pour l'évaluation énergétique des quartiers. Il se base sur les caractéristiques de chaque quartier. Ainsi, il s'agit de :

- Déterminer la gare la plus proche du quartier et mesurer la distance euclidienne qui les sépare dans un système d'informations géographiques.
- Multiplier cette distance par le nombre de trajets annuels (domicile-travail ou domicile-école) en train.
- Evaluer la répartition modale, sur base de l'offre en transport en commun et de la distance à parcourir du quartier à la gare, conformément aux hypothèses présentées dans la Figure IV-1.
- Appliquer les facteurs de consommation définis plus haut.
- Sommer les résultats.

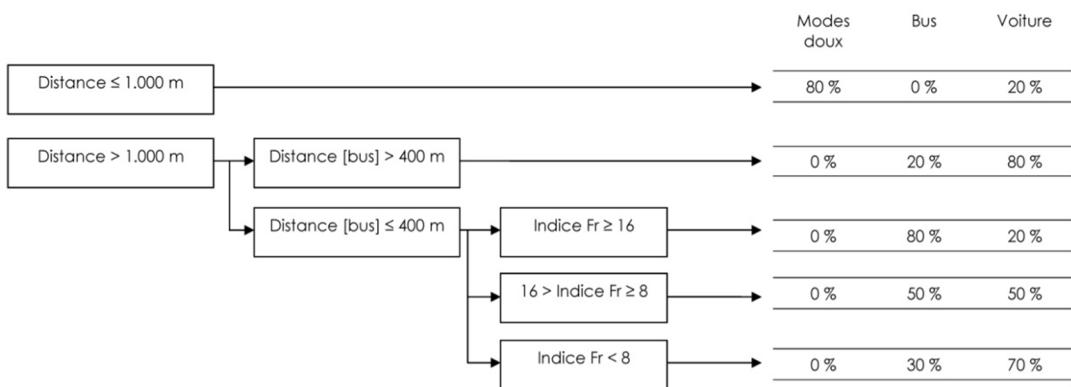


Figure IV-1 : Hypothèses posées pour déterminer le mode de transport pour les déplacements du domicile à la gare quand le train est le mode principal utilisé.

Le second module développé a consisté à rendre la méthode d'évaluation énergétique des déplacements domicile-travail et domicile-école indépendante des données d'entrée (recensement 1991 et enquête socio-économique 2001) pour les utilisateurs qui souhaiteraient pouvoir personnaliser finement les données d'entrée relatives aux déplacements plutôt que de travailler sur base de moyennes issues des recensements.

Une routine de calcul et une interface graphique ont été développées pour réaliser un outil d'évaluation énergétique des déplacements utilisable sur le web, sur base de la méthode présentée ci-dessus<sup>15</sup>. Après avoir renseigné le nombre d'individus (adultes / enfants) qui composent le ménage ou le quartier, l'ensemble des champs d'entrée relatifs aux habitudes de déplacement sont personnalisables selon les modalités suivantes. Chaque fonctionnalité est illustrée par une capture d'écran de l'interface graphique développée :

- Choix d'un mode de transport : voiture / bus / train / vélo / à pied



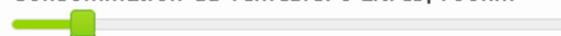
- Si la voiture est sélectionnée : spécifier s'il s'agit d'un véhicule diesel ou essence et sa consommation en litres/100 kilomètres (de 4 à 20 litres/100 kilomètres). L'outil recalcule alors le facteur de consommation de la voiture selon les informations personnalisées entrées dans le formulaire.

Type de carburant

Diesel

Essence

Consommation du véhicule: 6 Litres/100km



<sup>15</sup> Ces éléments ont été intégrés à l'outil interactif développé dans le cadre du projet de recherches SAFE (Suburban Areas Favoring Energy efficiency).

- Si la voiture est sélectionnée : spécifier un éventuel covoiturage et le nombre de personnes concernées. Cette option est utilisable dans le cas d'un réel co-voiturage ou pour prendre en compte les chaînes de déplacements qui combinent travail et école (exemple : un parent dépose son enfant à l'école sur la route du domicile au lieu de travail). Le facteur de consommation de la voiture est adapté selon les informations relatives au covoiturage entrées dans le formulaire

Je fais du covoiturage

Combien de personnes (autre que le chauffeur) ? : 2 personne(s)



- Si le bus est sélectionné : spécifier s'il s'agit d'un bus « urbain » ou pas, de façon à adapter le taux de remplissage pris en compte par défaut. Le facteur de consommation du bus est adapté en conséquence.

Mode de transport secondaire / complémentaire



Dans quel type de milieu ?

Urbain

Périurbain ou Rural

- Choix d'un nombre de jours de travail / d'école par an (de 0 à 1040 trajets simples)

Nombre de trajets domicile-lieu de travail et lieu de travail-domicile par semaine: 10 trajets



Nombre de semaines de travail par an ? 48 semaines



- Choix d'une distance parcourue pour un trajet (de 0 à 120 kilomètres)

Nombre de kilomètres parcourus entre le domicile et le lieu de travail: 20 kilomètres



- Possibilité de renseigner un second mode de transport pour chaque individu pour prendre en compte deux situations potentielles : la combinaison de deux moyens de transport différents au cours d'un même trajet (exemple : la voiture du domicile à la gare et le train de la gare à la destination) ou l'emploi de deux modes de transport différents selon le jour (exemple : parfois en voiture, parfois en bus).

Mode de transport secondaire / complémentaire



Nombre de trajets domicile-lieu de travail et lieu de travail-domicile par semaine: 10 trajets



Nombre de semaines de travail par an ? 48 semaines



Nombre de kilomètres parcourus entre le domicile et le lieu de travail: 20 kilomètres



Les résultats (consommations énergétiques des déplacements) sont proposés sous deux formes : la consommation annuelle totale du ménage en kWh et l'indice de performance moyen (kWh/personne.trajet) pour chaque personne (Figure IV-2).

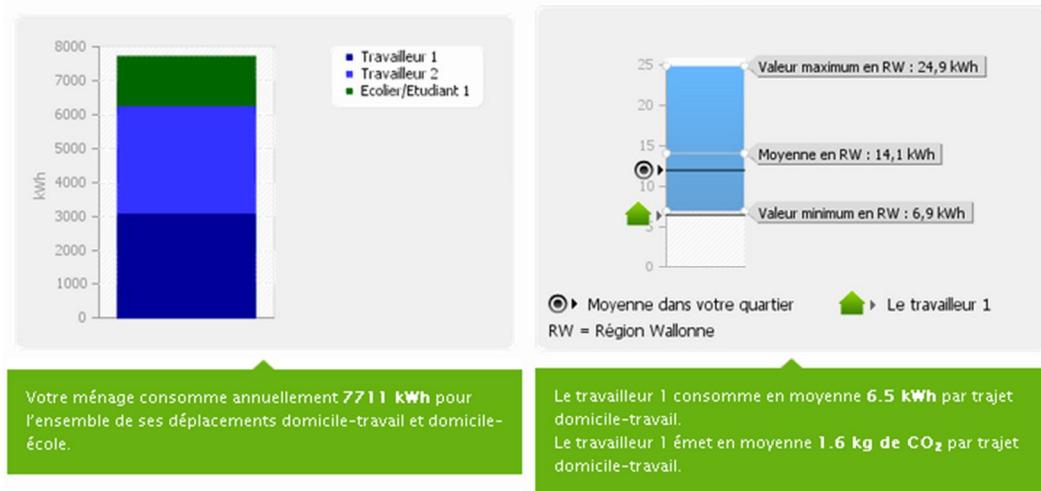


Figure IV-2 : Exemple de résultats. A gauche, la consommation totale annuelle (kWh) pour les déplacements domicile-travail et domicile-école d'un ménage composé de deux adultes et d'un enfant, selon les modalités renseignées dans les formulaires. La contribution de chaque individu est identifiable. A droite, l'indice de performance moyen de l'individu #1 (kWh/personne.trajet), positionné par rapport aux indices de performances moyens de son quartier (secteur statistique) et de la Wallonie, calculé selon la méthode proposée dans la section 2.3.

### 3. Evaluation énergétique des bâtiments

#### 3.1. Objectifs

Sur base de l'état de l'art des méthodes existantes, nous avons mis en évidence que les méthodes les plus adaptées à l'objet et aux objectifs de notre étude sont les méthodes de type « bottom-up » qui permettent à la fois une précision suffisante des modèles utilisés et une généralisation éventuelle à une plus grande échelle. L'objet de la méthode développée ci-dessous est (1) d'évaluer rapidement les performances énergétiques des quartiers périurbains wallons en ce qui concerne le chauffage des bâtiments, (2) de comparer ces consommations avec les consommations relatives aux déplacements domicile-travail et domicile-école et (3) d'évaluer l'efficacité énergétique de différents scénarios de renouvellement des quartiers périurbains.

#### 3.2. Données et hypothèses générales

L'approche développée s'attache, conformément à l'objet de la thèse et à ses hypothèses de départ, uniquement au chauffage des bâtiments, à l'échelle du quartier. Plusieurs études empiriques menées en Wallonie (CEEW, 2007, ICEDD, 2005, Kints, 2008) ont montré que le chauffage représente le poste énergétique le plus important des ménages. Sa contribution est estimée à 74% par l'ICEDD (2005). L'eau chaude sanitaire, l'électricité, la cuisson et le chauffage d'appoint représentent respectivement 11%, 10%, 3% et 2% du bilan énergétique des ménages (Figure IV-3). Parmi le poste « électricité », le petit électroménager (21%), l'éclairage (14%) et les lave-linge (12%) sont les plus gros consommateurs. La tendance est toutefois à la hausse de la consommation électrique en raison de la multiplication des appareils électriques par unité de logement (Kints, 2008).

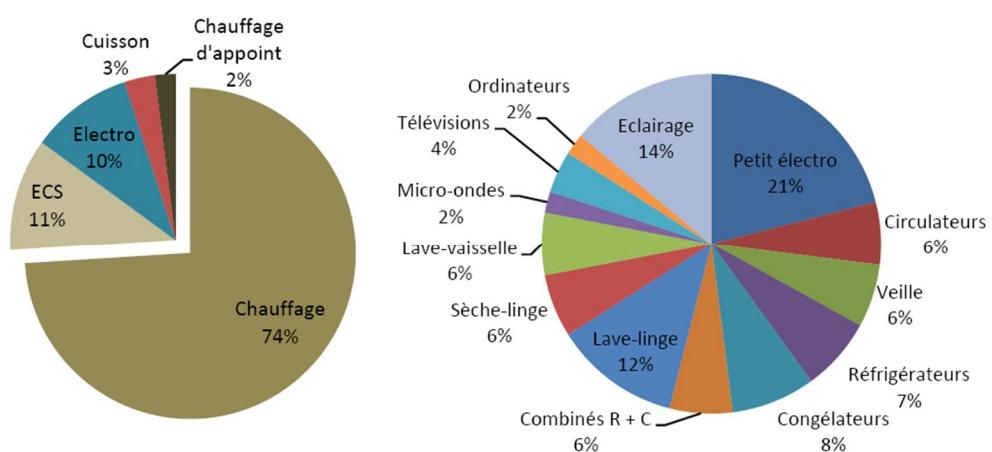


Figure IV-3 : Part du chauffage dans la consommation des ménages et répartition des consommations électriques entre postes ©ICEDD (2005).

De plus, le chauffage des bâtiments est directement influencé par des paramètres relevant de la forme urbaine (compacité, mitoyenneté, etc.) au contraire des consommations d'électricité ou d'eau qui dépendent essentiellement du comportement des occupants. La climatisation éventuelle des logements n'est pas prise en compte car, en raison du climat belge<sup>16</sup>, elle reste peu utilisée en Wallonie.

De façon à pouvoir permettre la comparaison avec les consommations relatives aux déplacements des personnes, nous discuterons, dans le cadre de l'étude de l'impact de différentes formes périurbaines sur les consommations énergétiques, des consommations de chauffage. Les consommations de chauffage sont déterminées sur base des besoins énergétiques qui sont indépendants du type et de l'efficacité du système de production ou de distribution. La conversion des besoins de chauffage en consommation de chauffage s'effectue selon l'expression suivante, en fonction du vecteur énergétique utilisé pour le chauffage. Des facteurs de rendement d'émissions-types (et une méthode de calcul détaillée) sont renseignés dans l'annexe I de la Directive PEB transposée en Wallonie. Toutefois, afin de faire sortir l'impact de ce paramètre non directement lié à la forme urbaine, la comparaison de différents quartiers et les variations paramétriques se baseront sur un seul vecteur énergétique et un facteur de rendement « idéal » égal à 1.

$$(8) \text{ Consommation de chauffage} = \text{Besoins nets de chauffage} * \frac{1}{\text{rendement}}$$

### 3.3. Méthode et hypothèses de calculs

La méthode d'évaluation énergétique des consommations de chauffage des bâtiments, en phase d'utilisation et à l'échelle du quartier, combine une classification typologique des bâtiments et des simulations thermiques dynamiques.

#### 3.3.1. La classification typologique des bâtiments périurbains résidentiels

Une typologie des bâtiments résidentiels périurbains wallons a d'abord été élaborée sur base de l'approche développée et présentée dans la Section 3.2.3 du Chapitre II. Cette typologie se base sur les caractéristiques suivantes :

- La mitoyenneté (mitoyen, semi-mitoyen ou « 4 façades ») est définie sur base du PLI (plan de localisation informatique) wallon.
- La superficie bâtie en m<sup>2</sup> (4 classes : moins de 70m<sup>2</sup>, de 70 à 110m<sup>2</sup>, de 110 à 150m<sup>2</sup> et plus de 150m<sup>2</sup>) et le nombre de niveaux (2 classes) sont définis sur base du PLI et du PICC (Projet Informatique de Cartographie Continue) wallons.
- La date de construction (5 classes) est définie sur base des données cadastrales de l'Administration Générale de la documentation patrimoniale du Service Public Fédéral - Finances. Ces données datent du 1er janvier 2009. Cinq catégories d'âge sont définies

---

<sup>16</sup> Pour l'année de référence prise en compte dans les simulations, la température moyenne s'élève à 10,3°C et les degrés-jours de climatisation à 2.548°CCh par an (si la température intérieure du logement est fixée à 18°C).

sur base de l'évolution des réglementations thermiques en Wallonie (voir Section 2.6.3, Chapitre II), de l'évolution des techniques constructives et des classes d'âge utilisées dans les recensements statistiques. Ces cinq classes sont : avant-1950, de 1950 à 1980, de 1981 à 1995, de 1996 à 2008 et de 2009 à 2012. La base de données cadastrale donne aussi l'année de rénovations majeures (et déclarées) entreprises mais ne renseigne pas le type de travaux concernés (isolation, extension, etc.).

A chacune de ces classes d'âge sont attribuées des caractéristiques constructives-types qui permettent ensuite d'extrapoler des coefficients de transmission thermique U (W/m<sup>2</sup>.K) des parois et des vitrages. Cette approche simplificatrice consistant à attribuer des caractéristiques constructives identiques à tous les bâtiments construits pendant la même période de temps est communément employée dans les études scientifiques similaires à la nôtre (voir Chapitre III).

*Tableau IV-6 : Composition et coefficient de transmission thermique des murs selon la période de construction.*

	<b>Pre-1950</b>	<b>1951-1980</b>	<b>1981-1995</b>	<b>1996-2008</b>	<b>2009-2012</b>
Type de murs	Mur plein	Mur creux	Mur creux	Mur creux	Mur creux
Enduit plâtre	1 cm	1 cm	1 cm	1 cm	1 cm
Blocs de béton	40 cm	14 cm	14 cm	14 cm	14 cm
Isolant	-	-	3 cm	6 cm	8 cm
Coulisse ventilée	-	6 cm	3 cm	3 cm	3 cm
Briques de parement	-	9 cm	9 cm	9 cm	9 cm
<b>U (W/m<sup>2</sup>.K)</b>	<b>2,9</b>	<b>2,3</b>	<b>0,7</b>	<b>0,5</b>	<b>&lt; 0,4<sup>17</sup></b>

*Tableau IV-7 : Caractéristiques des vitrages.*

	<b>Pre-1950</b>	<b>1951-1980</b>	<b>1981-1995</b>	<b>1996-2008</b>	<b>2009-2012</b>
Type de vitrage	Simple vitrage	Double vitrage	Double vitrage	Double vitrage	Double vitrage
<b>U (W/m<sup>2</sup>.K)</b>	<b>4,1</b>	<b>2,9</b>	<b>2,7</b>	<b>2,4</b>	<b>1,1</b>

---

<sup>17</sup> Conformément aux exigences d'Umax fixées dans la Directive PEB

Tableau IV-8 : Composition et coefficient de transmission thermique des toitures selon la période de construction.

	Pre-1950	1951-1980	1981-1995	1996-2008	2009-2012
Couverture	Tuiles	Tuiles	Tuiles	Tuiles	Tuiles
Structure (pannes et chevrons)	Non pris en compte dans les simulations thermiques (impact négligeable). Seule une lame d'air est prise en compte.				
Isolants (laine minérale)	-	-	8 cm	10 cm	14 cm
Plaque de plâtre	1 cm	1 cm	1 cm	1 cm	1 cm
<b>U (W/m<sup>2</sup>.K)</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>0,5</b>	<b>0,4</b>	<b>&lt; 0,3<sup>18</sup></b>

Tableau IV-9 : Composition et coefficient de transmission thermique des dalles de sol selon la période de construction.

	Pre-1950	1951-1980	1981-1995	1996-2008	2009-2012
Hourdis + chape	16 cm	16 cm	16 cm	16 cm	16 cm
Isolant	-	-	3 cm	6 cm	9 cm
Chape	6 cm	6 cm	6 cm	6 cm	6 cm
Carrelage	1 cm	1 cm	1 cm	1 cm	1 cm
<b>U (W/m<sup>2</sup>.K)</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>0,8</b>	<b>0,5</b>	<b>&lt; 0,4<sup>19</sup></b>

Tableau IV-10 : Autres caractéristiques.

	Pre-1950	1951-1980	1981-1995	1996-2008	2009-2012
Taux de renouvellement d'air, volume/h	1	1	0,6	0,6	0,6
Pourcentage de surface vitrée	25%	25%	25%	25%	25%

Les rénovations éventuelles qui auraient pu être réalisées ne sont pas considérées dans l'approche développée. L'enquête sur la qualité de l'habitat en Région wallonne (MRW, 2007), menée auprès des occupants de 6.014 logements, montre que les travaux de rénovation semblent concentrés sur le remplacement du vitrage et, dans une moindre mesure, l'isolation de la toiture. Très peu de murs et de dalles sont isolés en rénovation, ce qui montre une très grande inertie du stock existant par rapport aux politiques de rénovations et d'améliorations énergétiques. L'enquête relève que 52,2% des toitures sont isolées thermiquement en totalité et 10,7% en partie. Dans plus de 75% des cas, le matériau utilisé est la laine minérale. Une analyse plus approfondie révèle qu'à peine 10%

<sup>18</sup> Conformément aux exigences d'Umax fixées dans la Directive PEB

<sup>19</sup> Conformément aux exigences d'Umax fixées dans la Directive PEB

des toitures isolées disposent d'une épaisseur d'isolant supérieure à 12 centimètres, ce qui est relativement faible au vu des recommandations actuelles. Environ 50% des toitures isolées ont plus de 6 centimètres d'isolant, 36,4% ont entre 3 et 6 centimètres d'isolant. Ces résultats, extrapolés d'un nombre relativement restreint d'observations, sont toutefois soumis à beaucoup de précautions. Moins de 30% (28,9%) des murs extérieurs sont totalement isolés, 7% sont partiellement isolés et donc 64,1% sont non isolés. Ici aussi, l'épaisseur d'isolant est faible en regard des standards actuels. Deux tiers des logements qui ont des murs isolés datent d'après 1971. En termes d'épaisseur, 18,1% présentent entre 1 et 3 centimètres, 38% de 4 à 6 centimètres, 15,8% de 7 à 10 centimètres (pour 28,2% des cas, l'épaisseur d'isolant mis en œuvre n'est pas connue). Les matériaux les plus couramment utilisés sont les panneaux synthétiques (40,2%), la laine minérale (35,5%) et les matériaux naturels (18,8%). Plus de 80% des bâtiments wallons disposent en outre de vitrages isolants. On tombe toutefois à une proportion de 2 bâtiments sur 3 s'il s'agit de retenir uniquement les bâtiments entièrement équipés de vitrages isolants. Les matériaux les plus utilisés pour les châssis sont le bois (62,6% des constructions principales) et le PVC (29,4%).

Il n'y a pas d'isolation des planchers dans 72,2% des bâtiments. L'isolation est totale dans 21,2% et partielle dans 6,5% des cas. L'épaisseur la plus couramment mise en œuvre est de 4 à 6 centimètres (31,8%) puis de 1 à 3 centimètres et de 7 à 10 centimètres (respectivement 20,9% et 20,1%). Les panneaux isolants sont les plus couramment utilisés (49,2%), suivis des mortiers isolants (30,4%) et de la mousse de polyuréthane (20,5%).

### 3.3.2. Les simulations thermiques dynamiques

La combinaison des critères considérés dans la classification typologique donne 120 types de bâtiments résidentiels périurbains. Chacun de ces bâtiments-types est soumis à une simulation thermique dynamique. Les simulations thermiques dynamiques visent à déterminer le comportement thermique d'un bâtiment en régime dynamique, c'est-à-dire que le comportement du bâtiment est simulé, heure par heure, en fonction de l'évolution de la météo, de la présence des occupants, etc.

Le logiciel de simulation thermique dynamique utilisé est Pleiades+Comfie, développé par le Centre d'Energétique de l'Ecole des Mines de Paris. Le logiciel est couplé à un modeleur 2D-3D (Alcyone) qui transfère les données architecturales à l'outil de simulation thermique Pleiades+Comfie. Le modèle importé d'Alcyone doit être complété par des données sur l'utilisation du bâtiment et des données météorologiques horaires. Le programme Pleiades+Comfie calcule alors les besoins d'énergie (chauffage, climatisation et éclairage) et les températures horaires pour les différentes zones thermiques du bâtiment, en régime dynamique.

Le logiciel Pleiades+Comfie fournit en sortie une série d'indicateurs dont ceux qui nous intéressent, dans le cadre de la présente étude, sont :

- Les besoins en chauffage (annuel et par m<sup>2</sup>).
- Les températures minimum, maximum et moyenne et le taux d'inconfort (% du temps d'occupation pour lequel la température est supérieure à 27°C).

- Les apports solaires bruts, c'est-à-dire l'énergie qui pénètre dans le bâtiment par les vitrages.
- Les déperditions par les parois.

Le logiciel Pleiades+Comfie a été validé par l'International Energy Agency Bestest (Benchmark for Building Energy Simulation Programs) (Peuportier, 1989, Peuportier, 2005).

### 3.3.3. Les hypothèses de calcul

#### i. *Données météorologiques*

Les simulations thermiques sont réalisées sur base des données météorologiques de la station d'Uccle (Tableau IV-11). Le climat (situation géographique) n'est en effet pas une variable liée à la forme urbaine et il convient donc de pouvoir étudier l'impact de différentes stratégies de rénovation énergétique ou de comparer l'impact de différentes formes périurbaines, indépendamment du climat. Dans l'optique de l'évaluation énergétique des quartiers et de la comparaison avec le transport, la localisation peut être prise en compte en appliquant simplement un coefficient correctif relatif à l'écart entre les degrés-jours de référence et les degrés-jours de la localisation considérée (Figure IV-4).

*Tableau IV-11 : Caractéristiques relatives aux données météorologiques utilisées (Uccle) et comparaison avec Saint-Hubert.*

	<b>Uccle</b>	<b>Saint-Hubert</b>
Localisation	Latitude: N 50° 54' Longitude: E 4° 31'	Latitude: N 50° 1' Longitude: E 5° 24'
Altitude (au-dessus du niveau de la mer)	58 m	557 m
Pression standard à cette altitude	100630 Pa	94810Pa
Température maximum	34,9°C	26°C
Température minimum	-9,1°C	-11,2°C
Température moyenne	10,29°C	6,66°C
Température du sol	12,38°C	7,35 °C

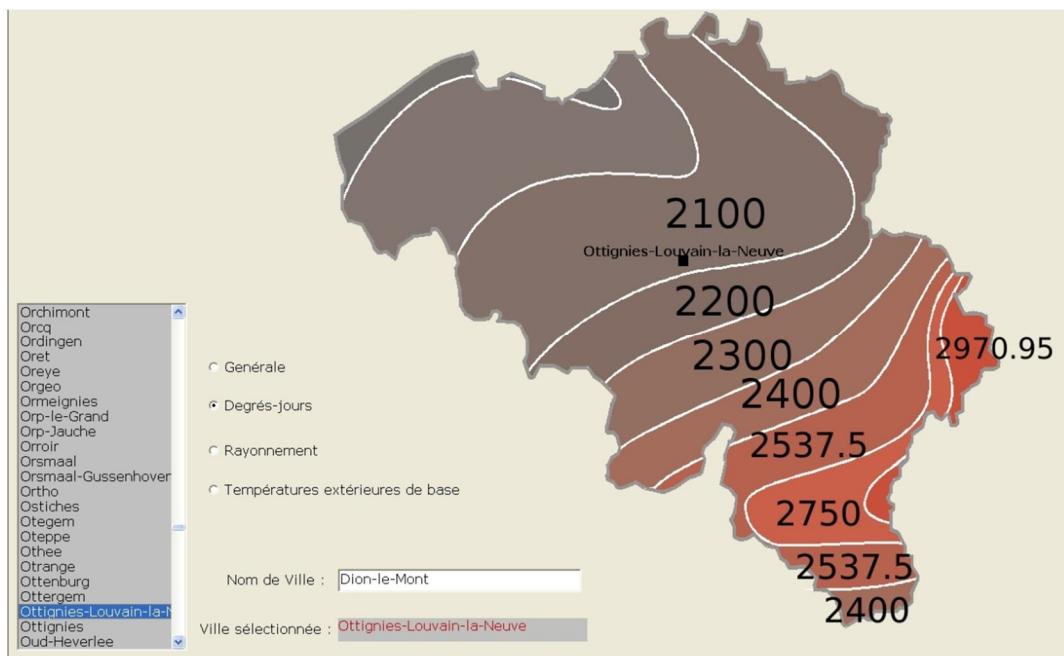


Figure IV-4 : Carte indicative des degrés-jours en Wallonie, ©OPTI-maisons.

### ii. Scenarios de simulations

Outre la géométrie du bâtiment et les caractéristiques des parois et fenêtres, les aspects suivants ont été pris en considération lors des simulations thermiques dynamiques :

- Ventilation extérieure constante selon les informations données dans le Tableau IV-10.
- Nombre d'occupants maximum : 4 personnes si la superficie habitable est supérieure à 70m<sup>2</sup>, 2 personnes sinon.
- Scénario d'occupation : 25% de 8 à 18 heures en semaine, 100% le reste du temps.
- Apports internes dus à l'éclairage et aux appareils électroménagers : 625kWh/résident.an. La différence par rapport à la moyenne française (800kWh/résident.an) correspond à la consommation des lave-linge et lave-vaisselle qui n'est pas considérée comme apport interne car l'eau chaude est évacuée (Popovici, 2006).
- Consigne de thermostat : 18°C constants pour la zone chauffée.
- Masques proches : les débords de toiture et les retraits des fenêtres par rapport à l'alignement des murs sont considérés.
- L'ensemble du bâtiment est considéré comme une zone thermique homogène (simulation mono-zone).

### iii. Orientation et masques lointains

L'orientation des bâtiments est prise en considération dans les simulations thermiques dynamiques (simulations de chaque bâtiment par pas de 45°). Les masques lointains qui bloquent une partie du rayonnement solaire direct à certaines heures et saisons ne sont

pas considérés. Les analyses de sensibilité présentées dans le Chapitre V valident cette hypothèse.

### 3.3.4. Consommations énergétiques, à l'échelle du quartier

Les résultats des simulations thermiques dynamiques menées sur chaque bâtiment-type sont consignés dans une base de données. Les consommations annuelles de chauffage d'un quartier sont alors définies sur base de ces résultats. Les consommations annuelles des bâtiments-types sont sommées, au prorata de la répartition de chaque type de bâtiments dans le quartier pour donner la consommation énergétique imputable au chauffage des bâtiments, à l'échelle d'un quartier, en kWh. Les consommations d'énergie pour le chauffage des bâtiments de l'ensemble du quartier peuvent ensuite être ramenées à un logement, à un habitant ou à un m<sup>2</sup> pour faciliter les comparaisons entre quartiers ou variantes.

La comparaison entre consommations d'énergie pour les déplacements et consommations pour le chauffage s'effectue en kWh, à l'échelle d'un quartier, sur base annuelle.

## 4. Cycle de vie des bâtiments

### 4.1. Objectifs

L'état de l'art synthétisé dans le Chapitre III a mis en évidence l'intérêt des approches en cycle de vie mais aussi les nombreuses limitations intrinsèques à leur application au domaine du bâtiment ainsi que l'inexistence, à l'heure actuelle, d'outils permettant de mener des analyses en cycle de vie à l'échelle de tout un quartier. Etudier l'impact de scénarios de renouvellement relatifs notamment à la démolition / reconstruction éventuelle des quartiers implique de maîtriser avec suffisamment de précision et de connaissances un ensemble complexe de paramètres relatifs au cycle de vie des bâtiments et des quartiers. Compte tenu de la limitation actuelle de ce champ de recherches, l'approche proposée ici est donc très simplifiée (le développement d'un outil d'analyse en cycle de vie des quartiers sortant clairement du cadre de la présente contribution) et se limite à l'échelle du bâtiment, sur base d'un outil d'évaluation existant. Les résultats issus de ces simulations en cycle de vie seront exploités, discutés et mis en perspective avec d'autres éléments qui modèrent cette approche dans le Chapitre V traitant des scénarios de renouvellement des quartiers périurbains.

### 4.2. Outil et hypothèses

L'analyse des consommations énergétiques des bâtiments, qui participe au bilan global du quartier, est complétée d'une analyse en cycle de vie de quelques bâtiments-types. Elle est réalisée au moyen du logiciel EQUER de l'Ecole des Mines de Paris. Il s'agit d'un module couplé au logiciel de simulation dynamique Pleiades+Comfie qui permet de réaliser une analyse en cycle de vie de l'impact environnemental du bâtiment étudié. Ainsi, l'énergie nécessaire au chauffage et à l'éclairage du bâtiment n'est plus perçue comme une simple

quantité de kWh, mais appréhendée selon une série de critères environnementaux. D'autre part, l'énergie ne concerne pas que le chauffage ou l'éclairage : l'énergie nécessaire à la fabrication des matériaux de construction, à leur transport jusqu'au bâtiment ou à l'alimentation en eau potable comme l'énergie récupérée par un incinérateur couplé à un réseau de chaleur par exemple, sont prises en compte. Des aspects non liés à l'énergie (gestion de l'eau, matériaux de construction, transport, déchets) sont aussi pris en compte. Le champ de l'analyse s'est donc élargi et permet des études plus globales (Popovici and Peuportier, 2004).

Le logiciel d'analyse en cycle de vie EQUER fournit en sortie une série de 12 indicateurs environnementaux, calculés pour les 4 phases du cycle de vie d'un bâtiment (construction, utilisation, rénovation, démolition<sup>20</sup>). Dans le cadre qui nous occupe, nous étudierons particulièrement deux de ces indicateurs :

- La consommation d'énergie primaire (GJ).
- L'effet de serre (tonnes de CO<sub>2</sub>).

Rappelons une fois de plus que la marge d'incertitude sur les données et les résultats d'une analyse en cycle de vie d'un bâtiment est élevée et que les résultats proposés doivent être étudiés avec précaution et interprétés par comparaison entre variantes.

#### 4.2.1. Les inventaires utilisés

Les données utilisées dans le logiciel EQUER proviennent de la base de données Oekoinventaire, ou Ecoinvent, (Ecole Polytechnique de Zurich et Université de Karlsruhe) et de données collectées durant le projet européen REGENER. Ces inventaires se présentent sous forme de flux élémentaires correspondant à un procédé (fabrication d'un matériau, process énergétique, etc.). Le nombre important de ces flux (environ 400) rend la manipulation des fichiers très lourde. Pour en simplifier l'utilisation, EQUER passe par un stade intermédiaire dans lequel les inventaires sont stockés sous forme agrégée, afin de condenser les informations en les regroupant par thème (Peuportier, 2004). Il est donc difficilement envisageable de modifier ces informations ou d'en ajouter de nouvelles. Nous utiliserons donc les équivalences proposées par défaut dans le logiciel. Pour les autres données (voir ci-dessous), les valeurs fournies par défaut par le logiciel EQUER sont modifiées au cas par cas, pour correspondre aux comportements wallons (les données complémentaires sont issues du rapport analytique sur l'état de l'environnement wallon 2006-2007 (Cellule Etat de l'Environnement Wallon, 2007)). La durée de vie des bâtiments est fixée à 80 ans.

#### 4.2.2. Les matériaux de construction

Les hypothèses posées concernant les matériaux de construction sont :

- Surplus de matériau en phase de chantier : 5%.
- Durée de vie des châssis et fenêtres : 30 ans.

---

<sup>20</sup> Remarquons toutefois que l'énergie utilisée sur chantier lors de la construction et de la démolition du bâtiment n'est pas prise en compte dans le logiciel EQUER.

- Durée de vie des revêtements : 15 ans.
- Distance de transport du site de fabrication au chantier : 50 km.
- Distance de transport du chantier à la décharge en fin de vie : 50 km.

#### 4.2.3. L'énergie

Les besoins en chauffage de l'enveloppe calculés dans Pleiades+Comfie sont couplés au logiciel EQUER. Il convient, en plus, de spécifier :

- Le mix de production d'électricité de base pour la Belgique : 78% nucléaire, 13% de gaz naturel, 7% d'énergie renouvelable, 5% de coke et charbon, 2% de pétrole (Cellule Etat de l'Environnement Wallon, 2007).
- Le type d'énergie utilisé pour le chauffage : le gaz par défaut.
- Le type d'énergie utilisé pour l'eau chaude sanitaire : le gaz par défaut.
- Les consommations électriques supplémentaires : 280 Wh/personne.jour.
- Les consommations de gaz : 200 Wh/personne.jour.

#### 4.2.4. L'eau

Ce poste sort du cadre de notre étude, car il relève de considérations relatives aux comportements des habitants plutôt qu'à la forme urbaine. Les hypothèses suivantes pourraient toutefois être utilisées pour des ménages wallons :

- Le rendement du réseau d'eau (qui dépend des fuites dans les canalisations d'eau potable) : 80%.
- La consommation d'eau froide : 90 litres/personne.jour.
- La consommation d'eau chaude : 40 litres/personne.jour.
- La présence de toilettes sèches : non.

#### 4.2.5. Les déchets

Ce poste sort du cadre de notre étude, car il relève de considérations relatives aux comportements des habitants plutôt qu'à la forme urbaine. Les hypothèses suivantes pourraient toutefois être utilisées pour des ménages wallons :

- La présence d'une collecte sélective du verre et du papier : oui.
- Le pourcentage de verre collecté et de papier collecté : 50%.
- Le pourcentage de déchets incinérés : 50%, sans valorisation énergétique.
- Le poids des déchets : 900 grammes/personne.jour.
- La distance du bâtiment aux sites de décharge, d'incinération et de recyclage : 20 kilomètres.

#### 4.2.6. Le transport des personnes

Le module simplifié de calcul proposé dans EQUER pour prendre en compte le transport des personnes est trop simplifié que pour être utilisé dans le cadre de notre étude. Nous ne prendrons donc pas le transport des occupants en considération dans l'analyse en cycle de vie d'un bâtiment dans EQUER.

## 5. Gisement solaire

### 5.1. Objectifs

En complément de la méthode d'évaluation énergétique des quartiers périurbains développée et présentée dans les sections précédentes, l'analyse du gisement solaire, à l'échelle des quartiers, offre un complément intéressant, en particulier pour l'étude de l'impact des scénarios de densification des quartiers. Il s'agit ici de quantifier le rayonnement solaire reçu par les façades et les toitures des bâtiments d'un quartier, compte tenu de leurs interactions mutuelles et pour différents scénarios de renouvellement.

### 5.2. Outils et hypothèses

Le logiciel Townscope a été développé par Teller and Azar (2001), dans le cadre du projet de recherches POLIS. Il s'agit d'un logiciel d'analyse du gisement solaire qui constitue un outil d'aide à la décision en matière de développement urbain durable. Le logiciel permet d'évaluer le rayonnement solaire direct et diffus d'espaces ouverts, sur base de modèles tridimensionnels. Ces modélisations sont réalisées, dans le cadre de la présente étude, avec le modeleur 3D Sketchup, puis importées dans Townscope.

Les calculs effectués dans le logiciel Townscope sont basés sur des projections stéréographiques solaires, réalisées en chacun des points d'études sélectionnés. Ces projections stéréographiques comprennent les tracés des parcours solaires et des heures solaires et les masques environnants (bâtiments). Il est donc possible d'identifier très rapidement quelles sont les heures potentielles d'ensoleillement en un point et de mesurer l'influence des masques pour différents scénarios. Les valeurs annuelles d'ensoleillement sont obtenues en multipliant, pour chaque mois, les durées d'ensoleillement calculées pour une journée de référence de ce mois par le nombre de jours que compte ce mois et de sommer les résultats obtenus pour les douze mois de l'année. Les valeurs obtenues représentent l'ensoleillement maximum théoriquement enregistrable sous la latitude considérée (Bruxelles) sur les façades, les toitures des bâtiments ou au sol. L'analyse des résultats proposés se fait par comparaison avec une situation de référence (le site vierge ou le quartier en l'état existant), ce qui permet de quantifier la perte effective d'ensoleillement « avant » et « après » intervention. Les résultats obtenus pourraient également être exploités afin de déterminer un potentiel photovoltaïque ou solaire thermique, moyennant un calibrage des données fournies par le logiciel.

Les calculs sont effectués dans l'hypothèse d'un ciel serein (ce qui maximise l'impact des masques considérés). Tous les calculs sont réalisés en heures solaires vraies, ce qui signifie que le soleil est au zénith à midi. L'impact de la végétation n'est pas considéré.

## 6. Reproductibilité, limitations et types d'applications

Une méthode d'évaluation énergétique des quartiers périurbains wallons a été développée. Elle prend en compte les consommations d'énergie relatives aux déplacements des personnes et celles relatives au chauffage des bâtiments. Un module d'analyse en cycle de vie et un outil d'analyse du gisement solaire sont utilisés, en complément de la méthode, pour prendre en compte les consommations des bâtiments sur l'ensemble de leur cycle de vie et le potentiel solaire, à l'échelle du quartier.

La méthode d'évaluation énergétique des quartiers périurbains est appliquée, dans le Chapitre V, à des cas d'études-types représentatifs des configurations périurbaines wallonnes les plus courantes de façon à démontrer son applicabilité, à dresser un cadastre énergétique des quartiers en l'état actuel et à identifier les paramètres les plus influents. Sur cette base, différents scénarios de renouvellement des quartiers-types sont proposés et leur impact en termes de consommation d'énergie est quantifié. Les indices de performance des déplacements domicile-travail et domicile-école sont généralisés et appliqués à l'ensemble du territoire wallon dans les Chapitres VI et VII de façon à investiguer les liens entre structure du territoire et consommations d'énergie pour les déplacements.

En termes de limitations de l'approche développée, il est nécessaire de rappeler que les simulations thermiques dynamiques sont des outils intéressants pour évaluer l'efficacité énergétique des bâtiments et l'impact de différents scénarios de renouvellement. Toutefois, ces simulations sont basées sur des comportements-types des occupants qui s'éloignent parfois significativement des comportements réels. Hilderson et al. (2010) avancent ainsi que l'utilisation et la maintenance du bâtiment, le comportement des occupants et la qualité de l'air intérieur, qui sont tous des éléments directement liés aux comportements humains, ont une influence aussi grande, voire plus importante, que le climat, l'enveloppe du bâtiment et les systèmes, ce qui confirme l'idée selon laquelle la conception et la rénovation de bâtiments durables et économies en énergie nécessitent plus que des considérations d'ordre technique (Brandemuehl, 2004).

En termes de reproductibilité, les développements relatifs à l'évaluation énergétique des déplacements sont reproductibles à d'autres territoires, en adaptant simplement les données au contexte local (taux de remplissage des bus, facteurs de consommations, etc.). La réutilisation de la base de données développée pour l'évaluation énergétique des bâtiments doit s'effectuer dans un contexte proche en termes de densité, de façon à ce que les hypothèses relatives aux masques environnants restent valables (ce qui n'est pas le cas en centre urbain dense, par exemple). L'adaptation des consommations en fonction d'un nombre de degrés-jours local pourrait permettre de réutiliser la base de données des résultats dans d'autres territoires au climat similaire au nôtre (la climatisation, par exemple, n'est pas prise en compte ce qui limite la reproductibilité de la base de données dans des climats plus chauds). La méthode développée est basée sur une classification typologique et des simulations thermiques dynamiques. Elle peut, quant à elle, être généralisée et reproduite sur d'autres types de quartiers et d'autres territoires.

Sur base du développement de la méthode d'évaluation énergétique des quartiers périurbains wallons présentée dans ce chapitre, un outil d'aide à la décision et à l'évaluation de l'efficacité énergétique des quartiers périurbains a été développé dans le cadre du projet de recherches SAFE (Suburban Areas Favoring Energy efficiency), en collaboration avec le laboratoire Architecture et climat de l'Université catholique de Louvain. Cet outil, disponible gratuitement sur internet ([www.safe-energie.be](http://www.safe-energie.be)), a pour objectifs de sensibiliser le grand public à la question des consommations d'énergie (et en particulier l'importance de considérer la localisation d'un logement en complément de ses performances énergétiques) et de constituer un outil d'aide à la décision à destination des autorités locales, en rendant disponibles à ces acteurs, des résultats réalisés sur base d'outils complexes (simulations thermiques dynamiques, traitements statistiques de base de données, analyses en cycle de vie, etc.).

La partie « transport » de l'outil SAFE est intégralement basée sur les développements réalisés dans le cadre de cette thèse. Elle exploite, en particulier, l'indice de performance des déplacements présenté dans la Section 2.3.2 (pour l'évaluation rapide et l'évaluation quartier de l'outil SAFE) et la routine présentée dans la Section 2.3.4 (pour l'évaluation énergétique détaillée de l'outil SAFE).

La partie « bâtiment » exploite la méthode présentée ci-dessus (classification typologique et simulations thermiques dynamiques) et comprend une base de données reprenant les besoins et les consommations de chauffage de nombreux bâtiments-types ainsi que les résultats des nombreuses variations paramétriques qui abordent notamment les caractéristiques des bâtiments, les systèmes énergétiques et le comportement des occupants. La base de données et les variations paramétriques relatives au « bâtiment » utilisées dans l'outil SAFE ont été réalisées par le laboratoire Architecture et climat de l'Université de Louvain (Tatiana de Meester, en particulier, sous la direction du Prof. André De Herde)<sup>21</sup> dans le cadre du projet de recherches SAFE (Suburban Areas Favoring Energy efficiency).

---

<sup>21</sup> Les simulations thermiques dynamiques ont été réalisées, en multi-zones, avec le logiciel TAS.

# Chapitre V

## Applications et Scénarios Prospectifs

### 1. Introduction et objectifs

L'objet de ce cinquième chapitre est d'appliquer la méthode d'évaluation énergétique des quartiers périurbains à 4 cas-types, présentés dans la Section 2, afin de démontrer son applicabilité tant dans l'établissement d'un cadastre énergétique à l'échelle du quartier (Section 3) que dans l'identification des paramètres les plus influents (Section 4). Sur cette base, il s'agira ensuite de formaliser et d'évaluer différents scénarios de renouvellement des quartiers périurbains wallons (Section 5) de façon à en tirer des pistes d'actions générales et concrètes (Section 6).

### 2. Cas d'études

Quatre cas concrets représentatifs des quatre configurations périurbaines principales mises en évidence dans la définition du territoire périurbain wallon et l'identification des quartiers-types (Chapitre II) ont été sélectionnés :

- Le quartier de type « ruban » est constitué de constructions pavillonnaires qui se sont développées de part et d'autre d'une voirie reliant deux noyaux existants. Le cas d'étude est un quartier reliant les noyaux de Bellefontaine et Tintigny (Figure V-1).
- Le quartier de type « semi-mitoyen » est composé d'un ensemble de constructions mitoyennes ou semi-mitoyennes homogènes bâties de façon répétitive. Le cas d'étude est la cité sociale Chavée à Fontaine-L'Evêque (Figure V-2).
- Le quartier de type « nappe » est un tissu de constructions individuelles « 4 façades », construites de façon individuelle par les ménages, souvent selon la formule du « clé sur porte ». Le cas d'étude est le lotissement Géronsart à Jambes (Figure V-3).
- Le quartier de type « mixte » est un tissu hétérogène, tant au niveau de la forme, de l'époque des constructions que des fonctions. Il se développe en général autour d'un noyau ancien auquel il vient s'adjointre des développements plus récents. Le cas d'étude est un îlot développé autour du centre de Rotheux (Figure V-4).

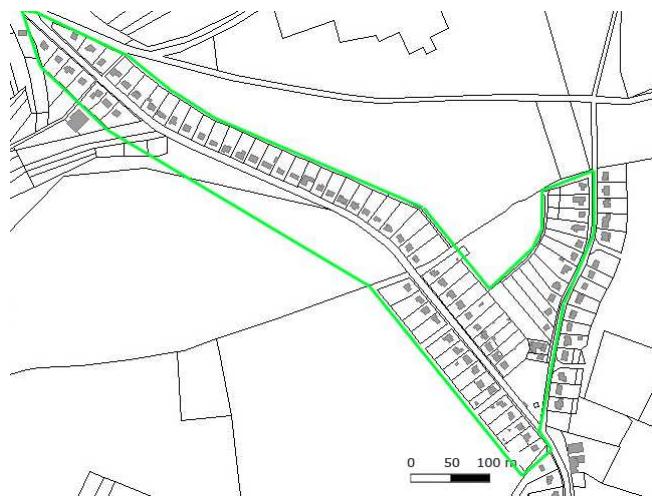


Figure V-1 : Cas 1 - Un quartier de type « ruban » à Tintigny-Bellefontaine.



Figure V-2 : Cas 2 - Un quartier de type « semi-mitoyen » à Fontaine-L'Evêque.



Figure V-3 : Cas 3 - Un quartier de type « nappe » à Jambes.



Figure V-4 : Cas 4 - Un quartier de type « mixte » à Rotheux.

Tableau V-1 : Caractéristiques principales des 4 cas d'études.

	Cas 1 - Tintigny	Cas 2 - Fontaine	Cas 3 - Jambes	Cas 4 - Rotheux
Type de bâtiments				
- Mitoyen		XXX		XXX
- Semi-mitoyen		XXX		XXX
- « 4 façades »	XXX		XXX	XXX
Part des logements construits				
- Avant 1950	0%	43,9%	0%	46,8%
- Entre 1951 et 1980	52,5%	26,8%	43,5%	22,0%
- Entre 1981 et 1995	34,4%	29,3%	49,1%	11,6%
- Entre 1996 et 2008	13,1%	0%	7,3%	19,6%
Nombre de logements	60	82	395	55
Nombre d'habitants	155	195	1.120	151
Nombre de personnes par logement	2,54	2,37	2,83	2,74
Superficie moyenne par logement, m <sup>2</sup>	111 m <sup>2</sup>	97 m <sup>2</sup>	109 m <sup>2</sup>	121 m <sup>2</sup>
Superficie totale, m <sup>2</sup>	6.680 m <sup>2</sup>	8.008 m <sup>2</sup>	43.280 m <sup>2</sup>	6.690 m <sup>2</sup>
Distance au centre, km	29 km	9 km	6 km	17 km
Distance à la gare, km	8 km	9 km	6 km	15 km
Desserte en bus	Très faible	Bonne	Faible	Faible

### 3. Evaluation énergétique<sup>1</sup>

Les consommations énergétiques (chauffage des bâtiments et déplacements des personnes) des quatre quartiers-types ont été modélisées grâce à la méthode développée dans le Chapitre IV. Les résultats sont proposés sous la forme d'indicateurs qui s'expriment en kWh par personne et par an dans le Tableau V-2. Remarquons que, pour focaliser l'analyse sur la forme des quartiers et leurs caractéristiques constructives, le nombre de degrés-jours d'Uccle a été appliqué à chaque cas.

Tableau V-2 : Résultats de l'évaluation énergétique des 4 cas d'études, par unité de comparaison (kWh/personne.an).

	Cas 1 - Tintigny	Cas 2 - Fontaine	Cas 3 - Jambes	Cas 4 - Rotheux
Chauffage, kWh/personne.an	8.878	8.213	5.681	10.412
Chauffage, kWh/m <sup>2</sup> .an	206	200	147	235
Transport – travail, kWh/personne.an	2.171	702	1.656	1.641
Transport – école, kWh/personne.an	307	218	297	366

Les consommations d'énergie pour le chauffage des bâtiments représentent, dans tous les cas, l'indicateur le plus élevé du bilan énergétique des quartiers. En ce qui concerne les paramètres les plus influents, une différence claire est mise en évidence entre les logements et les quartiers construits avant ou après la première réglementation thermique des bâtiments en Wallonie. Les logements construits après la première réglementation consomment 130 kWh/m<sup>2</sup>.an, voire moins, alors que ceux construits avant 1980, en particulier les bâtiments de type « 4 façades », peuvent consommer annuellement de 235 à 401 kWh/m<sup>2</sup>. Ces valeurs sont très élevées par rapport aux consommations des nouvelles constructions et notamment en regard des standards « basse énergie » (besoins de chauffage < 60 kWh/m<sup>2</sup>.an) ou « passif » (besoins de chauffage < 15 kWh/m<sup>2</sup>.an). Les bâtiments mitoyens ou semi-mitoyens consomment de 84 à 319 kWh/m<sup>2</sup>.an, selon leur année de construction.

Pour une même époque de construction et une même superficie bâtie, les bâtiments mitoyens et semi-mitoyens consomment respectivement 23,6% (écart à la moyenne de 2,5) et 13,5 % (écart à la moyenne de 1,11) de moins que les bâtiments de type « 4 façades ». A niveau d'isolation équivalent, une maison mitoyenne consomme en moyenne 14,8% (écart à la moyenne de 1,77) d'énergie de moins qu'une maison semi-mitoyenne, ce qui met en

---

<sup>1</sup> Ces résultats ont été publiés dans l'article suivant : MARIQUE, A.-F. & REITER, S. 2012b. A Method to Evaluate the Energy Consumption of Suburban Neighbourhood. *HVAC&R Research*, 18, 88-99. Les chiffres présentés dans ce tableau peuvent différer de ceux publiés dans l'article ibid. Certaines hypothèses de base ne sont pas les mêmes. L'article prend par exemple en compte un pourcentage indicatif de rénovation, les consommations relatives à l'eau chaude et à l'éclairage, les déplacements pour le commerce et les loisirs, etc.

évidence l'importance de la mitoyenneté dans le bilan énergétique des quartiers. Le troisième facteur influent est la compacité des formes bâties. Pour un même niveau d'isolation et une même superficie chauffée, la consommation d'énergie d'un bâtiment à deux niveaux (dont un sous toiture) est 35% plus faible que celle d'une maison de plain-pied car les surfaces de déperditions sont moins importantes.

Les types de bâtiments qui reçoivent le plus d'apports solaires sont les maisons « 4 façades » mais on remarque que la valorisation de ces apports n'a été que rarement intégrée lors de la conception des quartiers et des bâtiments. La composition des quartiers et des façades (orientation et répartition des surfaces vitrées) est dictée par des impératifs d'ordre fonctionnel (implantation parallèle à la voirie, façade à rue peu vitrée), indépendamment de l'orientation et du potentiel solaire qui pourrait en découler.

Dans tous les cas, les obstructions et les masques qui réduisent les apports solaires reçus par les façades et les toitures restent très limités. L'impact des masques a été étudié sur les bâtiments et quartiers issus de la classification typologique. L'impact des masques environnants sur les besoins de chauffage reste marginal pour autant que la densité nette des quartiers soit comprise entre 5 et 12 logements à l'hectare, seuils utilisés pour définir les quartiers périurbains dans le Chapitre II. Les Figure V-5 et Figure V-6 illustrent deux des cas d'études testés : une maison isolée implantée face à une forêt (considérée ici, dans une configuration défavorable, comme un mur parfaitement opaque) et une maison implantée dans un lotissement présentant une densité de 10 logements par hectare.

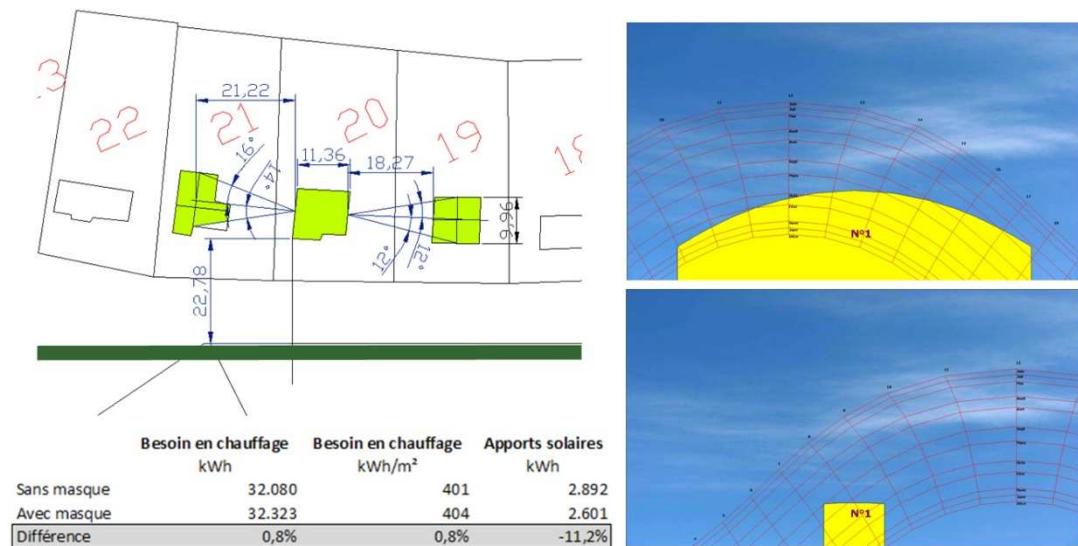


Figure V-5 : Impact des masques (forêt et maisons voisines) pour une habitation « 4 façades ». Les deux figures de droite représentent l'impact de la forêt (en haut) et d'une maison voisine (en bas) sur deux façades de la maison testée. Les traits rouges représentent la course du soleil sur ces deux façades. Le tableau, en bas à gauche, donne la diminution des besoins en chauffage et des apports solaires pour la maison testée, avec et sans les masques.

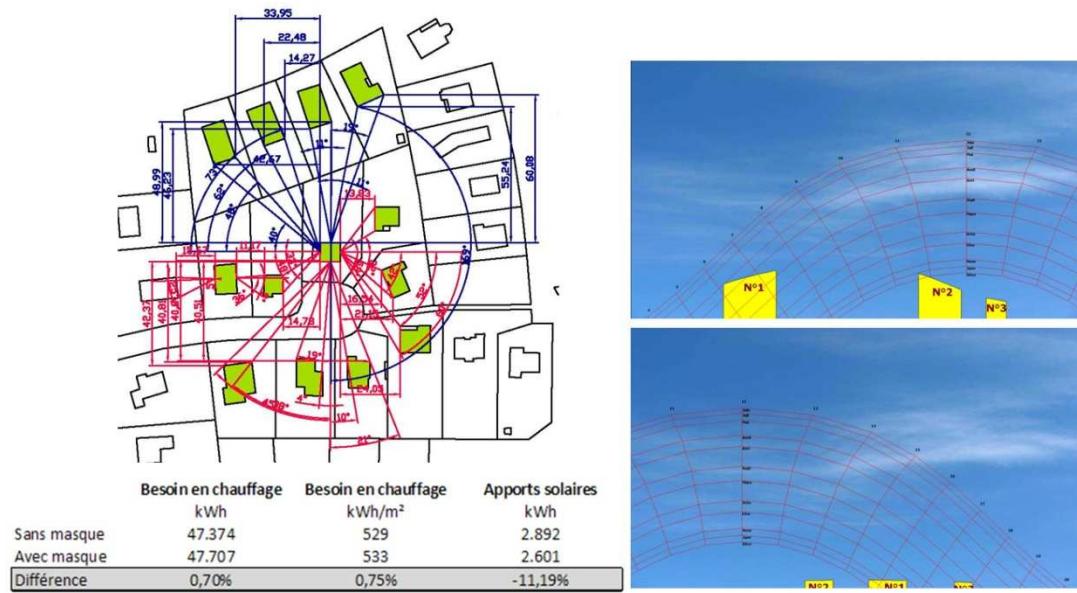


Figure V-6 : Impact des masques sur les besoins en chauffage et les apports solaires d'une maison « 4 façades » implantée dans un quartier présentant une densité de 10 logements à l'hectare. Les images de droite montrent l'influence réduite des masques sur deux des façades.

Il existe donc un réel potentiel de valorisation de l'énergie solaire, tant via des techniques « passives » (par exemple en respectant les principes de base de l'architecture bioclimatique) qu' « actives » (énergie solaire thermique, photovoltaïque, etc.), qui pourrait être exploité dans les quartiers périurbains, en construction neuve et lors de rénovations lourdes.

L'impact de l'isolation a également été investigué sur le cycle de vie des bâtiments-types des quatre cas d'études. Trois scénarios d'isolation ont été modélisés : une version non isolée, une version légèrement isolée correspondant aux standards en vigueur de 1980 à 1996, une version isolée correspondant aux standards en vigueur de 1996 à 2008, selon les hypothèses présentées dans le Chapitre IV. Les résultats des analyses en cycle de vie montrent que, dans tous les cas, c'est la phase d'utilisation qui représente l'impact le plus important, tant en termes de consommations d'énergie que d'émissions de gaz à effet de serre. Selon le type de bâtiment-type, l'impact de la phase d'utilisation (durée de vie de 80 ans) représente en effet entre 95,6% et 97,9%. A titre d'illustration, la partie droite de la Figure V-7 présente les résultats de l'analyse en cycle de vie d'un bâtiment « 4 façades » de 120m<sup>2</sup>. Cette tendance est conforme aux résultats mis en évidence dans la littérature traitant des analyses en cycle de vie appliquées aux bâtiments.

L'impact de la phase d'utilisation diminue pour des durées de vie plus courtes et atteint 92% pour un cycle de vie de 40 ans et 90,6% pour une durée de vie de 30 ans, en moyenne. L'impact des phases de construction et de démolition est nettement inférieur. Il convient donc prioritairement de privilégier les actions visant à réduire l'utilisation de flux (énergie, mais aussi eau et déchets dans une perspective plus large) lors de la phase d'utilisation des bâtiments avant de favoriser le recours à des matériaux plus performants en termes d'énergie grise. Les résultats des analyses en cycle de vie montrent aussi que les

premiers centimètres d'isolation sont ceux qui ont le plus d'impact sur le bilan global. La réduction des différents impacts environnementaux considérés est ainsi plus importante entre la version non isolée et la version légèrement isolée, qu'entre le passage d'une version déjà isolée à une version avec isolation renforcée (Figure V-7, gauche).

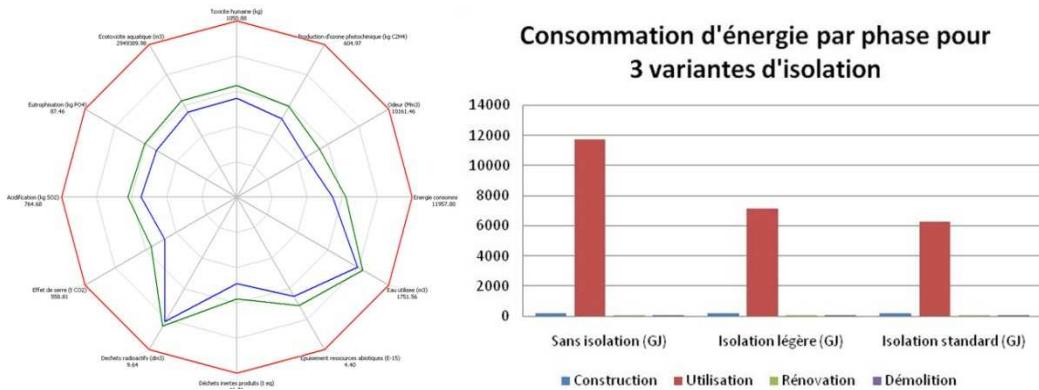


Figure V-7 : Exemple de résultats d'une analyse en cycle de vie réalisée avec le logiciel EQUER pour un bâtiment « 4 façades » de 120m<sup>2</sup> et une durée de vie de 80 ans : à gauche, impact de trois variantes d'isolation d'un même bâtiment sur les 12 indicateurs proposés par le logiciel. A droite, impact des trois stratégies d'isolation sur les 4 phases du cycle de vie du bâtiment.

En ce qui concerne les déplacements des personnes, l'indicateur relatif aux déplacements domicile-travail est largement supérieur à celui relatif aux déplacements domicile-école, pour les quatre cas d'études considérés. Les indicateurs correspondants sont d'autant plus mauvais (valeur élevée) que le quartier est situé à grande distance d'un centre ville et mal desservi en transport en commun. Ces éléments feront l'objet d'études approfondies, généralisées à l'ensemble du territoire wallon, dans les chapitres VI et VII, de façon à pouvoir mettre en évidence, de façon plus robuste, les variables explicatives les plus significatives.

## 4. Variations paramétriques

Des variations paramétriques ont été réalisées de façon à identifier les paramètres les plus influents pour améliorer l'efficacité énergétique des quatre cas d'études représentatifs et orienter le choix des stratégies de renouvellement périurbain qui seront proposées dans la Section 5 de ce chapitre. Trois paramètres relatifs à la morphologie des quartiers et à l'isolation sont d'abord testés pour les 4 quartiers-types (Section 4.1). Plusieurs scénarios relatifs aux déplacements des personnes sont ensuite évalués (Section 4.2). Enfin, la Section 4.3 évalue l'influence de scénarios relatifs à ces deux postes sur les consommations totales des quartiers, de façon à dresser une hiérarchie des actions les plus efficaces.

## 4.1. Les paramètres relatifs à la forme urbaine

### 4.1.1. La mitoyenneté

La continuité entre les bâtiments, ou mitoyenneté, est souvent présentée comme un critère important en termes de réduction des consommations énergétiques des bâtiments.

Nous avons ici testé l'impact de ce paramètre, pour les 2 quartiers-types de la recherche qui sont composés uniquement de bâtiments isolés de type « 4 façades » (le quartier de type « ruban » de Tintigny et le quartier de type « nappe » de Jambes). Nous avons considéré, de façon purement théorique, que chaque ensemble de 4 maisons individuelles isolées était remplacé par un groupe de quatre maisons accolées (soit 2 maisons mitoyennes et 2 maisons semi-mitoyennes). Les gains énergétiques obtenus sont significatifs puisque cette distribution théorique plus compacte des bâtiments engendre une réduction des consommations de chauffage de 19,9% dans le cas du quartier de type « ruban » et de 19,0% dans le cas du quartier de type « nappe ». Si les bâtiments étaient groupés par 2 (ensemble de 2 maisons semi-mitoyennes) plutôt que par 4, les consommations de chauffage du quartier de type « ruban » pourraient être réduites de 13,1% et celles du quartier de type « nappe » de 12,9%.

### 4.1.2. L'orientation du quartier

Chaque quartier, modélisé en l'état actuel en ce qui concerne l'isolation et les autres paramètres constructifs, a été soumis à une rotation de 360°, effectuée par pas de 45° de façon à définir 8 variantes par quartier (orientation = 0° / 45° / 90° / 135° / 180° / 225° / 270° / 315°). Les variantes ont, conformément à la méthode développée et présentée dans le chapitre précédent, fait l'objet de simulations thermiques dynamiques qui montrent que l'impact de l'orientation sur les consommations de chauffage des quartiers, en l'état actuel, est marginal. Il reste en effet inférieur à 3%, quel que soit le type de quartier étudié. Ces résultats sont cohérents avec l'approche développée dans les variations paramétriques « bâtiment » et avec la littérature. Maïzia et al. (2009), par exemple, ont effectué le même type d'étude pour une série de blocs urbains caractéristiques de la Région Ile-de-France et ont obtenu une variation maximale de 3% selon l'orientation des blocs.

Ces résultats s'expliquent par la faible prise en compte, en l'état actuel, des critères élémentaires de bioclimatisme et d'accès solaire lors de la conception des maisons et des quartiers périurbains. En effet, l'orientation des bâtiments et la composition des façades semblent résulter de considérations purement fonctionnelles (faîte parallèle ou perpendiculaire à la voirie, façade relativement opaque à rue (une porte d'entrée et une porte de garage), façade ouverte vers le jardin à l'arrière quelle que soit l'orientation). Ces considérations posent, en amont, la question de la composition du quartier (tracé des voiries et des parcelles) qui devrait également être l'objet de plus d'attention de façon à permettre une meilleure exploitation des gains solaires en lien avec l'orientation.

de Meester (2009) montre à cet effet qu'une répartition de 50% des fenêtres vers le sud, de 20% vers l'est et l'ouest et de 10% au nord permet une économie d'énergie de 1.500 kWh

par an par rapport à une répartition égale du vitrage sur les 4 façades du bâtiment. Les orientations entre le sud-est et le sud-ouest y sont identifiées comme les plus avantageuses bien que de larges surfaces vitrées vers l'est et l'ouest puissent entraîner des problèmes de surchauffe. Il s'agit toutefois de mentionner que l'orientation devient un facteur influent si ces principes sont appliqués. Afin d'étayer ces propos, un modèle-type de bâtiment (« 4 façades », 120 m<sup>2</sup>), qui prend mieux en compte les apports solaires éventuels grâce à une meilleure répartition des surfaces vitrées sur les façades (façade sud très ouverte, façade nord fermée), a été défini et implanté dans le quartier de type nappe.

Dans cette configuration, l'orientation du bâtiment joue un rôle plus important sur les consommations de chauffage. Le Tableau V-3 présente, pour trois variantes d'isolation, les consommations énergétiques relatives aux 8 variantes d'orientation définies (où 0° signifie que la façade vitrée est orientée au sud).

*Tableau V-3 : Consommation de chauffage (kWh/m<sup>2</sup>.an) pour différents scénarios d'orientation et d'isolation.*

Orientation	1950 -1980	1981-1995	1996-2011
0°	306	95	73
45°	306	95	73
90°	308	97	75
135°	309	99	76
180°	310	100	77
225°	310	100	77
270°	309	99	76
315°	307	97	74
Différence maximum / colonne	1,3 %	5,0 %	5,2 %

On voit ainsi que l'impact de l'orientation peut atteindre 5,2 %, entre les versions «0° - façade vitrée orientée au sud » et « 180° - façade vitrée orientée au nord », pour la version isolée du bâtiment. L'impact de l'orientation reste limité pour la version « non isolée » du bâtiment car les apports solaires sont rapidement dissipés via les parois non isolées et le simple vitrage. Rappelons enfin, qu'en principe les grandes surfaces vitrées orientées vers le soleil sont intéressantes pour récupérer des gains solaires. Dans la pratique, il convient toutefois d'y apporter quelques nuances, car en dépit des progrès technologiques récents, le vitrage présente toujours un pouvoir d'isolation nettement inférieur à celui des parties opaques et les pertes par transmission augmentent considérablement lorsqu'on étend la surface vitrée. En ce qui concerne les problèmes éventuels de surchauffe en été et de confort thermique en hiver, il convient d'éviter les trop grandes surfaces vitrées, même lorsqu'elles sont orientées au sud (de Meester, 2009). Ces recommandations sont importantes à considérer lors du développement de nouveaux quartiers, voire dans le

cadre d'une révision des prescriptions appliquées lors de la conception des réseaux parcellaire et viaire d'un quartier et l'octroi des permis d'urbanisme.

#### 4.1.3. La consommation des bâtiments en phase d'utilisation (isolation)

L'évaluation des quartiers-types en l'état actuel a montré les faibles performances énergétiques des quartiers existants. Ce constat corrobore par ailleurs des études empiriques comme celle de Kints (2008), celles menées par l'Institut National belge des Statistiques ou l'enquête logements sur la qualité de l'habitat de la Région wallonne (MRW 2007). Pour rappel, la première réglementation thermique adoptée en Wallonie date de 1985 et a été revue en 1996 tout en restant relativement laxiste, notamment en comparaison avec les régions et pays voisins. L'entrée en vigueur progressive de la nouvelle réglementation européenne sur la Performance Energétique des Bâtiments (DPEB) garantit toutefois l'amélioration notable des performances des nouveaux bâtiments ou des rénovations de plus de 1.000m<sup>2</sup> soumises à permis d'urbanisme.

L'objet de la présente section est d'évaluer l'impact du paramètre « consommation des bâtiments en phase d'utilisation » sur les consommations globales des 4 quartiers-types. Ce paramètre étant directement lié à l'isolation, c'est par ce biais que nous aborderons la question. Nous avons donc considéré, en première approche et conformément à une des hypothèses de la thèse qui postule que les mesures ponctuelles prises à l'échelle du bâtiment individuel ne suffiront pas à améliorer de façon significative l'efficacité énergétique des quartiers périurbains, cinq scénarios relatifs à l'isolation de l'enveloppe des bâtiments. Dans le premier scénario, l'ensemble des toitures du quartier sont isolées de 20 centimètres de laine minérale. Dans le second, en plus de l'isolation de la toiture, l'ensemble des vitrages est remplacé par du double vitrage performant. Verbeeck and Hens (2005) ont mis en évidence, sur base d'une analyse énergétique du stock bâti flamand, que ces deux mesures sont les plus couramment mises en œuvre et qu'elles sont parmi les stratégies les plus efficaces pour améliorer l'efficacité énergétique des logements. Les trois derniers scénarios considèrent que tous les bâtiments des quartiers pourraient être rénovés de façon à atteindre un standard d'isolation  $K < K45$  (standard en vigueur pour les nouvelles constructions, les reconstructions et les transformations soumises à permis, à partir du 1<sup>er</sup> septembre 2008, pendant la phase transitoire entre la réglementation de 1996 ( $K < K55$ ) et l'entrée en vigueur totale de la Directive européenne sur la Performance Energétique des Bâtiments en 2011). Cette hypothèse est pertinente et faisable, en tout cas techniquement, car l'isolation de la toiture par l'intérieur, l'isolation des dalles de sol par la cave (voire par les vides ventilés) et le remplissage de la coulisse des murs creux (ou l'isolation par l'extérieur) sont des techniques employées couramment et qui peuvent être réalisées rapidement, sans nécessiter le déménagement temporaire des occupants. La faisabilité financière de ce scénario est plus problématique, en particulier en ce qui concerne le coût d'investissement. Des dispositifs de financement prenant en compte le retour sur investissement devraient être étudiés.

Nous avons ensuite évalué les gains potentiels relatifs à des rénovations énergétiques plus poussées qui viseraient à atteindre respectivement les standards « basse énergie » (besoins de chauffage inférieurs à 60 kWh/m<sup>2</sup>.an) et « passif » (besoins de chauffage inférieurs à 15

kWh/m<sup>2</sup>.an) pour l'ensemble des bâtiments des quartiers (Tableau V-4). Ces simulations ont pour objet principal de quantifier, de façon théorique, le gain énergétique et de déterminer l'influence du facteur « consommation des bâtiments » sur les performances globales des quartiers. Les questions techniques relatives à l'étanchéité à l'air, etc. ne sont pas abordées ici.

Ces résultats confirment le potentiel important de la rénovation énergétique du bâti et confirment aussi l'hypothèse de départ de la recherche, qui postulait d'aborder la question des territoires périurbains par l'angle de l'énergie, en particulier des consommations de chauffage des bâtiments résidentiels et du transport des personnes. Ils montrent aussi l'intérêt de mener des actions de rénovation globales, pensées à l'échelle des quartiers, pour obtenir des résultats optimaux.

*Tableau V-4 : Diminution des consommations de chauffage des quatre quartiers-types, pour cinq scénarios de rénovation énergétique.*

	Cas 1 - Tintigny	Cas 2 - Fontaine	Cas 3 - Jambes	Cas 4 - Rotheux
16cm en toiture	- 7,8%	- 12,7%	- 7,3%	- 8,6%
16cm en toiture + 2V	- 15,7%	-28,8%	- 14,8%	- 15,9%
K < K45	- 58,4%	- 56,7%	- 45,2%	- 60,2%
Basse énergie	- 70,9%	- 70,0%	- 59,2%	- 74,5%
Passif	- 92,7%	- 92,5%	- 89,8%	- 93,6%

#### 4.1.4. Le croisement des paramètres

Trois paramètres relatifs à la forme urbaine et à l'isolation ont été testés dans cette section (l'orientation, la continuité du bâti et la consommation des bâtiments en phase d'utilisation) de façon individuelle, ce qui signifie qu'un seul paramètre est soumis à des variations, les autres caractéristiques restant fixes. Nous avons finalement réalisé une série de simulations thermiques dynamiques destinées à évaluer l'impact conjoint de ces trois paramètres, pour un bâtiment-type de 120m<sup>2</sup>. Trois types de continuité sont considérés : une maison « 4 façades » (4F), une maison semi-mitoyenne (3F) et une maison mitoyenne (2F). Les trois variantes d'isolation et les huit variantes d'orientation définies ci-dessus sont testées.

Des 72 variantes ainsi définies, c'est logiquement la maison mitoyenne, isolée, bien orientée (repérée par un \* dans le Tableau V-5) qui présente les meilleures performances énergétiques (57 kWh/m<sup>2</sup>.an). Le gain par rapport à la situation la plus défavorable (\*\*, pas d'isolation, 4 façades, orientation de la façade vitrée au nord) s'élève à 257 kWh/m<sup>2</sup>.an.

Tableau V-5 : Consommation de chauffage (kWh/m<sup>2</sup>.an) pour une maison de 120m<sup>2</sup> et pour différents scénarios de mitoyenneté, d'orientation et d'isolation.

	1950 -1980			1981 – 1995			1996- 2011			Δ ligne
	4F	3F	2F	4F	3F	2F	4F	3F	2F	
0°	306	276	248	95	84	74	73	64	57*	81,4%
45°	306	276	248	95	84	74	73	64	57	81,4%
90°	308	278	250	97	85	77	75	66	60	80,5%
135°	309	280	253	99	88	79	76	67	62	79,9%
180°	310**	280	253	100	88	79	77	69	62	80,0%
225°	310**	280	253	100	89	79	77	69	62	80,0%
270°	309	279	252	99	88	78	76	68	61	80,3%
315°	307	278	251	97	86	76	74	66	59	80,8%
Δ col.	1,3%	1,4%	2,0%	5,0%	5,6%	6,3%	5,2%	7,2%	8,1%	

On remarque également que :

- C'est l'isolation qui a l'impact le plus important en termes de réduction des consommations de chauffage. Pour un même type de mitoyenneté (4F, 3F ou 2F), les gains engendrés par une meilleure isolation sont compris entre 75,4% et 77,0 %.
- Les gains dus à l'isolation semblent d'autant plus importants que l'orientation est bonne.
- Pour une orientation donnée, les deux situations les plus extrêmes en termes de consommations énergétiques sont la maison « 4 façades » non isolée et la maison mitoyenne isolée. La différence entre ces deux cas est reprise dans la dernière colonne du précédent tableau (Δ ligne).
- Pour un niveau d'isolation donné, l'impact de l'orientation est d'autant plus important que la mitoyenneté est grande, ce qui peut s'expliquer par la moindre superficie vitrée des maisons mitoyennes.
- Toutes autres choses restant égales, l'impact de l'orientation augmente avec le niveau de mitoyenneté et l'isolation du bâtiment (Δ colonne). L'orientation n'a que peu d'influence dans les cas où les principes bioclimatiques ne sont pas appliqués. Elle reste toutefois un facteur important, notamment dans le cadre de nouvelles constructions, et doit être prise en compte tant en construction qu'en rénovation pour améliorer les performances énergétiques du bâti périurbain.
- Des simulations thermiques dynamiques réalisées en complément du cas proposé dans le Tableau V-5 montrent que les grandes tendances mises en évidence ci-dessus restent valables pour les autres classes de superficie.

## 4.2. Les paramètres relatifs aux déplacements

Cinq types de scénarios ont été investigués sur les quatre cas d'études. Ils abordent la localisation des quartiers, les distances parcourues, la performance des véhicules, le télétravail et le report modal. Les résultats sont présentés dans le Tableau V-6<sup>2</sup>.

*Tableau V-6 : Résultats des variations paramétriques : diminution des consommations relatives au transport (domicile-travail et domicile-école) pour 12 variantes relatives à 5 scénarios (A.*

*Localisation des quartiers, B. Diminution des distances parcourues, C. Amélioration des performances des véhicules, D. Télétravail et E. Report modal).*

	Cas 1 - Tintigny	Cas 2 - Fontaine	Cas 3 – Jambes	Cas 4 - Rotheux
<b>A. Localisation</b>				
A1. Localisation cas 2	- 55,4%	-	- 22,5%	- 32,4%
<b>B. Distances parcourues</b>				
B1. Réduction de 10%	- 9,7%	- 9,8%	- 9,7%	- 9,6%
B2. Réduction de 20%	- 19,4%	- 19,5%	- 19,5%	- 19,2%
<b>C. Performance véhicules</b>				
C1. Augmentation de 10% (tous les véhicules)	- 9,6%	- 6,6%	- 9,0%	- 9,6%
C2. Augmentation de 20% (tous les véhicules)	- 19,1%	- 13,2%	- 17,9%	- 19,2%
C3. Augmentation de 20% (uniquement les bus)	- 2,1%	- 2,7%	- 1,7%	- 2,1%
<b>D. Télétravail</b>				
D1. 10% de télétravail	- 5,3%	- 5,6%	- 6,9%	- 6,8%
<b>E. Report modal</b>				
E1. Report modal de 10% sur le bus (domicile-travail)	- 1,9%	- 1,9%	- 2,3%	- 2,9%
E2. Report modal de 20% sur le bus (domicile-travail)	- 3,3%	- 3,9%	- 4,2%	- 4,6%
E3. Report modal de 10% sur le bus (domicile-travail et école)	- 4,6%	- 2,5%	- 4,0%	- 5,0%
E4. Report modal de 20% sur le bus (domicile-travail et école)	- 7,8%	- 4,9%	- 6,7%	- 7,8%

<sup>2</sup> Ces résultats ont été publiés dans l'article suivant : MARIQUE, A.-F. & REITER, S. 2012a. A method for evaluating transport energy consumption in suburban areas. Environmental Impact Assessment Review, 33, 1-6. Les facteurs de consommation utilisés dans le cadre de cet article sont les suivants : 0,61kWh/p.km pour les voitures diesel, 0,63kWh/p.km pour les voitures essence, 0,49kWh/p.km pour le bus, 0,38kWh/p.km pour le train. Si les facteurs de consommations utilisés dans la thèse sont appliqués, les réductions des consommations de chaque scénario (Tableau V-6) varient mais les tendances et la hiérarchie présentées restent valables.

Le scénario A1 considère, en première approche, que les quartiers conservent leurs caractéristiques socio-économiques mais bénéficient de la même localisation que le cas 2 (proximité d'un centre-ville, meilleure desserte en transports en commun, plus grande mixité fonctionnelle, etc.) de façon à mettre en évidence l'impact d'une bonne localisation, au sens large. Ce scénario théorique, impossible à implémenter en pratique, mène à des réductions des consommations d'énergie pour le transport très importantes, en particulier pour les quartiers initialement les plus mal localisés, grâce à une meilleure part modale des modes doux et des transports en commun et à des distances parcourues plus faibles.

Les scénarios B1 et B2 investiguent l'influence de ce seul critère, sans considérer l'impact potentiel que des distances plus faibles pourraient avoir en termes de report modal. Les résultats de ces simulations confirment l'impact important des distances parcourues. S'il est impossible de modifier la localisation des quartiers, agir sur les distances parcourues est un élément primordial pour réduire les consommations d'énergie relatives aux déplacements, notamment en favorisant une plus grande mixité fonctionnelle à l'échelle des bassins de vie. Les consommations des quatre quartiers réagissent de façon relativement équivalente aux scénarios relatifs aux distances, en raison de la corrélation importante entre indice de performance énergétique des déplacements et distances parcourues. Cet élément sera investigué de façon plus approfondie et généralisé à l'ensemble du territoire wallon dans les Chapitres VI et VII.

Améliorer les performances de l'ensemble des véhicules, tant privés que publics, (scénarios C1 et C2) permet également d'engendrer des réductions significatives. En l'état actuel, améliorer uniquement les performances des bus (scénario C3) mène à des résultats plus mitigés, car la part modale du bus dans les quartiers considérés reste très faible. Desjardins (2009) mentionne à cet effet, qu'en France, le nombre de véhicules-kilomètres parcourus a été multiplié par 2,5, entre 1970 et 2005 alors que la consommation d'énergie n'a augmenté que d'un facteur 2, grâce à l'évolution des technologies. Il suppose, sur cette base, que les constructeurs vont accélérer la mise au point de véhicules moins consommateurs et que les ménages ont donc l'opportunité de répondre à la hausse des prix des carburants, non pas en réduisant le nombre de kilomètres parcourus, mais en optant pour des véhicules plus sobres. Remarquons toutefois que cette stratégie n'est toutefois viable que pour une augmentation modérée des prix des carburants et n'apporte aucune solution durable à un certain nombre des problèmes liés à l'étalement urbain (dépendance à la voiture individuelle, coût de gestion et d'entretien des réseaux et des services, etc.).

Favoriser le télétravail (travail à domicile) offre aussi des perspectives intéressantes en termes de réduction des consommations pour le transport. L'intérêt du scénario D1, considéré à l'échelle des quartiers, reste toutefois à tempérer. En effet, le travail à domicile a des impacts non négligeables sur d'autres types de consommation, comme le chauffage de la maison ou les consommations d'électricité en journée. De plus, l'impact du télétravail sur les autres types de déplacements, en particulier ceux qui s'opèrent durant des chaînes de déplacements incluant le travail n'est pas considéré. Certains auteurs ont toutefois mis en évidence que les travailleurs qui recouraient au travail à domicile avaient

alors tendance à modifier leurs chaînes de déplacement et à favoriser les commerces et lieux de loisirs situés à proximité de leur logement.

Enfin, les scénarios E1 à E4 montrent l'impact de différents types de report modal de la voiture sur le bus pour les déplacements domicile-travail et/ou domicile-école. L'impact de ces scénarios relatifs au report modal reste modéré en comparaison notamment avec les réductions engendrées par les scénarios relatifs à la réduction des distances parcourues. Ces éléments seront également approfondis et généralisés à l'ensemble du territoire wallon, dans les Chapitres VI et VII.

### 4.3. L'approche combinée

Les variations paramétriques abordées dans cette section concernent l'isolation, l'orientation et la mitoyenneté pour ce qui relève des bâtiments et la localisation des quartiers, les performances des véhicules et les distances parcourues pour ce qui concerne les déplacements. Un scénario relatif au comportement des occupants est ajouté pour comparer son influence avec celles des autres scénarios. Les résultats de ces simulations sont proposés dans le Tableau V-7<sup>3</sup>. Les hypothèses détaillées considérées dans chaque scénario sont explicitées ensuite, en parallèle avec la discussion des résultats.

Tableau V-7 : Résultats des variations paramétriques : diminution des consommations globales (bâtiment + transport) pour 7 scénarios.

	Cas 1 - Tintigny	Cas 2 - Fontaine	Cas 3 – Jambes	Cas 4 - Rotheux
<b>A. Bâtiment</b>				
1. Isolation de l'enveloppe (K < K45)	- 45,6%	- 51,1 %	- 33,6 %	- 50,5%
2. Orientation du quartier	- 1,7%	- 1,6%	- 1,7%	- 1,8%
3. Distribution compacte	- 24,2%	-	- 16,2%	- 15,1%
<b>B. Transport</b>				
4. Localisation favorable	-21,0%	-	-7,2%	-11,7%
5. Performance des véhicules	-2,1%	-1,0%	-2,5%	-1,6%
6. Réduction des distances	-2,2%	-1,2%	-2,7%	-1,6%
<b>C. Comportement</b>				
7. Gestion du thermostat	- 16 ,8%	- 18,1%	- 18,7%	- 17,9%

Rénover l'ensemble des bâtiments des quartiers à un standard réaliste (K < K45) est la stratégie qui offre le plus grand potentiel en termes d'efficacité énergétique. Modifier l'orientation des quartiers ne permet de réduire les consommations que de façon très

---

<sup>3</sup> Ces résultats ont été publiés dans MARIQUE, A.-F. & REITER, S. 2012b. A Method to Evaluate the Energy Consumption of Suburban Neighbourhood. HVAC&R Research, 18, 88-99. Les chiffres diffèrent car les consommations relatives à l'éclairage, à l'eau chaude sanitaire et aux déplacements pour des motifs commerciaux ou de loisirs ne sont pas considérées ici.

limitée car, comme déjà mis en évidence ci-dessus, les quartiers et bâtiments existants découlent de considérations d'ordre fonctionnel et n'ont pas intégré l'orientation lors de leur conception. L'impact d'une distribution plus compacte des bâtiments a été testé en gardant constant le nombre de logements dans chaque quartier mais en considérant, de façon théorique, que les bâtiments « 4 façades » sont regroupés en lots de 4 bâtiments jointifs (soit deux logements mitoyens au centre et deux logements semi-mitoyens). Une plus grande mitoyenneté permettrait de réduire les consommations d'énergie des quartiers de façon significative, en réduisant les surfaces de déperdition.

En matière de déplacements, le premier scénario considère, de façon théorique, que les cas 1, 3 et 4 gardent leurs caractéristiques propres en termes de population mais bénéficient d'une localisation plus favorable (celle du cas d'étude 2 qui présente en l'état actuel, les consommations les plus faibles pour les déplacements domicile-travail et domicile-école). Ce scénario illustre l'impact d'une bonne localisation résidentielle dans la réduction des consommations d'énergie pour les déplacements. Les scénarios 5 et 6 concernent respectivement une amélioration des performances des véhicules et une diminution des distances parcourues. Enfin, le scénario 8 met en évidence l'impact important des occupants et de leurs modes de vie sur les consommations d'énergie. Le simple passage d'un thermostat constant, fixé à 18°C, à une gestion différée (18°C pendant les heures où les occupants sont présents en journée, 15°C pendant les heures où la maison est inoccupée et la nuit) permet d'engendrer des réductions significatives des consommations d'énergie globales des quartiers.

En conclusion, en l'état actuel et en raison du taux très faible d'isolation en particulier, isoler l'enveloppe des bâtiments, à l'échelle des quartiers apparaît comme la cible la plus efficace et en théorie l'une des plus simples à implémenter pour améliorer l'efficacité énergétique globale des quartiers. Les enquêtes empiriques existantes, notamment l'enquête qualité logement (MRW, 2007), montrent toutefois un très faible taux de pénétration de la rénovation énergétique, malgré les incitants déjà disponibles actuellement. Il conviendrait donc certainement de revoir l'instrumentation et les incitants existants pour favoriser, dans la mesure du possible, les actions à l'échelle du quartier (dans le cadre du projet SUN<sup>4</sup>, des groupes d'achats d'isolants ont par exemple été mis en place pour inciter les particuliers à investir en matière d'isolation et réduire les prix d'achats).

Agir sur les consommations d'énergies relatives aux déplacements domicile-travail et aux déplacements scolaires semble nettement plus complexe compte tenu de la grande inertie des quartiers. Orienter la localisation des activités sur le territoire et réduire ainsi les distances à parcourir est une tâche complexe et de long terme qui présente de nombreux

---

<sup>4</sup> Le projet SUN (Sustainable Urban Neighbourhoods) coordonné par le LEMA (Christine Ruelle) vise à inscrire 7 quartiers urbains de l'Eurégio Meuse-Rhin, hérités de l'ère industrielle, dans une dynamique de développement durable dans sa dimension énergétique, mais également dans ses dimensions économiques et sociétales. Autour de ces 7 quartiers pilotes et de leurs 65.000 habitants, s'articulent 7 villes, 5 partenaires académiques, de nombreux acteurs du monde associatif et économique. SUN s'est volontairement construit comme une recherche-action transversale et multi-scalaire, à l'interface entre villes, monde académique, citoyens et société privée, [www.sun-euregio.eu](http://www.sun-euregio.eu), consulté en mars 2012.

freins (actualisation des plans de secteur, indemnisation des propriétaires « lésés » par un déclassement de leur terre en zone non urbanisable, liberté individuelle de choisir son lieu de résidence, image peu positive des milieux denses, etc.). Les mesures les plus directement implémentables sont celles relatives à un changement de comportements des individus, tant en ce qui concerne leurs habitudes de chauffage que leurs déplacements. La vulgarisation et la sensibilisation sont cruciales dans cette optique.

## 5. Scénarios de renouvellement périurbain

Trois types de scénarios de renouvellement périurbain sont investigués dans cette section : la rénovation énergétique (Section 5.1), la densification (Section 5.2) et la démolition/reconstruction (Section 5.3). Il s'agit de présenter les avantages, en termes purement énergétiques, des différents scénarios investigués sur base de la méthode développée dans le Chapitre IV. La faisabilité des scénarios proposés sera traitée dans le Chapitre VIII, où le point de vue des consommations d'énergie sera discuté, dans une perspective plus large abordant notamment la faisabilité des actions proposées et leur acceptabilité sociale et sociétale.

### 5.1. La rénovation énergétique

La rénovation énergétique des quartiers est étroitement liée aux développements présentés dans la Section 4.1.3 de ce chapitre (consommation des bâtiments en phase d'utilisation, en particulier le Tableau V-4) qui ont démontré tout l'intérêt de cette stratégie d'intervention, pour les 4 quartiers représentatifs modélisés. Les gains énergétiques potentiels des 5 stratégies développées sont ici proposés, de façon plus théorique pour trois portions de quartiers de type périurbain fictifs, d'un hectare chacun (Figure V-8). Il s'agit ici d'élargir le propos en analysant la rénovation énergétique de façon plus abstraite, sur des portions de quartiers-fictifs qui représentent des configurations périurbaines classiques. Ces portions, ou composants, de quartiers (et les résultats qui s'y rapportent) peuvent être ensuite combinées pour former différentes configurations de quartiers, tant en termes de morphologie (densité et mitoyenneté) que de caractéristiques constructives (niveaux d'isolation). Ces développements seront ultérieurement intégrés à un outil interactif d'évaluation des quartiers.

Le premier composant de quartier-fictif (D1) présente une densité nette de 6 logements par hectare. Ces logements sont des maisons unifamiliales « 4 façades » de 250m<sup>2</sup> (rez + 1 étage), construites sur des parcelles de 1.500m<sup>2</sup>, de part et d'autre d'une voirie de desserte. Le second composant de quartier-fictif (D2) est composé de 10 maisons unifamiliales « 4 façades » de 150m<sup>2</sup> (rez + 1 étage) construites sur des parcelles de 900m<sup>2</sup> (densité nette = 10 logements par hectare). Le troisième composant de quartier-fictif (D3) est composé de 12 logements unifamiliaux, mitoyens ou semi-mitoyens, d'une superficie de 120 à 150m<sup>2</sup>. La taille des parcelles oscille entre 450 et 700m<sup>2</sup>.

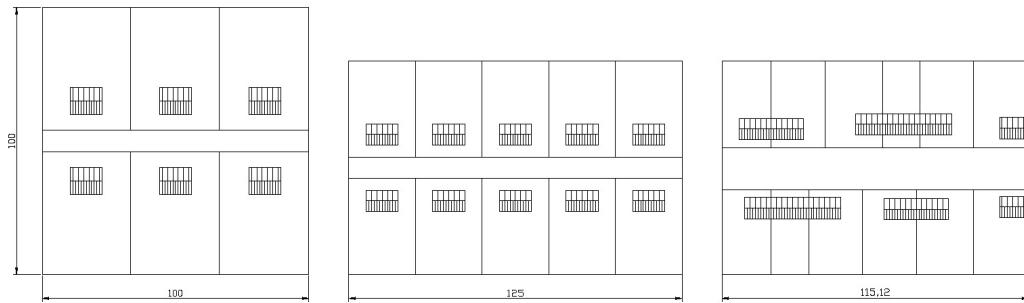


Figure V-8 : Trois composants de quartiers périurbains fictifs présentant respectivement une densité nette de 6 logements par hectare (D1, à gauche), 10 logements par hectare (D2, au centre) et 12 logements par hectare (D3 à droite).

Les logements sont orientés nord-sud et sont supposés avoir tous été développés à la même époque (même standard d'isolation pour l'ensemble des bâtiments des quartiers). Le Tableau V-8 présente les gains énergétiques relatifs à différents scénarios de rénovation énergétique appliqués à l'ensemble des bâtiments de chaque quartier. La situation de référence (REF) correspond à une absence totale d'isolation (quartiers construits avant 1981). Dans le premier scénario (TOIT), les toitures de tous les bâtiments des quartiers sont isolées avec 20 centimètres de laine minérale. Dans le second (TOIT2V), les toitures sont isolées et le simple vitrage est remplacé par du double vitrage performant. Le troisième scénario (ISO) correspond à une isolation de l'enveloppe avec 20cm dans le toit, 6cm dans les murs (remplissage de la coulisse ventilée) et 6cm dans la dalle de sol (PUR projeté sur le plafond de la cave). Le quatrième scénario (PEB) correspond au standard actuellement en vigueur pour les nouvelles constructions. Ce scénario et les suivants sont plus lourds à implémenter dans le sens où la pose de 8 à 9 centimètres d'isolant dans les parois verticales ne peut plus se faire par remplissage de la coulisse. Il convient ici d'envisager soit une isolation par l'intérieur, soit une isolation par l'extérieur avec remplacement du parement (brique, crépis, bardage).

Chacune de ces deux solutions présente des avantages et des inconvénients. Il convient en particulier d'être attentif à l'inertie thermique et aux risques de condensation dans le cas de l'isolation par l'intérieur ainsi qu'aux risques liés à l'humidité dans le cas d'une isolation par l'extérieur avec parement en crépis. De nombreux ouvrages pratiques (notamment de Meester (2009)) traitent de ces différents aspects que nous ne développerons pas plus longuement dans le cadre de cette thèse.

Les cinquième (BE) et sixième (PA) scénarios correspondent à une isolation renforcée permettant d'atteindre les standards « basse énergie » (besoins de chauffage inférieurs à 60 kWh/m<sup>2</sup>.an) et « passif » (besoins de chauffage inférieur à 15 kWh/m<sup>2</sup>.an, étanchéité à l'air (test blower door) inférieure ou égale à 0,6 h-1 (taux de renouvellement d'air mesuré à une différence de 50 Pascals), pourcentage de surchauffe dans le bâtiment (plus de 25°C) inférieur ou égal à 5% (calcul avec le logiciel PHPP)).

Tableau V-8 : Diminution des besoins de chauffage du composant de quartier-fictif D1, pour cinq scénarios de rénovation énergétique.

	REF	TOIT	TOIT2V	ISO	PEB	BE	PA
<b>REF</b>	-	- 11,9%	- 21,1%	- 48,7%	- 72,7%	- 74,8%	- 93,7%
<b>TOIT</b>	-	-	- 10,4%	- 41,8%	- 69,0%	- 71,4%	- 92,8%
<b>TOIT2V</b>	-	-	-	- 35,1%	- 65,4%	- 68,1%	- 92,0%
<b>ISO</b>	-	-	-	-	- 46,7%	- 50,8%	- 87,7%
<b>PEB</b>	-	-	-	-	-	- 7,7%	- 76,9%
<b>BE</b>	-	-	-	-	-	-	- 75,0%

Tableau V-9 : Diminution des besoins de chauffage du composant de quartier-fictif D2, pour cinq scénarios de rénovation énergétique.

	REF	TOIT	TOIT2V	ISO	PEB	BE	PA
<b>REF</b>	-	- 9,1%	- 18,9%	- 48,7%	- 73,1%	- 74,8%	- 93,7%
<b>TOIT</b>	-	-	- 7,9%	- 41,8%	- 69,5%	- 71,4%	- 92,8%
<b>TOIT2V</b>	-	-	-	- 35,0%	- 65,9%	- 68,1%	- 92,0%
<b>ISO</b>	-	-	-	-	- 47,5%	- 50,8%	- 87,7%
<b>PEB</b>	-	-	-	-	-	- 7,7%	- 76,9%
<b>BE</b>	-	-	-	-	-	-	- 75,0%

Tableau V-10 : Diminution des besoins de chauffage du composant de quartier-fictif D3, pour cinq scénarios de rénovation énergétique.

	REF	TOIT	TOIT2V	ISO	PEB	BE	PA
<b>REF</b>	-	- 12,2%	- 23,5%	- 61,3%	- 73,8%	- 74,8%	- 93,7%
<b>TOIT</b>	-	-	- 13,1%	- 56,0%	- 70,2%	- 71,4%	- 92,8%
<b>TOIT2V</b>	-	-	-	- 50,9%	- 66,8%	- 68,1%	- 92,0%
<b>ISO</b>	-	-	-	-	- 48,9%	- 50,8%	- 87,7%
<b>PEB</b>	-	-	-	-	-	- 7,7%	- 76,9%
<b>BE</b>	-	-	-	-	-	-	- 75,0%

Ces résultats confirment l'importance des stratégies de rénovation énergétique et leur haut potentiel pour améliorer l'efficacité énergétique des quartiers. Rappelons que le chauffage représente, en l'état actuel, environ 75% des consommations des logements wallons.

On remarquera également qu'atteindre les standards d'isolation les plus exigeants (« basse énergie » et surtout « passif ») nécessite une grande quantité de matériaux isolants (Tableau V-11), ce qui questionne l'intérêt de ces stratégies en termes de coûts d'investissements (qui sortent de notre champ d'analyse), d'autant plus que les premiers

centimètres d'isolant sont ceux qui permettent de réduire le plus l'impact énergétique des bâtiments en cycle de vie. Sur la totalité du cycle de vie du bâtiment, et en termes purement énergétiques, isoler à des standards élevés reste toutefois une stratégie très efficace. À épaississeurs d'isolant équivalentes et pour une même superficie bâtie, nous avons vu dans la Section 3 qu'un bâtiment mitoyen et un bâtiment semi-mitoyen consomment environ 24% et 15% de moins qu'un bâtiment de type « 4 façades ». Ces observations restent valables ici, ce qui signifie qu'atteindre les mêmes besoins de chauffage dans le quartier D3 nécessitera la production et la mise en œuvre d'une quantité plus réduite de matériaux isolants que dans les deux autres quartiers, composés de maisons isolées. Les notions de mitoyenneté et de compacité sont donc une nouvelle fois déterminantes.

*Tableau V-11 : Epaisseurs d'isolant, caractéristiques des vitrages et ventilation pour atteindre les standard « PEB », « basse énergie » et « passif » pour un bâtiment « 4 façades » de 160m<sup>2</sup>.*

	<b>PEB</b>	<b>BE</b>	<b>Passif</b>
Toitures, laine minérale ( $\lambda=0,041\text{W/m.K}$ )	14 cm	16 cm	35 cm
Murs, PUR ( $\lambda=0,029\text{W/m.K}$ )	8 cm	12 cm	30 cm
Dalles, PUR ( $\lambda=0,029\text{W/m.K}$ )	9 cm	10 cm	20 cm
U Vitrage, W/m <sup>2</sup> .K	1,1	1,1	0,8
Ventilation	-	Double flux + récupération de chaleur	

## 5.2. La densification

Le potentiel énergétique de différents scénarios de densification des quartiers périurbains par du logement individuel de petit gabarit (maison unifamiliale de gabarit similaire à l'existant) est investigué, d'abord sur les trois composants de quartiers-fictifs d'un hectare utilisés dans la section précédente puis pour un cas d'étude réel (le quartier de type « nappe » de Jambes). Pour ce faire, les besoins de chauffage de l'ensemble du quartier sont comparés « avant » et « après » densification. L'impact sur le potentiel solaire reçu par les façades et les toitures des bâtiments est ensuite analysé pour différents scénarios de densification des quartiers-types par du logement collectif de plus grand gabarit.

Le quartier de type « ruban » n'est plus considéré ici car une analyse cartographique montre que ce type de quartier très peu dense relie, en général, des noyaux villageois ou ruraux eux-mêmes situés dans des territoires à caractère rural. Ce type de développement en « ruban », très peu économique en sol, ne se retrouve pas dans les zones périurbaines plus denses où la pression foncière et les forces du marché ont mené à une certaine densification naturelle des développements. Ce type de quartier périurbain est notamment absent de la classification finale proposée par De Smet (2012) sur la région urbaine de Liège, caractérisée par une plus grande pression foncière. Densifier les quartiers de type « ruban » peu denses existants n'est pas souhaitable, tant pour des raisons énergétiques (notamment liées à la dépendance à l'automobile) que paysagère. Il

convient au contraire de favoriser une densification plus concentrée autour des noyaux existants, ce qui peut alors être assimilé à la densification de quartiers de type « mixte ».

### 5.2.1. Densification des quartiers-fictifs par du logement individuel

La densité des composants de quartiers fictifs (Figure V-8, REF) a été doublée (Figure V-9, VAR). Les bâtiments existants et ceux qui ont été ajoutés pour augmenter la densité sont supposés respecter la réglementation PEB en vigueur actuellement pour les nouvelles constructions. Dans le premier cas (D1), les nouveaux logements, de gabarit similaire à l'existant, sont implantés en fond de parcelle. Dans le second composant de quartier-fictif (D2), les nouveaux logements sont implantés entre les logements existants de façon à reconstituer un front continu. Dans le troisième composant de quartier-fictif (D3), les nouveaux logements sont implantés dans la continuité des bandes de logements existantes et en fond de parcelles pour atteindre une densité de 24 logements par hectare. Les besoins en chauffage et les apports solaires reçus par les fenêtres « avant » et « après » application des scénarios de densification sont présentés dans le Tableau V-12.

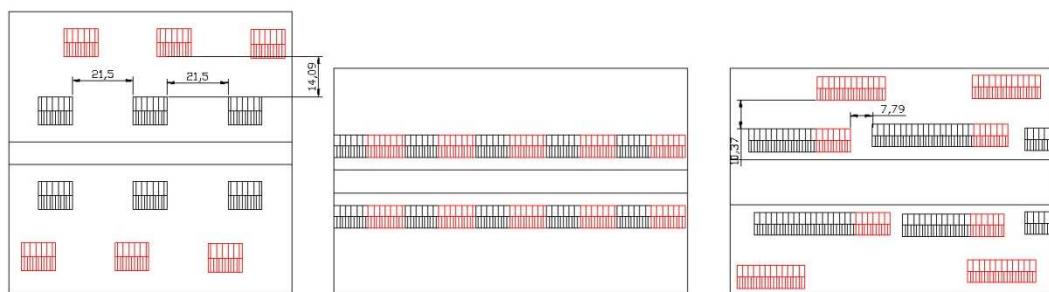


Figure V-9 : Densification des trois composants de quartiers fictifs pour atteindre 12 logements par hectare dans le cas D1 (à gauche), 20 logements par hectare dans le cas D2 (au centre) et 24 logements par hectare dans le cas D3 (à droite).

Tableau V-12 : Besoins de chauffage et apports solaires, avant et après doublement de la densité des trois quartiers-fictifs.

	Besoins de chauffage moyen du quartier, kWh/m <sup>2</sup> .an			Apports solaires moyens reçus par les fenêtres, kWh par logement		
	REF	VAR	Δ	REF	VAR	Δ
D1	65	66	+ 1,5%	4.562	4.331	-5,1%
D2	64	61	- 4,7%	4.374	3.517	- 11,6%
D3	56	59	+ 5,6%	3.389	2.962	-12,6%

Densifier les trois composants de quartiers-fictifs pour atteindre respectivement une densité nette de 12, 20 et 24 logements par hectare engendre une réduction des apports solaires reçus par les fenêtres des logements, ce qui augmente légèrement les besoins de chauffage des quartiers D1 (augmentation des besoins de chauffage de 1,5%) et D3 (+5,6%). Si l'augmentation des besoins de chauffage est la plus élevée dans le quartier le

plus dense (D3, 24 logements par hectare), les besoins moyens au m<sup>2</sup> restent les plus faibles (59 kWh/m<sup>2</sup>.an).

Dans le composant de quartier D2, la perte d'apports solaires reçus par les fenêtres (les fenêtres qui étaient localisées sur les façades latérales des bâtiments existants ont été reportées sur les façades principales et en toiture) est compensée par une plus grande compacité et un meilleur taux de mitoyenneté du quartier après densification, ce qui résulte en une diminution des besoins de chauffage (-4,7%) grâce à une diminution des surfaces de déperditions.

#### 5.2.2. Densification d'un quartier existant par du logement individuel

L'impact de différents scénarios de densification est ensuite testé sur un cas réel plus complexe de façon à confronter les résultats précédents à la réalité d'un quartier existant. Les considérations relatives à la propriété et à la division parcellaire ne sont pas abordées dans les développements suivants. Les réglementations en matière d'espacement entre bâtiments sont respectées. Le cas d'étude est le quartier de type « nappe » de Jambes (Figure V-10).

L'impact énergétique de quatre scénarios est investigué. Le premier scénario (SC1) consiste simplement à remplir les parcelles inoccupées du quartier. Ce premier scénario reste acquis dans les suivants. Le deuxième scénario (SC2) consiste à densifier le quartier par la construction de nouvelles habitations de même typologie (« 4 façades ») et de même gabarit en fond des parcelles existantes. Les scénarios 3 (SC3) et 4 (SC4) proposent une densification en front discontinu et en front continu, par des constructions intercalaires entre les maisons existantes. Les nouvelles constructions respectent la réglementation PEB en vigueur. Les bâtiments existants conservent leur niveau d'isolation. Dans le scénario SC4, les fenêtres localisées sur les pignons des maisons existantes sont reportées sur les façades principales et les toitures pour garder les mêmes superficies vitrées. La superficie des nouvelles constructions est de 120 à 180 m<sup>2</sup>. Les deux espaces verts collectifs du quartier n'ont pas été urbanisés dans ces 4 variantes.

Le Tableau V-13 présente, pour chacun des scénarios de densification proposés, les gains énergétiques à l'échelle du quartier et les pertes d'ensoleillement en façade et sur les toitures. En complément, les superficies de terrain vierge et les longueurs de réseau potentiellement économisées sont évalués. Cette évaluation est réalisée dans l'hypothèse où les bâtiments implantés pour densifier le quartier existant permettent d'éviter la construction d'un nouveau quartier périurbain peu dense (taille moyenne d'une parcelle = 900m<sup>2</sup>) en continuité du quartier existant.



Figure V-10 : Cas d'étude : le quartier de type « nappe » de Jambes (Géronsart).

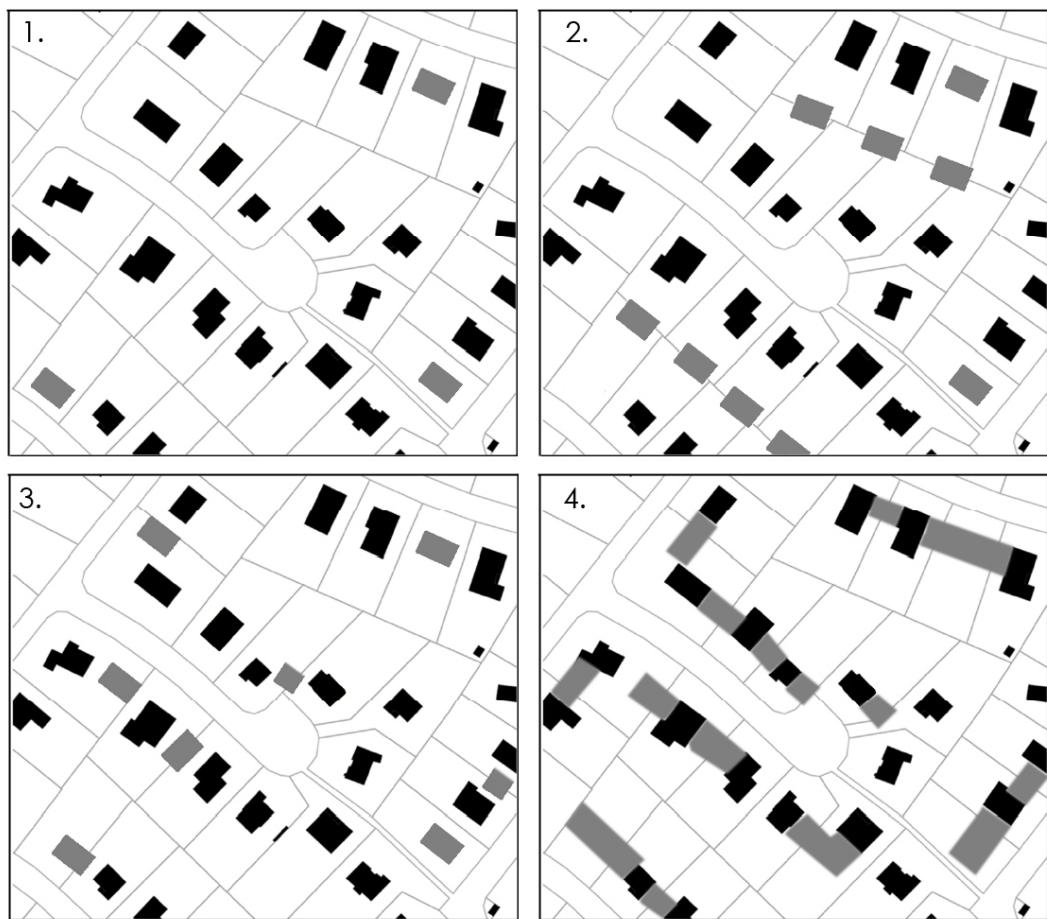


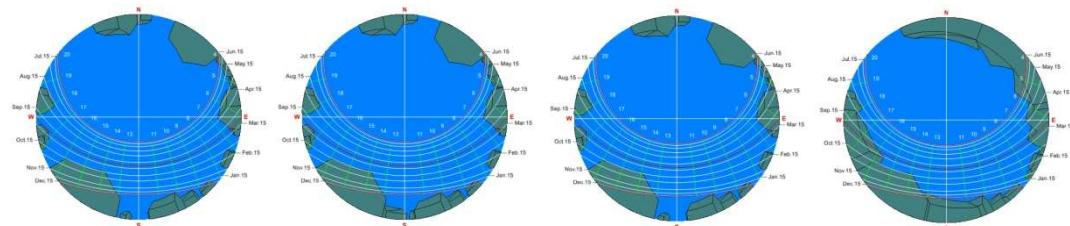
Figure V-11 : Quatre scénarios de densification (zoom sur une partie du quartier) : 1. Remplissage des dents creuses (SC1), 2. Densification en fond de parcelles (SC2), 3. Densification en front discontinu (SC3) et 4. Densification en front continu (SC4).

*Tableau V-13 : Réduction potentielle des besoins de chauffage, pour 4 scénarios de densification (SC1 = remplissage des dents creuses, SC2 = construction en fond de parcelles, SC3 = densification en front discontinu, SC4 = densification en front continu), apports solaires moyens sur les toitures et les façades et gains potentiels en termes de superficie de terrain et de longueur de réseau économisée.*

	ACTUEL	SC1	SC2	SC3	SC4
Besoins de chauffage, kWh/m <sup>2</sup> .an	146,9	139,4	121,3	128,0	102,2
Réduction / actuel, %	-	- 5,2%	- 17,4%	-12,9%	- 30,4%
Apports solaires sur les toitures, kWh/m <sup>2</sup> .an	1005	1005	1005	1005	1005
Apports solaires sur les façades, kWh/m <sup>2</sup> .an	398,6	398,6	398,2	394,6	382,6
Réduction / actuel, %	-	-	- 0,1%	- 1,0%	- 4,0%
Densité, logements par hectare	7,6	8,0	9,6	9,3	12,6
Gains de terrain, hectare	-	2,07	9,27	8,10	23,4
Gains en réseau, mètres	-	184	824	720	2080

Des gains énergétiques potentiels significatifs peuvent être obtenus dans les deuxième et troisième scénarios de densification proposés. Les besoins en chauffage du quartier sont réduits de 17,4% et 12,9% respectivement. Ces gains proviennent de la construction de nouveaux logements bien isolés (standard PEB 2011), même si les nouveaux bâtiments restent de type « 4 façades ». Les scénarios de densification proposés permettent de limiter les pertes d'ensoleillement sur les façades des bâtiments existants. L'ensoleillement reçu par les toitures n'est pas impacté car la densification est réalisée par des gabarits similaires aux gabarits existants implantés à une distance suffisante les uns des autres.

La Figure V-12 présente des vues stéréographiques réalisées en un point du quartier (centre du zoom, Figure V-11), le 15 juin, pour les quatre scénarios de densification. Les masques introduits par les bâtiments ajoutés pour densifier le quartier restent faibles, à l'exception du quatrième cas, où la densification en front continu induit une perte d'ensoleillement, au point considéré, en début de journée d'avril à octobre et en fin de journée, de mars à septembre.



*Figure V-12 : Comparaison des obstructions générées par les quatre scénarios de densification du quartier, calcul réalisé en un point central, au 15 juin (Townscope).*

Le scénario 4 combine les effets positifs de la densification par des logements bien isolés et ceux d'une plus grande compacité du quartier. Si la compacité permet de diminuer les besoins en chauffage, elle permet aussi, et surtout, des économies de matières non négligeables car les exigences en termes d'isolation de parois peuvent être obtenues avec moins d'isolant.

Enfin, l'intérêt de l'approche développée est de démontrer que densifier les quartiers existants permet non seulement d'engendrer des gains énergétiques significatifs, en particulier si la compacité est associée à la densité, mais aussi de mettre en évidence le potentiel de terrains vierges et de réseaux économisés par une telle approche. On remarquera toutefois que la densification des quartiers existants n'est pas recommandée partout. Les développements ultérieurs de cette thèse (Chapitre VI et VII) visent à mettre en évidence l'importance des critères de localisation (distance à un noyau existant bien équipé, desserte en transport en commun, potentiel pour les modes doux, etc.) et leur impact important sur les consommations d'énergie pour les déplacements des personnes. Remarquons aussi que même si la densité du quartier augmente (de 7,6 à 12,6 logements par hectare), elle reste trop faible que pour envisager l'organisation d'un système de chauffage collectif ou l'amélioration de la desserte en bus.

### 5.2.3. Densification des quartiers-types par du logement collectif

Afin d'investiguer plus largement l'impact de scénarios de densification des quartiers périurbains existants sur l'ensoleillement reçu par les toitures et les façades, des analyses complémentaires ont été réalisées, à l'aide du logiciel Townscope, sur 3 des 4 quartiers-types (la densification des quartiers de type « ruban » n'étant pas recommandée).

Les scénarios investigués concernent la densification par du logement collectif de petit gabarit dans le quartier de type « semi-mitoyen » de Fontaine-L'Evêque (Figure V-13) et du logement collectif de gabarit plus imposant (R+3) dans les quartiers de type « nappe » de Jambes (Figure V-14) et « mixte » de Rotheux » (Figure V-15).

L'objet de ces scénarios (illustrés sur les trois figures suivantes) n'est pas de proposer des projets concrets d'urbanisme (où il s'agirait de mener une analyse poussée de façon à pouvoir identifier les besoins en logements à une échelle plus vaste que celle du quartier, de se positionner sur la pertinence de bandes de logements de plusieurs mètres de long, sur la pertinence de densifier en réduisant les espaces collectifs publics, etc.) mais d'évaluer l'impact sur les gains solaires de scénarios de densification par du logement collectif de gabarit plus imposant que des maisons individuelles. C'est la raison pour laquelle des situations relativement défavorables ont été élaborées (longues bandes de logements implantées à proximité des bâtiments existants).



Figure V-13 : Densification du quartier de type « semi-mitoyen » de Fontaine-l'Evêque par du logement collectif de gabarit R+1 (F-SC1, à gauche et F-SC2, à droite).



Figure V-14 : Densification du quartier de type « nappe » de Jambes par du logement collectif de gabarit R+3 implanté dans la zone centrale (J-SC5).



Figure V-15 : Densification du quartier de type « mixte » de Rotheux par du logement collectif de gabarit R+3 implanté en cœur d'ilot (R-SC1).

Les points d'études utilisés dans les tableaux suivants ont été sélectionnés sur base d'analyses d'ensoleillement préliminaires réalisées avec le logiciel Townscope et destinées à identifier, orientation par orientation, les façades et toitures les plus impactées par les différents scénarios de densification proposés. Des analyses complémentaires ont été réalisées sur ces bâtiments de façon à identifier la perte maximale d'ensoleillement annuelle due aux scénarios sur des façades et des toitures de toute orientation, par rapport à la situation initiale du quartier. Les calculs sont réalisés en un point central de chaque pan de toiture et en un point central, situé à deux mètres du sol, pour les façades.

Les Tableau V-14 et Tableau V-15 donnent les pertes d'ensoleillement potentielles sur les toitures et les façades existantes les plus impactées, selon leur orientation.

Tableau V-14 : Réduction maximum de l'ensoleillement sur un point central des toitures existantes, pour les différents scénarios de densification.

	N	S	E	O	NE	NO	SE	SO
<b>Fontaine</b>								
<b>F-SC1</b>	-	-	-	-	-	-	- 6,0%	-
<b>F-SC2</b>	-	-	-	-	- 4,6%	- 4,4%	-	- 3,0%
<b>Jambes</b>								
<b>J-SC5</b>	-	-	-	-	- 6,2%	- 0,4%	- 5,4%	- 8,0%
<b>Rotheux</b>								
<b>R-SC1</b>	-	- 1,3%	- 0,7%	- 0,6%	-	- 0,7%	-	- 3,1%

Tableau V-15 : Réduction maximum de l'ensoleillement sur un point central des façades existantes, situé à deux mètres du sol, pour les différents scénarios de densification.

	N	S	E	O	NE	NO	SE	SO
<b>Fontaine</b>								
<b>F-SC1</b>	-	-	-	-	-	-	- 27,5%	-
<b>F-SC2</b>	-	-	-	-	- 21,3%	- 21,1%	-	- 16,5%
<b>Jambes</b>								
<b>J-SC5</b>	-	-	-	-	- 22,9%	- 1,1%	- 11,2%	- 17,4%
<b>Rotheux</b>								
<b>R-SC1</b>	-	- 10,4%	- 4,1%	- 3,5%	-	- 11,4%	-	- 13,7%

Les pertes d'ensoleillement maximales sur les toitures des bâtiments existants engendrées par la densification des quartiers par du logement collectif restent assez limitées, et ce d'autant plus que le recul par rapport à ces bâtiments est important, comme dans le cas de Rotheux où l'intérieur de l'îlot est vaste.

Les pertes engendrées sur les façades sont plus importantes pour les bâtiments existants localisés à proximité immédiate des nouveaux développements, en comparaison avec une situation « avant » densification. Si la différence « avant » et « après » peut sembler importante, il convient de la modérer par les caractéristiques du site « avant » densification, à savoir une très faible densité et des dégagements importants en fond de parcelles pour les cas de Jambes et de Rotheux. Les valeurs d'ensoleillement « après » densification sur les façades les plus impactées restent ainsi supérieures à celles enregistrées sur du bâti dense localisé dans un tissu urbain historique plus resserré.

Afin de modérer l'impact des chiffres bruts présentés dans le Tableau V-15, on remarquera que les scénarios proposés ci-dessous, respectent les prescriptions minimales recommandées, pour l'Angleterre, par Littlefair (2009) qui considère, en première approche, que la ligne supérieure d'un angle de 25°, tracé à partir d'un point central de

chaque façade, à 2 mètres au-dessus du niveau du sol, ne doit pas être obstruée afin de maintenir un ensoleillement et un accès à la lumière naturelle suffisants.

Dans ces conditions, un gabarit de type maison « 4 façades » en R+1 sous comble et un gabarit de logement collectif en R+3 devraient respectivement être implantés à minimum 6,7 mètres et 15 mètres d'un bâtiment existant (Figure V-16).

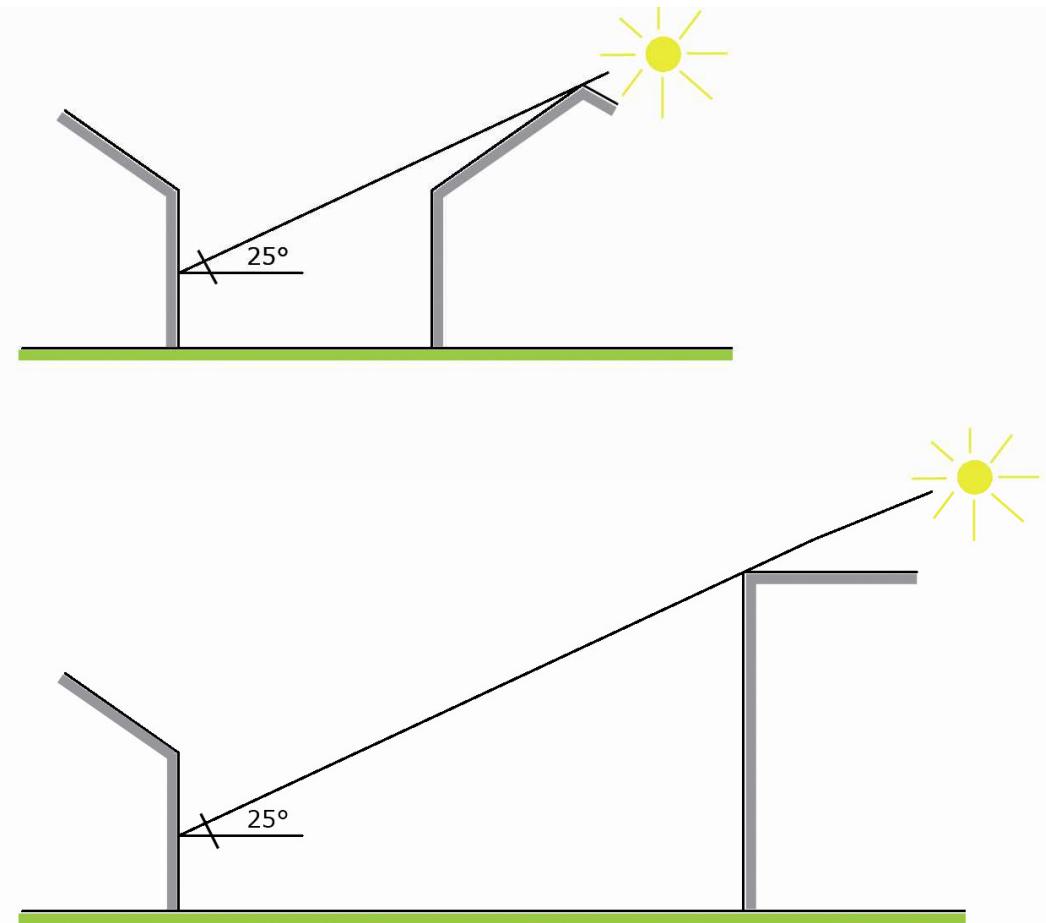


Figure V-16 : Application de la méthode de Littlefair (2009) aux cas d'une maison unifamiliale R+1 sous comble et d'un immeuble de gabarit R+3 à implanter dans un quartier de type périurbain.

L'intégration de nouveaux logements est donc souhaitable (pour autant que la localisation du quartier soit opportune), tant en termes d'économie de sols qu'en termes énergétiques, pour autant que les gabarits et l'implantation des nouveaux bâtiments fassent l'objet d'études précises et contextualisées qui permettent de maintenir les pertes d'ensoleillement des bâtiments existants à des taux acceptables. Il convient également certainement de sensibiliser la population aux bénéfices d'une plus grande densité bâtie.

#### 5.2.4. Limites de l'approche par la densité

L'évaluation énergétique des différents scénarios de densification des quartiers existants par du logement unifamilial individuel et du logement collectif de gabarit plus important

a montré l'intérêt de cette approche en termes énergétiques et en ce qui concerne l'économie de sols non encore urbanisés. Il convient toutefois de mentionner une série de limitations relatives au concept de la densité et à l'approche développée.

En premier lieu, on remarquera que la densification des quartiers n'est évidemment pas applicable partout. Il convient de choisir précisément les quartiers à densifier en fonction, en particulier, de leur localisation. A cet effet, les Chapitres VI et VII généralisent les indices de performance des déplacements domicile-travail et domicile-école à l'ensemble du territoire wallon, de façon à identifier les facteurs relatifs à la structure du territoire qui ont le plus d'impact sur la génération de mobilité pour ces deux types de déplacements.

Deuxièmement, la densité est un élément important mais une même densité nette de logements peut mener à des formes urbaines très variées, comme en témoigne la Figure V-17.

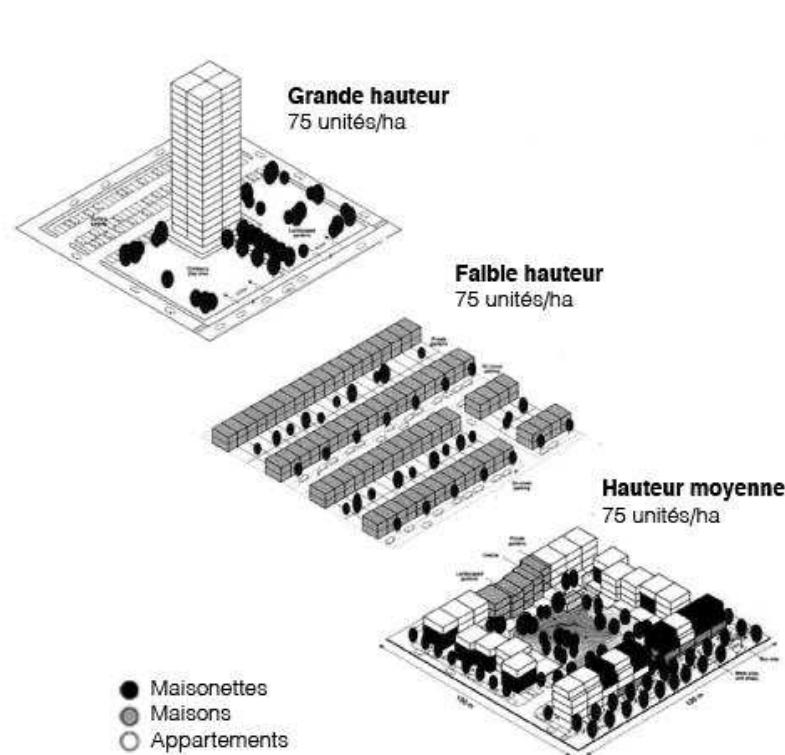


Figure V-17 : Une même densité de logements par hectare peut prendre des formes très différentes  
(Source : Vivre en Ville, adapté de UrbanTaskForce (1999), [www.sagacite.org](http://www.sagacite.org)).

La densité, considérée seule, n'est donc pas un indicateur suffisamment solide. Dans une optique globale de durabilité et d'économies d'énergie, il convient de lui adjoindre, comme nous l'avons montré, des notions d'emprise au sol, de compacité et de mitoyenneté des formes bâties. La compacité (rapport entre un volume chauffé et les parois de déperditions de ce volume), en particulier, est un indicateur pertinent dans le domaine de l'énergétique du bâtiment, à l'échelle individuelle et à celle du quartier.

Maïzia (2010) a, par exemple, montré l'intérêt d'un indicateur mixte qui intègre géométrie urbaine et qualité d'isolation des parois. Baptisé  $U_{urb}$ , il représente la densité d'énergie qu'un ensemble urbain ou une ville perd par l'enveloppe de son bâti, rapporté à la surface habitable. Il permet de comparer des tissus différents, en intégrant la qualité de l'isolation des parois des bâtiments.

Si on étend le propos développé dans la Section 5.1 concernant la quantité de matière (isolant) nécessaire pour atteindre les mêmes performances énergétiques dans un bâtiment mitoyen, semi-mitoyen ou isolé, il apparaît que les tissus très denses possèdent un grand potentiel en termes de rénovation énergétique car des cibles ambitieuses pourront y être atteintes avec une quantité moins importante de matériaux. Atteindre les mêmes performances dans un tissu composé de maisons isolées demandera un effort significativement plus grand car le levier de la compacité n'est pas disponible (Maïzia, 2010).

Dans le débat actuel concernant la localisation des nouveaux logements sur le territoire wallon (ce besoin a été estimé, dans le cadre de l'actualisation du SDER, à 350.000 nouveaux logements à l'horizon 2040, dont 280.000 à localiser dans des « territoires centraux » non encore définis), l'ensemble de ces paramètres doit être considéré en parallèle avec le gisement existant non exploité (logements vides, trop grands, etc.). La densification des quartiers périurbains existants est une piste de solution envisageable à condition que des critères de localisation soient appliqués et que la densité soit considérée conjointement à la compacité des formes produites.

Enfin, dans une perspective plus large abordant les consommations en énergie primaire<sup>5</sup>, la densification des quartiers périurbains existants pourrait également mener, si elle est suffisante, à repenser les vecteurs énergétiques utilisés. En Wallonie, les maisons passives ou à très faible consommation d'énergie construites dans les quartiers périurbains sont actuellement souvent dépendantes de système de chauffe individuel électrique<sup>6</sup> alors que les tissus urbains denses offrent des possibilités plus importantes d'évolution vers des systèmes collectifs et rentabilisent notamment les réseaux linéaires.

Les quartiers périurbains pourraient également, comme on l'a montré, baser leur évolution vers des systèmes plus verts sur l'énergie de type solaire, même si de plus amples développements concernant l'impact en cycle de vie des cellules photovoltaïques, par exemple, devraient être menés pour maîtriser l'impact de ce type de production.

---

<sup>5</sup> Energie disponible dans la nature avant toute transformation.

<sup>6</sup> Le coefficient de conversion entre consommation d'énergie et énergie primaire pour l'électricité est évalué à 2,7 contre 1 pour le gaz.

### 5.3. La démolition / reconstruction

Le dernier type de scénarios de renouvellement des quartiers périurbains qui pourrait être investigué concerne, de façon plus théorique, la démolition des quartiers existants et leur reconstruction. Les développements précédents ont mis en évidence que plusieurs leviers sont disponibles pour améliorer les performances énergétiques des quartiers, en ce qui concerne les besoins de chauffage des bâtiments : l'isolation, la mitoyenneté, la compacité et dans une moindre mesure l'orientation des bâtiments. Formellement, l'étude des gains énergétiques (en phase d'utilisation) relatifs à des scénarios de reconstruction des quartiers-fictifs, est identique à celle menée dans la section 5.2.1. qui abordait la densification de ces quartiers-fictifs par du logement individuel dans le cas d'une rénovation énergétique des bâtiments existants au standard PEB actuel (voir Tableau V-12, où les scénarios de référence (REF) et densifiés (VAR) peuvent être assimilés à des quartiers reconstruits au standard PEB si la phase d'utilisation seule est considérée).

Afin d'étendre le propos, deux scénarios de reconstruction du quartier de type « nappe » de Jambes (Figure V-10) ont été formalisés et évalués, en gardant constante la surface de plancher du quartier existant. Le premier scénario propose une reconstruction de 15 barres de logements (12m x 60 m) de gabarit R+3 implantés selon une orientation nord-sud. Le second scénario propose une reconstruction de 10 îlots de maisons individuelles mitoyennes de gabarit R+1. Les nouvelles constructions respectent les exigences PEB en vigueur en 2012.

Ces deux types de scénarios permettent de réduire de façon considérable les besoins de chauffage du quartier, par comparaison avec la situation initiale (Tableau V-16). Des gains supplémentaires sont également mis en évidence, par rapport à la rénovation énergétique au standard PEB 2012 de l'ensemble des bâtiments du quartier existant.

*Tableau V-16 : Besoins de chauffage (kWh/m<sup>2</sup>.an) du quartier de type « nappe » de Jambes en l'état actuel, dans l'optique d'une rénovation des bâtiments existants au standard PEB et pour deux scénarios de reconstruction (en barres et en îlots).*

	Etat actuel	Rénovation PEB 2012	Reconstruction en « barres »	Reconstruction en « îlots »
Besoins de chauffage	147 kWh/m <sup>2</sup> .an	98 kWh/m <sup>2</sup> .an	53 kWh/m <sup>2</sup> .an	57 kWh/m <sup>2</sup> .an

Outre ces gains énergétiques, la reconstruction du quartier sous des formes plus compactes permet de réduire l'emprise au sol dédiée à des occupations privatives. Le solde de terrain pourrait alors être valorisé pour poursuivre la reconstruction d'un quartier plus dense et / ou développer des espaces publics collectifs, des équipements publics, des services, etc. et ainsi augmenter également la mixité fonctionnelle à l'échelle du quartier. Remarquons une fois de plus que ces considérations restent théoriques et que l'intervention dans des quartiers existants doit faire l'objet d'analyses poussées de façon à identifier les potentialités du site, les besoins précis en logements à l'échelle de la

commune, les types de logements et d'accession à favoriser en lien notamment avec les mutations socio-démographiques (diminution de la taille des ménages, etc.) mises en évidence dans le Chapitre II, la nécessité de développer d'autres fonctions que du logement, etc. La localisation, en particulier, doit être étudiée, considérant que densifier ou démolir / reconstruire n'est souhaitable que dans les quartiers les mieux localisés, c'est-à-dire ceux qui offrent le plus de potentiel pour réduire les distances parcourues et la dépendance à la voiture. Enfin, la diversité architecturale et la qualité urbanistique des espaces bâtis et non bâtis sont également indissociables de la conception d'un nouveau quartier ou de l'intervention dans un quartier existant.

L'analyse brute des résultats des analyses en cycle de vie des bâtiments (Figure V-7) peut rapidement mener à la conclusion que la démolition des quartiers existants, suivie de leur reconstruction est la solution la plus efficace, en termes purement énergétiques puisque la phase d'utilisation est, de loin, la plus consommatrice. Comme nous venons de le montrer, ces gains énergétiques sont encore plus importants en phase d'utilisation si, en complément d'un bon niveau d'isolation, la reconstruction des quartiers promeut des formes urbaines plus compactes. Cette relation causale reste toutefois fort simplifiée et il semble nécessaire de repositionner la question de la démolition / reconstruction des quartiers dans un cadre plus large incluant différents aspects.

En termes méthodologiques, il n'existe, à ce jour, pas d'outils opérationnels permettant l'analyse en cycle de vie à l'échelle de tout un quartier ni de données et de méthodes permettant d'aborder avec suffisamment de certitude et de précision la question de la fin de vie d'un bâtiment ou d'un quartier. Des outils et des recherches ciblées sur le cycle de vie des bâtiments se développent actuellement et posent encore une série de questions quant à leur applicabilité au domaine du bâtiment : les bases de données des matériaux sont soumises à de nombreuses incertitudes, l'unité de base est peu aisée à circonscrire, etc. Dans le même ordre d'idée, les consommations énergétiques relatives aux chantiers de construction et de démolition ne sont pas prises en compte dans les outils d'analyse en cycle de vie. Il conviendrait, comme l'a mis en évidence Lentier (2012) pour un bâtiment particulier, d'approfondir ces connaissances notamment en comparant l'impact d'un chantier de démolition / reconstruction avec un chantier de rénovation. Ces éléments devraient être traités avec suffisamment de certitude à l'échelle du bâti individuel avant d'envisager leur généralisation à tout un quartier. La question de la fin de vie et du recyclage éventuel des composants issus de la démolition en particulier devrait être approfondie avant de pouvoir investiguer de façon pertinente la question de la démolition / reconstruction des quartiers.

La localisation des quartiers (où est-il le plus opportun de reconstruire ?), la définition de l'unité de base (prise en compte des infrastructures nécessaires à la viabilisation d'un quartier, par exemple) et la forme que doivent prendre les nouveaux quartiers (densité ? compacté ? gabarit ?) ne peuvent, de plus, pas être dissociées d'une réflexion relative à la démolition / reconstruction. Les enjeux relatifs à cette question dépassent largement le seul domaine de l'efficacité énergétique du bâtiment. Enfin, l'impact économique de la démolition / reconstruction et surtout son acceptabilité sociale sont des éléments qu'il

convient de maîtriser globalement et qui ne peuvent être dissociés des aspects purement techniques compte tenu de leur impact important.

L'analyse en cycle de vie a donc été mobilisée, compte tenu de ses limites, pour identifier que la phase d'utilisation est la plus consommatrice et que les premiers centimètres d'isolant sont les plus « performants ». Des analyses plus poussées (généralisation à l'échelle du quartier, certitude et pertinence des bases de données, recyclage des matériaux, impact des chantiers) ne sont pas envisagées ici car elles dépassent le cadre de cette thèse.

## 6. Synthèse et généralisation

L'application de la méthode d'évaluation énergétique des quartiers périurbains développée dans le Chapitre IV à quatre quartiers périurbains wallons représentatifs et à trois quartiers-fictifs a permis de dresser un cadastre énergétique de ces quartiers et de comparer les consommations d'énergie dans le bâtiment et pour le transport des personnes (domicile-travail et domicile-école). Les variations paramétriques qui ont suivi ont permis d'identifier les paramètres les plus importants pour améliorer l'efficacité énergétique des quartiers périurbains existants. Cet exercice tend à montrer que les performances énergétiques des quartiers considérés sont faibles bien qu'un potentiel important en termes d'architecture bioclimatique (et d'énergies renouvelables basées sur l'énergie solaire) puisse être dégagé.

Nous avons montré, sur base de ces variations paramétriques, que le paramètre le plus influent pour améliorer l'efficacité énergétique des quartiers périurbains est incontestablement l'isolation du bâti et que les premiers centimètres d'isolant sont ceux qui permettent d'obtenir les gains les plus importants. Toutefois, atteindre des performances énergétiques similaires dans des formes urbaines plus compactes engendre une économie significative de matériaux, ce qui questionne tant l'équité de cette démarche si elle est basée sur des fonds publics que l'efficacité énergétique en cycle de vie (production et recyclage de plus de matière).

Cette conclusion est d'autant plus importante qu'une enquête exploratoire menée dans le périurbain francilien en 2008 montre que la principale réponse apportée par les ménages à la hausse du coût du carburant est de réaliser des travaux d'amélioration thermique de leur logement (Desjardins and Llorente, 2009, Desjardins, 2009). Poortinga et al. (2003) avancent également que les mesures visant aux économies d'énergie sont en général mieux perçues par les ménages quand elles touchent au logement plutôt qu'au transport.

La mitoyenneté est le second paramètre le plus influent, suivi de l'orientation, qui combinée à une meilleure prise en compte des principes bioclimatiques, notamment la répartition des surfaces vitrées sur les façades, peut également améliorer l'efficacité énergétique du bâti périurbain. Ces solutions sont plus difficilement envisageables en rénovation du bâti existant. Elles constituent toutefois des éléments à prendre en compte, tant en construction qu'en rénovation lourde ou lors de la densification des quartiers

existants. Le comportement des occupants, qui n'a été que très brièvement abordé, a également un impact important et devrait constituer une des pistes d'actions les plus simples et les plus rentables à mettre en place.

En termes de mobilité, la localisation des quartiers (en particulier les distances parcourues) est un paramètre primordial à considérer. Il est toutefois très difficile d'agir sur ces paramètres pour les quartiers existants, et les scénarios relatifs au report modal ou aux performances des véhicules semblent être les solutions les plus exploitables dans les quartiers existants. Cet élément prend toute son importance en ce qui concerne l'implantation de nouveaux développements, qu'ils soient résidentiels ou autres.

Sur cette base, des scénarios de renouvellement des quartiers périurbains ont été formalisés et évalués. Il apparaît que tant la rénovation énergétique du bâti que la densification des quartiers existants et la démolition / reconstruction offrent des gains énergétiques potentiels significatifs, en particulier si la reconstruction des quartiers promeut des formes urbaines plus compactes que le lotissement de maisons « 4 façades ». La densification des quartiers existants paraît être une solution particulièrement pertinente pour répondre aux besoins de nouveaux logements sans ouvrir de zones vierges à l'urbanisation alors que la démolition / reconstruction reste peu envisageable à grande échelle.

Ces deux types de stratégies ne peuvent de plus pas s'appliquer partout et une analyse précise de la localisation et de la génération de mobilité doit accompagner le choix des quartiers où favoriser la densification et la démolition / reconstruction. C'est en ce sens que la question de la généralisation à l'ensemble du territoire wallon des développements relatifs aux déplacements semble importante. Nous avons en effet montré, pour les cas d'études considérés, que la localisation des quartiers est un paramètre fondamental qui impacte fortement les consommations relatives aux déplacements domicile-travail et domicile-école. Ce paramètre relève de politiques d'aménagement du territoire plus complexes que les réglementations qui régissent notamment l'isolation des bâtiments et devrait donc être étudié à une échelle plus large. L'objet des deux chapitres suivants (Chapitres VI et VII) concerne ainsi l'investigation, sur l'ensemble du territoire wallon, des relations entre structure du territoire et consommations d'énergie pour les déplacements via l'application et la discussion des indices de performances des déplacements domicile-travail et domicile-école.

Enfin, la généralisation des résultats obtenus à l'échelle des quartiers, à l'ensemble du stock bâti périurbain, n'est pas considérée dans le cadre de cette thèse. Nous avons pris le parti de développer une méthode de type « bottom-up » basée sur des simulations thermiques dynamiques appliquées à des bâtiments-types et des quartiers-types. Ce type de méthode permet de prendre en compte les spécificités locales à l'échelle des quartiers et de tester de façon relativement fine l'influence de différents facteurs et scénarios de renouvellement. Ces aspects sont importants dans le cadre qui nous occupe, en particulier dans le cadre du développement de scénarios de renouvellement concret des quartiers périurbains. Il s'agit ici de proposer des pistes concrètes, adaptées aux spécificités locales et pas de déduire un potentiel théorique de stratégies appliquées unilatéralement à

l'ensemble du stock bâti. L'étude de la densification en particulier, doit être réalisée avec un niveau de finesse suffisant.

Toutefois, la base de données de résultats qui a été constituée permet l'application rapide (sans nouvelles simulations thermiques dynamiques) à de nombreux autres quartiers périurbains de densité similaire (5 à 12 maisons unifamiliales mitoyennes, semi-mitoyennes ou isolées par hectare). Il serait dès lors envisageable, sur base de la classification typologique et des résultats existants, d'évaluer les consommations énergétiques totales de l'ensemble du stock périurbain et l'impact de certaines stratégies de renouvellement (isolation des toits, changement des vitrages, rénovation énergétique).

# Chapitre VI

## Déplacements Domicile-Travail, Energie et Structure du Territoire

### 1. Objectifs et rappel

L'objet de ce chapitre est de généraliser à l'ensemble du territoire wallon l'indice de performance des déplacements domicile-travail développé et présenté dans le Chapitre IV (Section 2.3.2.) de façon à mettre en évidence les liens entre consommations d'énergie pour les déplacements domicile-travail et structure du territoire puis à investiguer les principaux facteurs explicatifs<sup>1</sup>.

#### RAPPEL BIBLIOGRAPHIQUE – CHAPITRE III

- Les relations entre forme urbaine et consommations d'énergie pour le transport ont été largement investiguées dans la littérature, depuis les premiers travaux de Newman and Kenworthy (1989) qui liaient diminution des consommations pour le transport et augmentation de la densité, sur base d'une étude de 32 métropoles.
- Les recherches et leurs résultats peuvent différer fortement selon l'objet de l'étude, la définition donnée à la « forme urbaine », l'échantillon considéré, les indicateurs étudiés (discussion des distances parcourues ou des parts modales vs. construction d'indicateurs composites) ou la méthode adoptée.
- La consommation d'énergie pour les transports est un indicateur intéressant dans le sens où il s'agit d'un facteur composite intégrant différentes variables.
- Il n'y a pas de consensus sur les avantages de la ville compacte en matière de diminution des consommations de transport.

---

<sup>1</sup> Ces résultats ont été présentés lors d'une conférence organisée par l'Irish Transportation Research Network. L'article (« Urban Sprawl, Commuting and Travel Energy Consumption ») et sont publiés dans le Journal ICE-Energy (Marique et al., 2013b).

- Ces recherches traitent essentiellement de milieux urbains (très) denses et les résultats ne sont pas transposables à l'échelle locale.
- Les déplacements domicile-travail sont les plus étudiés car ce sont ceux pour lesquels les données sont les plus couramment disponibles.

#### RAPPEL METHODOLOGIQUE – CHAPITRE IV

- Un indice de performance des déplacements domicile-travail a été formalisé selon l'expression suivante, où,  $i$  représente l'unité territoriale considérée (le secteur statistique, l'ancienne commune ou la commune),  $m$  représente le mode de transport,  $Dmi$  représente l'ensemble des distances parcourues par les travailleurs habitant l'unité  $i$  grâce au mode de transport  $m$ ,  $fm$  représente le facteur de consommation attribué au mode  $m$  et  $Ti$  représente la population active occupée de l'unité territoriale  $i$  considérée. Les facteurs de consommation suivants sont appliqués : 0,56 kWh/personne.km pour les voitures diesel, 0,60 kWh/p.km pour les voitures essence, 0,45 kWh/p.km pour le bus, 0,15 kWh/p.km pour le train et 0 pour le vélo et la marche à pied. L'indice de performance des déplacements domicile-travail s'exprime en kWh/ trajet.personne

$$(1) \quad IPE \text{ domicile-travail } (i) = (\sum m Dmi * fm) / Ti$$

- En complément de cet indice de performance, les distances parcourues pour les déplacements domicile-travail et les parts modales peuvent aussi être discutées.
- Les données proviennent de l'enquête socio-économique de 2001 et du recensement de la population au 1<sup>er</sup> mars 1991.
- Les secteurs statistiques avec moins de 10 répondants sont éliminés.
- Les échantillons finaux pour 1991 et 2001 comprennent respectivement 797.733 individus et 966.247 individus.
- Si un trajet est réalisé par deux (ou plus) modes de transport différents, seul le mode principal est considéré, selon la hiérarchie suivante basée sur la vitesse de déplacement : train, voiture, bus, vélo, à pied.
- Le nombre de jours de travail par an est déterminé sur base du temps de travail renseigné dans les recensements utilisés.

La zone d'étude (la Wallonie) est brièvement présentée dans la Section 2. La Section 3 de ce chapitre présente une analyse des données de l'enquête socio-économique de 2001 et du recensement de la population au 1<sup>er</sup> mars 1991 en ce qui concerne les distances parcourues et les parts modales pour les déplacements domicile-travail. La Section 4 présente les principaux résultats de l'application de l'indice de performance des déplacements domicile-travail à l'ensemble du territoire wallon, à l'échelle de l'ancienne commune. L'objet de cette étude est d'investiguer les relations entre structure du territoire (comprise comme la conjonction de trois éléments : (1) la localisation des activités sur le territoire, (2) la répartition spatiale de la population selon son lieu de résidence et (3) les infrastructures et réseaux), étalement urbain et consommation d'énergie pour les déplacements domicile-travail. La Section 5 investigue l'impact de différents facteurs considérés indépendamment et conjointement. La Section 6 aborde la reproductibilité de l'approche, ses limitations et les perspectives de recherches futures. Enfin, la Section 7 dresse les conclusions principales, notamment en termes d'implications concrètes pour orienter les politiques locales.

## 2. Zone d'étude

La Wallonie (anciennement Région wallonne) est la région d'expression majoritairement francophone (à l'exception de neuf communes germanophones situées dans les cantons de l'est) située dans la partie sud de la Belgique (Figure VI-1).

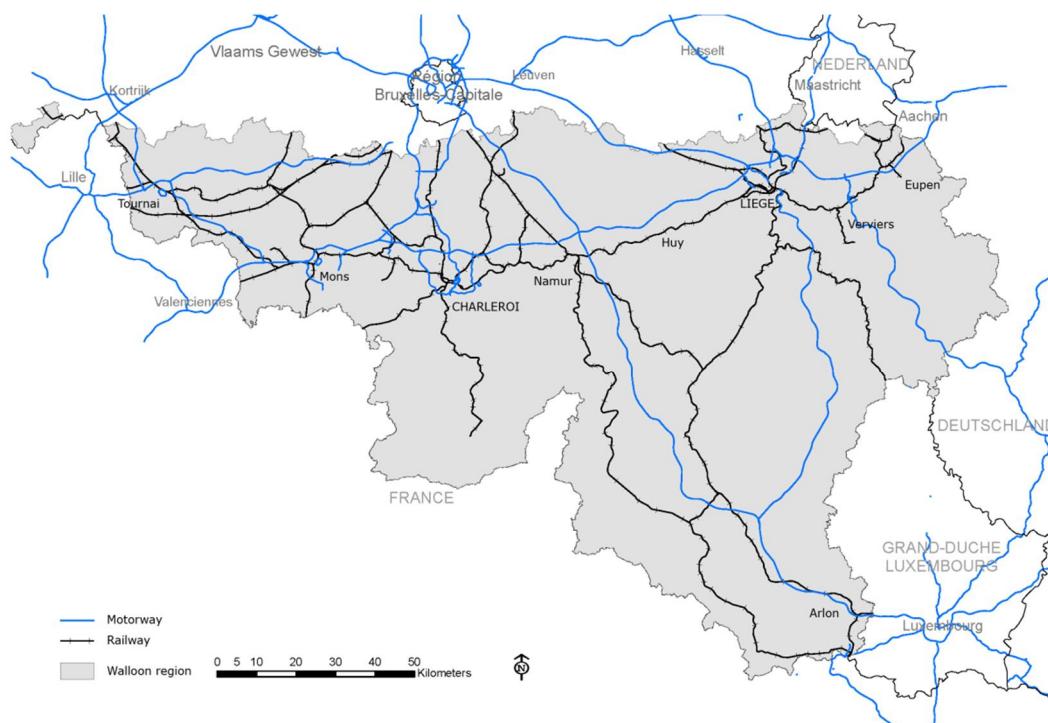


Figure VI-1 : Carte de la Wallonie.

La Wallonie compte environ 3,5 millions d'habitants pour un territoire de 16.843 km<sup>2</sup> (soit une densité brute de population de 208 habitants/km<sup>2</sup>)<sup>2</sup>. La Région de Bruxelles-Capitale (1.089.538 habitants pour 161 km<sup>2</sup>, soit 6.767 habitants/km<sup>2</sup>) est la plus grande agglomération du pays et est géographiquement localisée en Flandre (partie nord du pays, d'expression néerlandophone, 6.251.983 habitants pour 13.522 km<sup>2</sup>, soit 462 habitants/km<sup>2</sup>) même si elle entretient de solides relations avec la Wallonie. Les deux agglomérations wallonnes principales sont Liège (600.000 habitants) et Charleroi (400.000 habitants). D'autres villes régionales (d'ouest en est : Tournai, Mons, Namur, Huy, Verviers) sont localisées le long de l'ancien sillon industriel. Le reste de la région est composé d'une série de noyaux plus petits et de nombreux développements périurbains car, comme nous l'avons montré dans le Chapitre II relatif à la périurbanisation, l'étalement urbain est particulièrement important en Wallonie. De nombreux quartiers monofonctionnels et peu denses ont été développés ces dernières décennies, le plus souvent en discontinuité avec les noyaux existants.

### 3. Distances parcourues et parts modales

#### 3.1. Les distances parcourues

Les Tableau VI-1 et Tableau VI-2 présentent les distances moyennes parcourues pour les déplacements domicile-travail, sur base des données de l'enquête socio-économique de 2001.

Tableau VI-1 : Distances parcourues pour les déplacements domicile-travail, données ESE 2001.

	[0 – 5km[	[5km – 20km[	[20km – 50km[	> 50km	Distance moyenne
2001	25,7%	37,1%	24,8%	12,5%	24,0km

Tableau VI-2 : Distances parcourues pour les déplacements domicile-travail, selon le type d'aire urbaine, données ESE 2001.

	Agglomérations opérationnelles	Banlieues	Zones des migrants alternants
<b>Distance parcourue, km</b>	<b>21,3</b>	<b>25,5</b>	<b>29,5</b>
- Bruxelles <sup>3</sup>	23,2	27,2	32,6
- Charleroi	21,9	25,7	27,3
- Liège	18,6	24,3	28,9
- Mons	25,7	27,3	28,7

<sup>2</sup> Les chiffres de population proviennent du Service Public Fédéral Economie, PME, Classes Moyennes et Energie, au 1er janvier 2010, disponibles sur stabel.fgov.be, consulté en mars 2012

<sup>3</sup> Seule la partie identifiée en Wallonie est considérée ici (et ne comprend donc pas le centre historique et d'affaires)

- Namur	13,4	27,8	29,5
- La Louvière	23,9	-	26,1
- Tournai	20,8	23,4	21,4
- Verviers	17,6	22,2	17,7

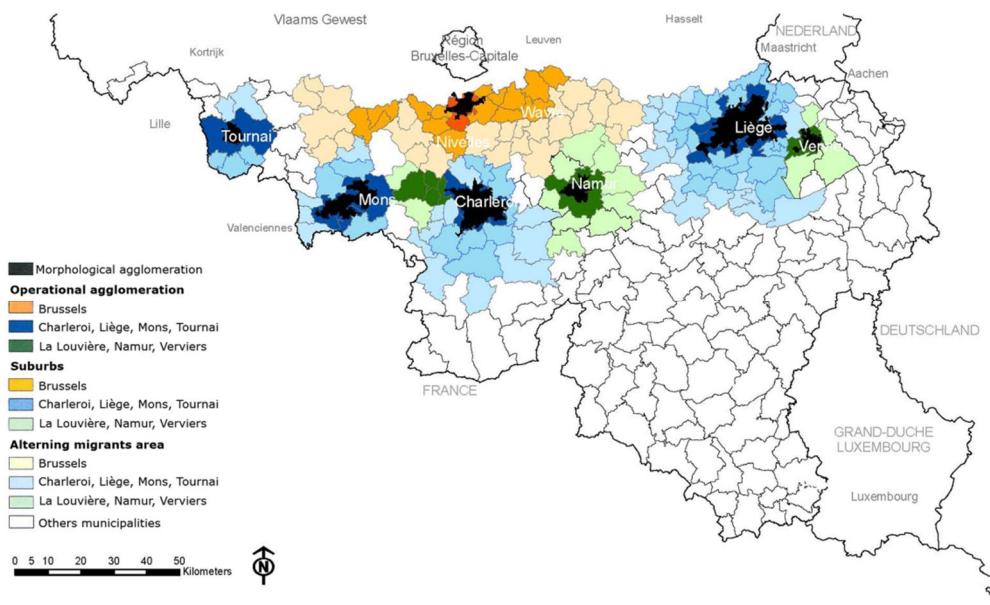


Figure VI-2 : Aires urbaines de Van der Haegen et al. (1996).

La distance moyenne d'un déplacement domicile-travail, en 2001, s'élevait à 24 kilomètres. Cette distance moyenne a tendance à augmenter avec l'éloignement au centre (de 21,3 kilomètres en moyenne dans les agglomérations opérationnelles à 29,5 kilomètres dans les zones de migrants alternants, voir aussi Figure VI-3).

La distance moyenne domicile-travail s'élevait à 20,1 kilomètres en 1991. La distance moyenne pour un déplacement domicile-travail a ainsi augmenté de 15,8% entre 1991 et 2001. L'augmentation des distances parcourues pour les déplacements domicile-travail, entre 1991 et 2001, est particulièrement marquée dans le sud de la Wallonie (province de Luxembourg) (Figure VI-4). La Province de Liège et le Sud de Bruxelles, où la périurbanisation est plus ancienne, sont par contre caractérisés par une augmentation maîtrisée, voire une diminution locale des distances parcourues. On remarque également une tendance à l'augmentation des distances dans les quartiers centraux, ce qui pourrait s'expliquer par une périurbanisation de l'emploi dans des zones d'activités périphériques.

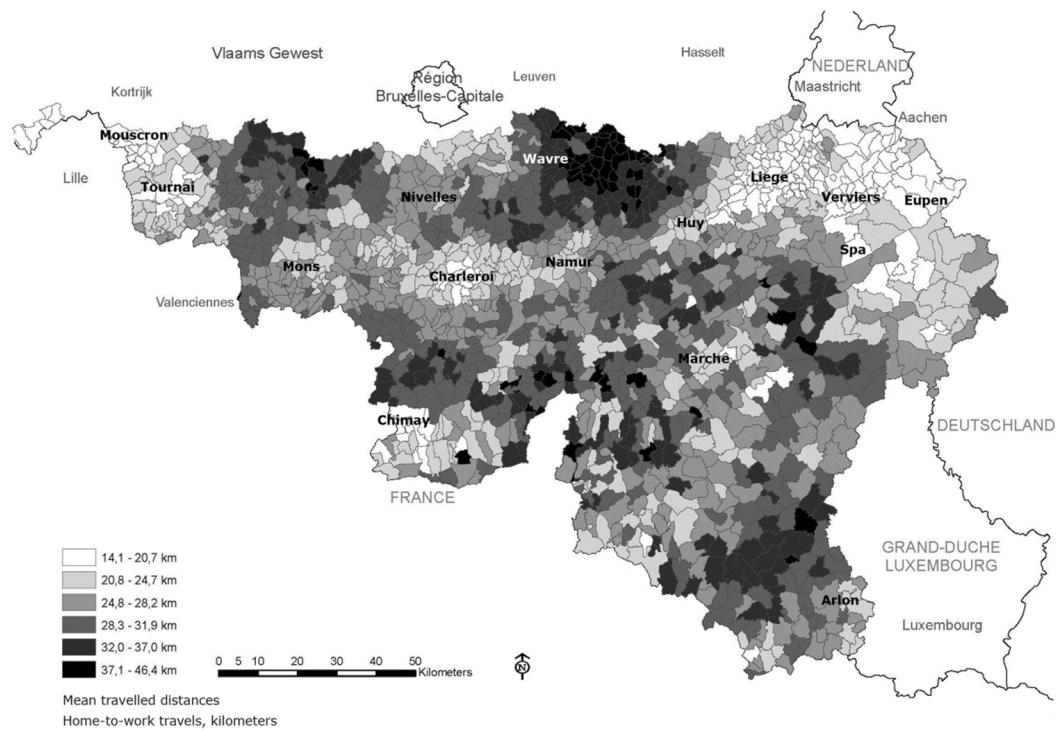


Figure VI-3 : Distance moyenne parcourue pour les déplacements domicile-travail, à l'échelle de l'ancienne commune, données ESE 2001.

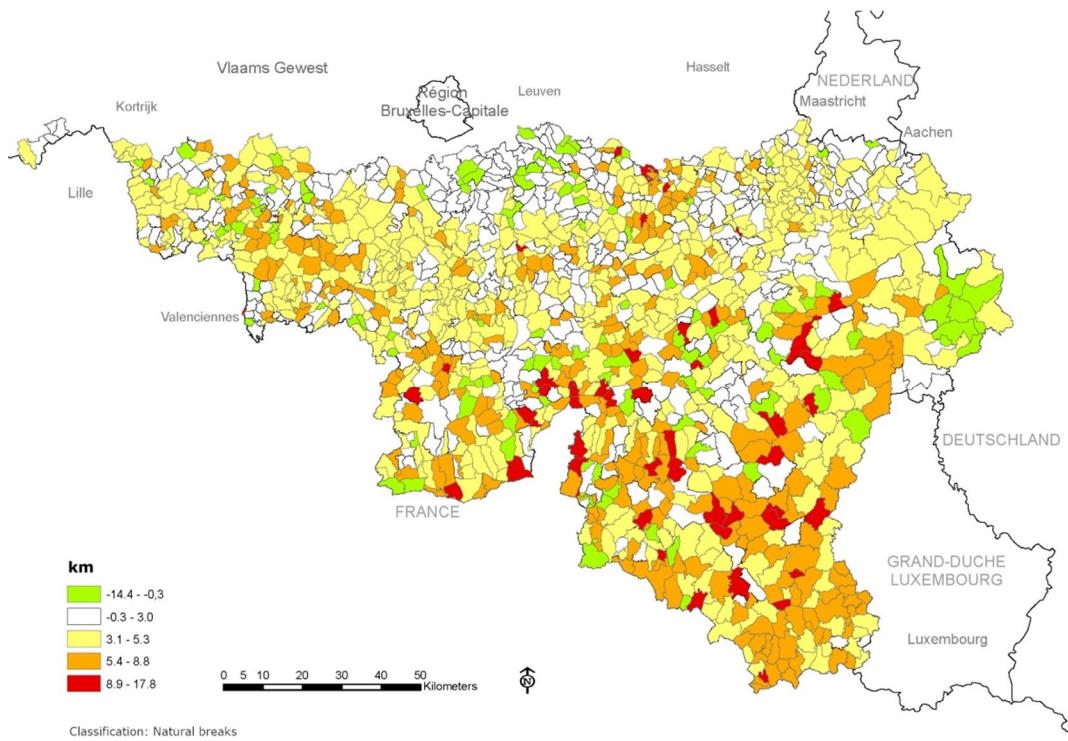


Figure VI-4 : Evolution de la distance moyenne entre 1991 et 2001, à l'échelle de l'ancienne commune, données ESE 2001 et recensement 1991.

### 3.2. Les parts modales en 2001

Les parts modales pour les déplacements domicile-travail sont largement favorables à la voiture individuelle (80,2%). Bien qu'un quart des déplacements domicile-travail fassent moins de 5 kilomètres, la part modale des modes doux est faible (6,6%). Les parts modales du bus et du train s'élèvent respectivement à 4,1% et 7,2% (Tableau VI-3).

*Tableau VI-3 : Parts modales pour les déplacements domicile-travail, données ESE 2001 et recensement 1991.*

	Marche à pied	Vélo	(A pied + vélo)	Moto	Voiture	Bus	Train
2001	5,4%	1,2%	(6,6%)	1,9%	80,2%	4,1%	7,2%
1991	7,0%	3,1%	(10,1%)	0,4%	76,7%	4,9%	7,8%

L'usage du bus pour les déplacements domicile-travail est particulièrement élevé dans les régions urbaines de Liège et de Charleroi, où les réseaux sont bien développés (Figure VI-5). La part modale du bus est, au contraire, extrêmement faible dans toute la zone sud de la Wallonie, à l'exception de l'extrême sud. En ce qui concerne le train, les anciennes communes desservies par une gare de chemin de fer se distinguent clairement par un usage plus important du train pour les déplacements domicile-travail (Figure VI-6), en particulier les communes situées le long de la ligne Luxembourg-Bruxelles et celles de l'Ouest du Hainaut, où l'offre ferroviaire à destination de Bruxelles est conséquente.

La carte relative aux modes doux (Figure VI-7) est plus complexe à interpréter. La part modale de la marche à pied et du vélo est faible dans une grande partie du territoire, à l'exception de quelques quartiers centraux et d'anciennes communes moins denses du sud et de l'est de la Wallonie. La marche et le vélo constituent ainsi des alternatives crédibles aux déplacements motorisés aussi dans des zones rurales.

Entre 1991 et 2001, les principales tendances d'évolution concernent la diminution significative de la part modale des modes doux (de 10,1% à 6,6%), celle plus limitée du bus (de 4,9% à 4,1%) et du train (de 7,8% à 7,2%) et l'augmentation, en contrepartie, de la part modale de la voiture (de 76,7% à 80,2%).

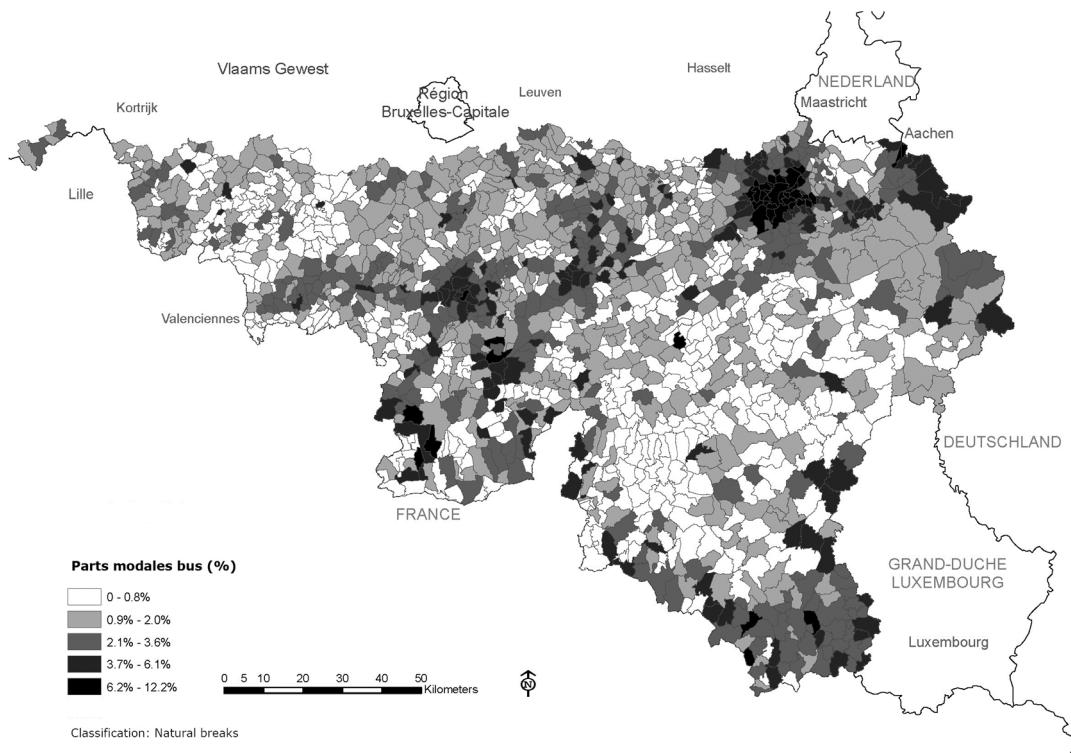


Figure VI-5 : Parts modales du bus pour les déplacements domicile-travail, à l'échelle de l'ancienne commune, données ESE 2001.

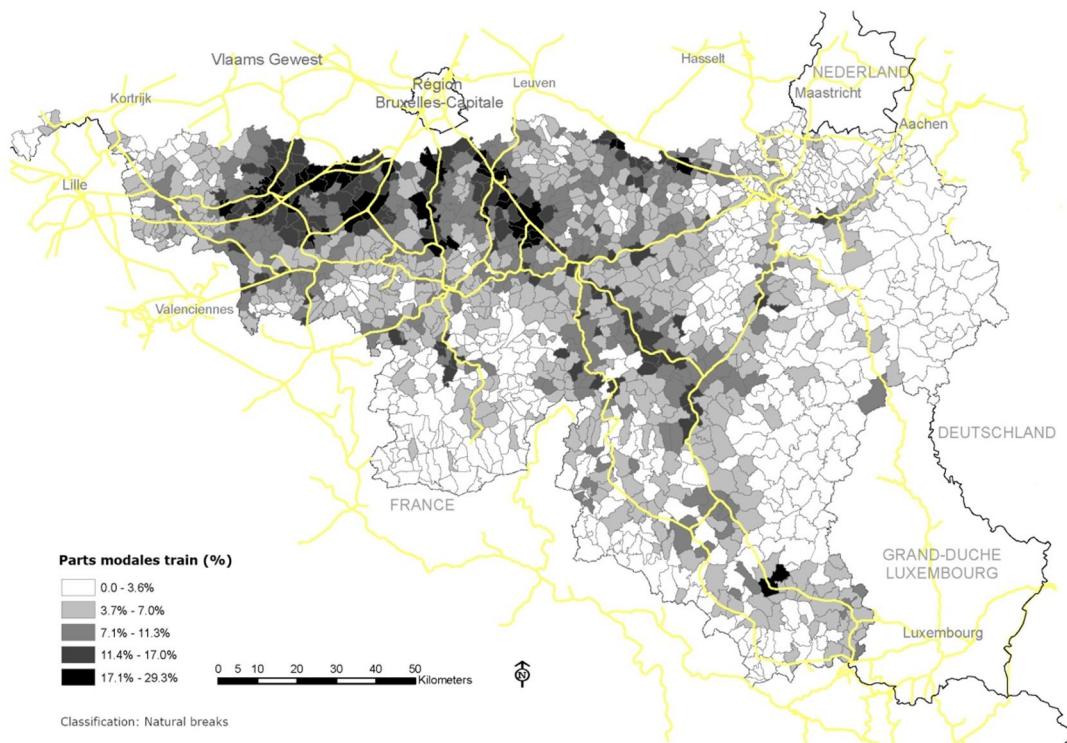


Figure VI-6 : Parts modales du train pour les déplacements domicile-travail, à l'échelle de l'ancienne commune, données ESE 2001.

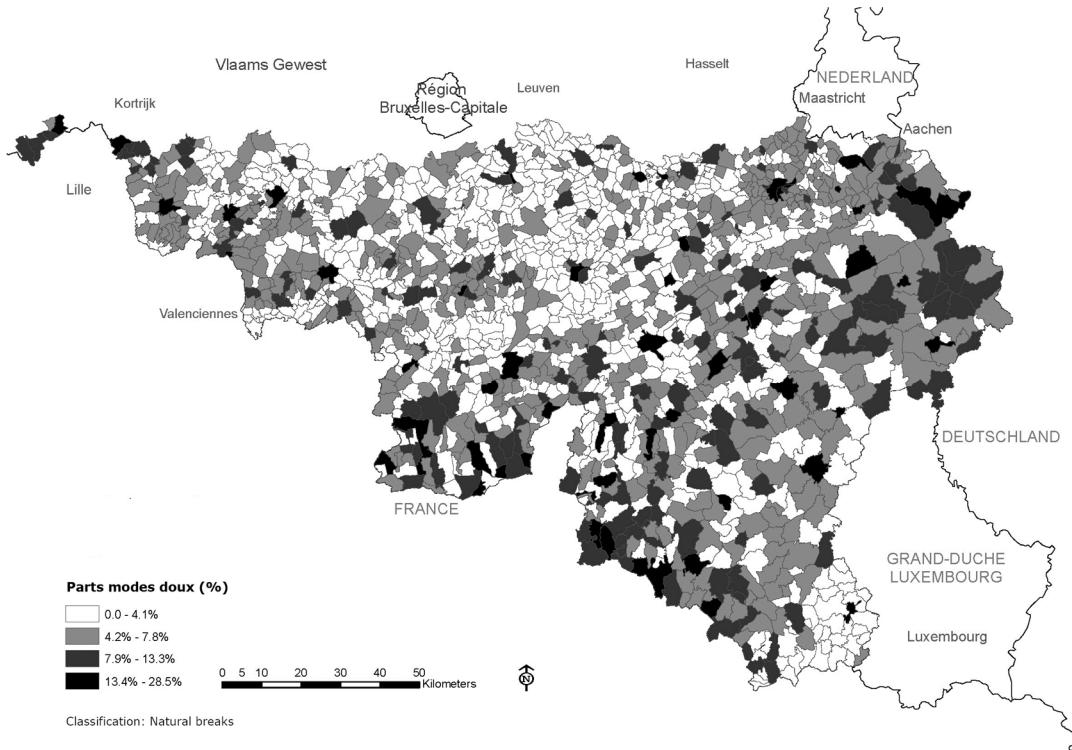


Figure VI-7 : Parts modales des modes doux (marche à pied et vélo) pour les déplacements domicile-travail, à l'échelle de l'ancienne commune, données ESE 2001.

## 4. Consommations d'énergie et structure du territoire

### 4.1. Indice de performance (ESE 2001)

L'indice de performance des déplacements domicile-travail présenté dans le Chapitre IV a été calculé et cartographié pour l'ensemble du territoire wallon à trois échelles complémentaires : la commune, l'ancienne commune et le secteur statistique.

A l'échelle de la commune (Figure VI-8), les deux agglomérations principales de la Wallonie, Liège et Charleroi, présentent les indices de performance pour les déplacements domicile-travail les plus faibles. Les autres agglomérations (identifiées par Sporck et al. (1985) et Van der Haegen et al. (1996)<sup>4</sup>, Figure VI-2) densément peuplées, situées le long de l'ancien bassin industriel, se distinguent également par des indices de performance relativement faibles. Certaines communes frontalières de l'est (proximité de l'Allemagne) ou du nord-ouest (proximité de la Flandre) présentent également un indice de performance assez faible pour les déplacements domicile-travail mais les effets « frontières » pourraient intervenir. Il est en effet probable que dans les régions proches de la Flandre ou de l'Allemagne, les navetteurs soient moins enclins à chercher du travail dans une région dont ils ne maîtrisent pas la langue et parcourent donc de moins longues distances.

<sup>4</sup> Voir Chapitre II pour plus de détails sur cette classification des aires urbaines

Les communes qui présentent les indices de performance les plus élevés sont localisées dans la périphérie sud-est de Bruxelles, qu'elles soient situées dans les provinces de Brabant wallon, de Liège ou de Namur, et dans le sud-Luxembourg (orbite de Luxembourg-Ville), à l'exception d'Arlon. Ce sont en général des communes à caractère résidentiel qui entretiennent des liens forts respectivement avec l'aire métropolitaine de Bruxelles et celle de Luxembourg-Ville en raison de la forte concentration d'emplois qui caractérise ces deux régions. Les prix fonciers et immobiliers de Bruxelles et du Luxembourg sont toutefois élevés et incitent les travailleurs à s'installer dans des communes moins chères, et donc plus éloignées, ce qui se traduit par une augmentation des distances parcourues pour les déplacements domicile-travail et par une augmentation de l'indice de performance. De plus, ces zones résidentielles peu denses sont souvent très mal desservies en transport en commun, ce qui se traduit par une dépendance importante à la voiture individuelle. On peut ainsi déceler dans cette première carte, l'influence des centres urbains, dans lesquels sont concentrés les emplois, sur l'indice de performance des déplacements domicile-travail. Les communes les plus « consommatrices » sont en effet des communes périphériques, où les distances à parcourir pour se rendre dans le pôle le plus proche (Bruxelles, Liège, Charleroi, Namur, Luxembourg essentiellement) sont importantes.

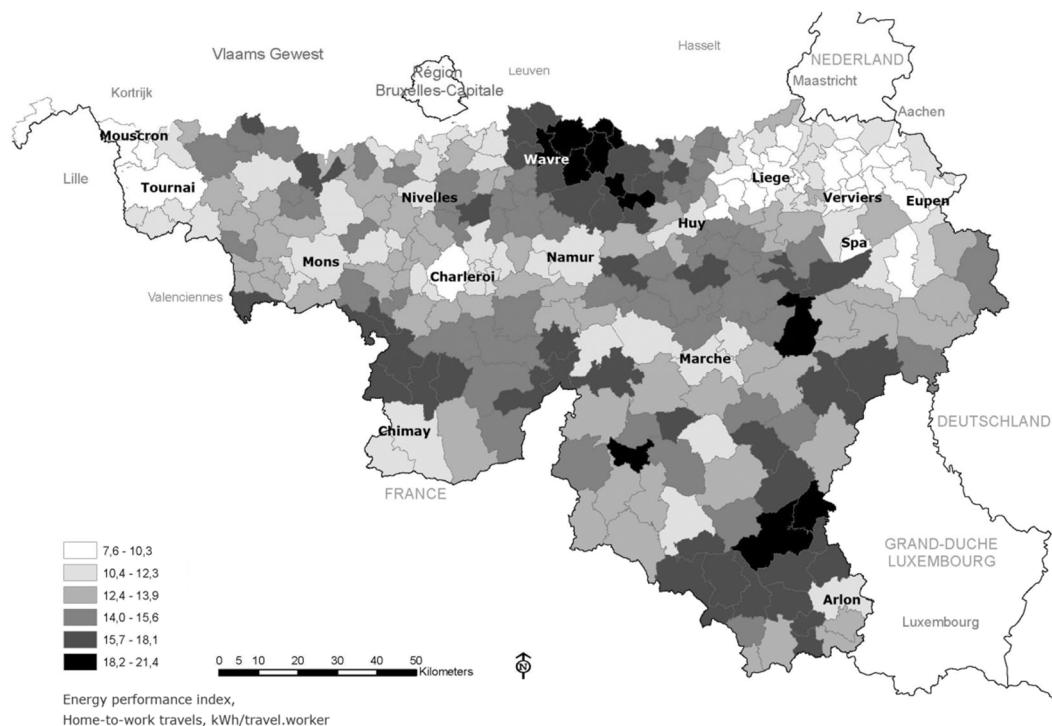


Figure VI-8 : Indice de performance des déplacements domicile-travail, à l'échelle de la commune, données ESE 2001.

Les indices de performance moyens par type d'aire urbaine et par agglomération ont été calculés et sont présentés dans le Tableau VI-4. Ces résultats mettent en évidence une augmentation de la valeur de l'indice de performance des déplacements domicile-travail et de la distance moyenne parcourue, en fonction de l'éloignement progressif au centre. Comme mis en évidence dans la section précédente, la part modale du bus pour les déplacements domicile-travail est faible. Elle diminue fortement hors des agglomérations. La part modale du train semble rester relativement stable dans les trois types d'aires urbaines considérées.

*Tableau VI-4 : Indice de performance moyen pour les déplacements domicile-travail, selon la classification des aires urbaines de Sporck et al. (1985) et Van der Haegen et al. (1996), distances moyennes et parts modales des transports en commun.*

	<b>Agglomérations opérationnelles</b>	<b>Banlieues</b>	<b>Zones des migrants alternants</b>
Indice de performance moyen (kWh/trajet.travailleur)	10,4	12,9	14,2
- Bruxelles <sup>5</sup>	11,5	12,7	15,1
- Charleroi	10,3	13,5	13,9
- Liège	9,4	12,7	14,0
- Mons	12,2	12,9	12,0
- Namur	10,8	13,8	14,2
Distance moyenne (km)	21,3	25,5	29,5
Part modale du bus	4,0%	1,7%	1,5%
Part modale du train	14,0%	12,7%	15,4%

Le Tableau VI-5 reprend, dans sa partie gauche, les 30 communes les plus « performantes » c'est-à-dire celles présentant l'indice de performance pour les déplacements domicile-travail le plus faible et, dans sa partie droite, les 30 communes les plus « énergivores » (celles où l'indice de performance est le plus élevé). Les communes surlignées en jaune appartiennent aux agglomérations morphologiques de Van der Haegen et al. (1996), celles surlignées en vert aux banlieues et celles surlignées en rose aux zones de migrants alternants. Les lettres entre crochets indiquent à quelle ville elles se rapportent ([Lg] = Liège, [Ve] = Verviers, [Ch] = Charleroi, [To] = Tournai, [Na] = Namur, [Bxl] = Bruxelles).

Parmi les 15 communes les mieux classées, neuf communes appartiennent aux agglomérations opérationnelles de Liège et Verviers. En 2001, ce nombre passe à 9. La ville de Charleroi pointe en 16<sup>ème</sup> position. Des pôles secondaires présentent également de bons indices de localisation (Eupen, Comines, Mouscron, Malmedy, Spa, Chimay). Les communes les moins bien classées sont préférentiellement situées dans l'orbite de

<sup>5</sup> Seule la partie identifiée en Wallonie est considérée ici (ne comprend donc pas le centre historique et d'affaires)

Bruxelles (Ramillies, Orp-Jauche, Helecine, etc.). Il s'agit de communes à caractère résidentiel. La différence entre l'indice de performance des communes les plus performantes et celui des communes les plus énergivores est significative. A titre indicatif, la moyenne wallonne (moyenne des indices qui prend en compte le « poids » des communes via le nombre d'actifs occupés) est de 12,1 kWh/trajet.personne en 2001.

*Tableau VI-5 : Classements des 30 communes présentant l'indice de performance domicile-travail le plus faible (à gauche) et des 30 communes présentant l'indice de performance le plus élevé. Les couleurs renvoient à l'aire urbaine à laquelle appartient les communes (voir page 160).*

Communes les mieux classées	Indice de performance, kWh/tr.pers	Communes les moins bien classées	Indice de performance, kWh/tr.pers
EUPEN	7,6	FROIDCHAPELLE	16,7
MOUSCRON	7,7	PERWEZ [Bxl]	16,7
DISON [Ve]	8,4	GESVES [Na]	16,7
COMINES	8,5	VAUX-SUR-SURE	16,7
HERSTAL [Lg]	8,6	CERFONTAINE [Ch]	16,8
SAINT-NICOLAS [Lg]	8,7	ETALLE	16,8
VERVIERS [Ve]	8,7	SILLY [Bxl]	17,0
LIMBOURG [Ve]	8,8	CHINY	17,1
LIEGE [Lg]	8,9	ATTERT	17,1
WELKENRAEDT	9,0	MARTELANGE	17,1
SERAING [Lg]	9,0	HASTIERE	17,2
BAELEN	9,2	SIVRY-RANCE	17,3
BEYNE-HEUSAY [Lg]	9,3	HERON	17,5
ANS [Lg]	9,5	FERRIERES [Lg]	17,6
PEPINSTER [Ve]	9,6	BRAIVES	17,9
TOURNAI [To]	9,6	HANNUT [Bxl]	17,9
KELMIS/LACALAMINE	9,6	BEAUVÉCHAIN [Bxl]	18,0
SPA	9,7	DOISCHE	18,1
ETAIMPUIS	9,7	JODOIGNE [Bxl]	18,5
CHARLEROI [Ch]	9,8	INCOURT [Bxl]	18,7
MALMEDY	9,9	MANHAY	19,0
GRACE-HOLLOGNE [Lg]	9,9	LEGLISE	19,0
FLEMALLE [Lg]	9,9	WASSEIGES [Bxl]	19,1
AUBEL	10,0	BURDINNE	19,3
HERVE	10,1	DAVERDISSE	19,7
PECQ [To]	10,2	HELECINE [Bxl]	20,3
OUPEYE [Lg]	10,2	LINCENT [Bxl]	20,4
THIMISTER CLERM. [Ve]	10,2	FAUVILLERS	21,2
FLERON [Lg]	10,2	ORP-JAUCHE [Bxl]	21,4
ENGIS [Lg]	10,2	RAMILLIES [Bxl]	21,4

Afin de préciser et compléter ces premières observations réalisées à l'échelle de la commune, la Figure VI-9 présente la cartographie de l'indice de performance des déplacements domicile-travail à l'échelle de l'ancienne commune. En dehors des agglomérations principales, des noyaux secondaires se distinguent également par un faible indice de performance pour les déplacements domicile-travail. Il s'agit notamment d'un ensemble de petites villes situées dans le sud de la Wallonie (par exemple, Chimay, Marche, Spa, Arlon). On peut également observer ce phénomène autour de Nivelles, dans le Brabant wallon. Ces noyaux secondaires suffisamment denses sont situés hors de la zone d'influence des agglomérations principales, ce qui permet aux habitants de trouver de l'emploi localement.

Deux phénomènes distincts peuvent ainsi être mis en évidence : la « concentration des emplois » dans les agglomérations wallonnes et les métropoles voisines ainsi que la « recomposition territoriale » autour de pôles secondaires dans des zones situées hors de l'influence des agglomérations. La « concentration des emplois » dans les métropoles et grandes villes (Bruxelles et Luxembourg en particulier) combinée aux prix immobiliers et fonciers élevés dans leur voisinage immédiat engendre des distances à parcourir élevées dans les zones résidentielles situées autour de ces pôles principaux. L'aire d'influence de ces pôles peut atteindre 40 à 50 kilomètres. Dans le cas de la « recomposition territoriale », la périurbanisation des ménages s'est accompagnée d'une reconcentration locale d'emplois, récemment (notamment autour des activités pharmaceutiques dans le Brabant wallon) ou plus anciennement (Marche, Spa, etc.). Ce phénomène permet à la population de trouver de l'emploi localement et donc de réduire les distances entre le domicile et le lieu de travail et l'indice de performance relatif aux déplacements domicile-travail.

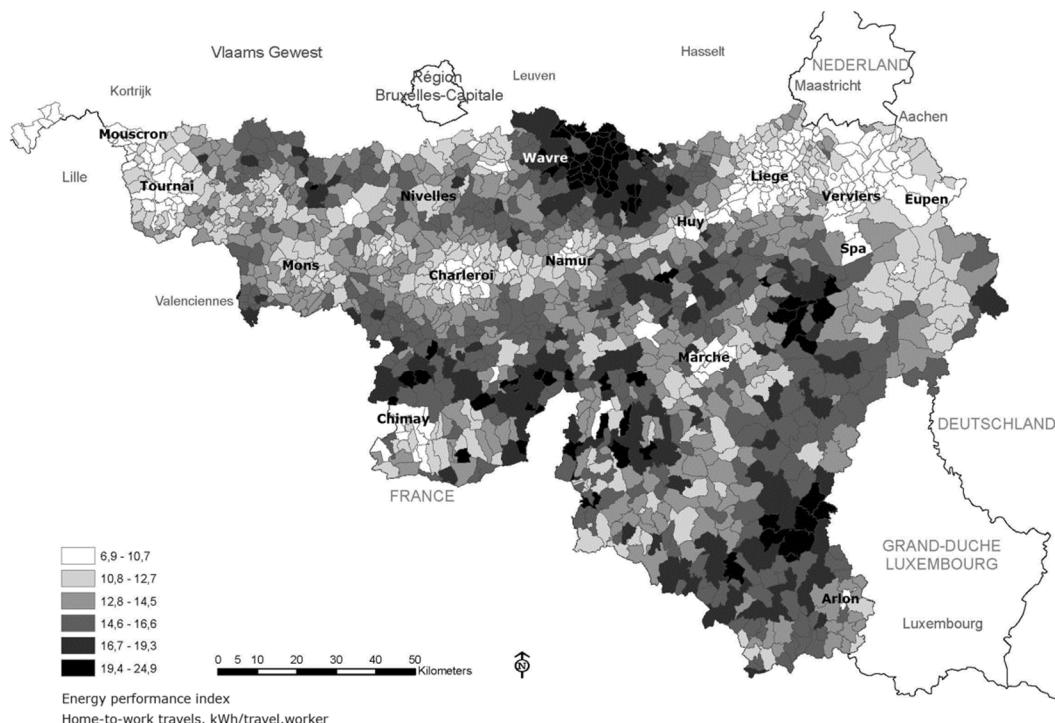


Figure VI-9 : Indice de performance des déplacements domicile-travail, à l'échelle de l'ancienne commune, données ESE 2001.

Si la « concentration d'emplois » dans les pôles principaux a engendré une déconnexion importante entre le lieu de résidence et le lieu de travail, et donc une dépendance accrue à la voiture individuelle, la « recomposition territoriale » tend, quant à elle, à structurer de nouveaux territoires de proximité.

Les cartes de distribution spatiale de l'indice de performance pour les déplacements domicile-travail et des distances parcourues permettent, en première approche, de distinguer l'impact de quelques variables. La répartition spatiale des distances parcourues pour les déplacements domicile-travail (Figure VI-3) montre en effet de grandes ressemblances avec la carte relative à la répartition spatiale de l'indice de performance (Figure VI-9). L'indice de performance des déplacements domicile-travail est fortement corrélé aux distances parcourues (coefficient de corrélation de Pearson = 0,945) alors que le mode de transport utilisé semble avoir un impact nettement plus faible. Cette observation s'explique par le lien qui existe entre distances parcourues et choix modal. Le facteur de consommation relatif aux trajets en train est ainsi environ quatre fois plus faible que le facteur de consommation appliqué aux déplacements réalisés en voiture. Toutefois, les trajets réalisés en train sont, en général, nettement plus longs que ceux parcourus en voiture. Les consommations d'énergie relatives à un long trajet en train (facteur de consommation \* distance parcourue) peuvent donc être relativement proches de celles relatives à un trajet plus court réalisé en voiture.

L'indice de performance des déplacements domicile-travail peut enfin être calculé et cartographié à l'échelle fine du secteur statistique, pour les trois types de quartier mis en évidence, sur base de classes de densité, dans le Chapitre II qui traitait de la périurbanisation wallonne et de l'élaboration d'une définition morphologique des quartiers périurbains. Le Tableau VI-6 met en évidence une augmentation de l'indice de performance avec l'augmentation de la densité. Une subdivision plus fine de la classe « périurbain » ne permet pas de confirmer cette observation.

*Tableau VI-6 : Indice de performance moyen des déplacements domicile-travail pour trois classes de densité, à l'échelle du secteur statistique, données ESE 2001.*

	<b>Milieu « urbain »</b>	<b>Milieu « périurbain »</b>	<b>Milieu « rural »</b>
Classe de densité, Logements par hectare urbanisé	> 12	5-12	< 5
IPE travail, kWh/trajet.travailleur	10,7	13,6	13,7

La carte de la répartition spatiale de l'indice de performance sur l'ensemble de la Wallonie est peu lisible à l'échelle du secteur statistique mais ce type de résultats peut être intéressant dans le cadre d'applications concernant des portions plus réduites du territoire, comme par exemple l'investigation de scénarios prospectifs à l'horizon 2060 sur la région urbaine de Liège (Reiter and Marique, In press).

L'échelle du secteur statistique est ainsi particulièrement utile pour différencier les performances énergétiques de différents quartiers d'une ville ou d'un territoire. Sur l'aire urbaine de Liège, l'augmentation de la valeur de l'indice de performance pour les déplacements domicile-travail avec la distance au centre-ville est particulièrement claire. Les quartiers périphériques résidentiels (notamment Rocourt, Soumagne, Chaudfontaine, etc.) présentent un indice élevé en comparaison des quartiers denses localisés le long de la Meuse (centres de Seraing, Liège et Herstal). Les quartiers où l'indice de performance des déplacements domicile-travail est le plus faible sont ainsi préférentiellement des quartiers centraux et bien équipés qui se sont développés historiquement le long des voies d'eau et des voies de chemin de fer.

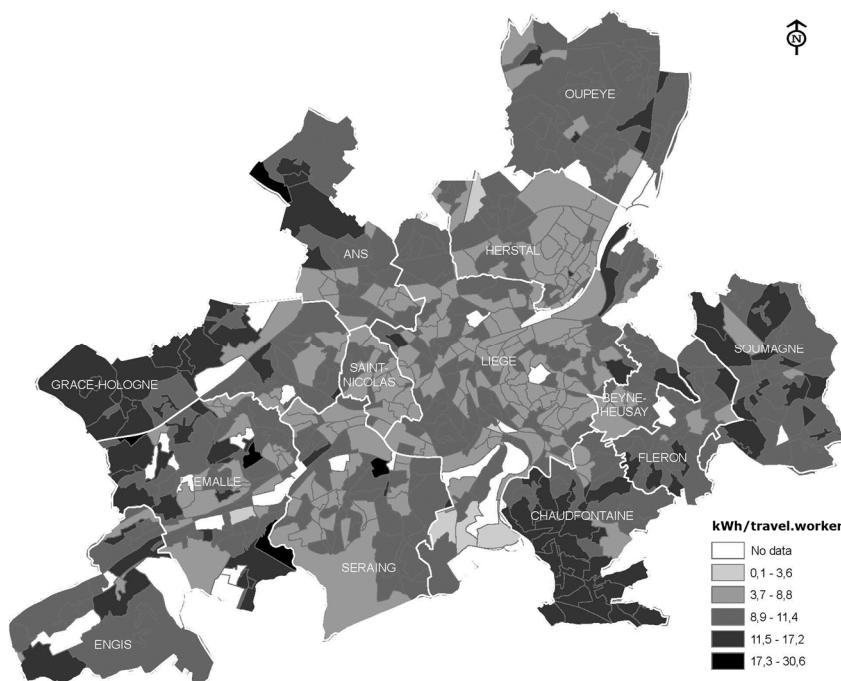


Figure VI-10 : Indice de performance des déplacements domicile-travail sur l'aire urbaine de Liège, à l'échelle du secteur statistique, données ESE 2001.

## 4.2. Consommations annuelles

Les consommations annuelles pour les déplacements domicile-travail ont été calculées et cartographiées à l'échelle de l'ancienne commune (Figure VI-11). Les observations dressées précédemment concernant l'indice de performance des déplacements domicile-travail sont ici renversées. Ce sont donc les zones denses et peuplées qui présentent les consommations d'énergie annuelles les plus élevées pour les déplacements domicile-travail, de par le volume de population qu'elles accueillent. Les économies d'énergie qui pourraient être engrangées par différentes politiques visant à réduire la dépendance à la voiture par exemple seraient potentiellement maximisées dans ces zones, grâce au volume de population potentiellement concerné.

La consommation annuelle de l'ensemble des déplacements domicile-travail de la Wallonie a été chiffrée à près de 6.800 GWh, en tenant compte du temps de travail des individus<sup>6</sup>.

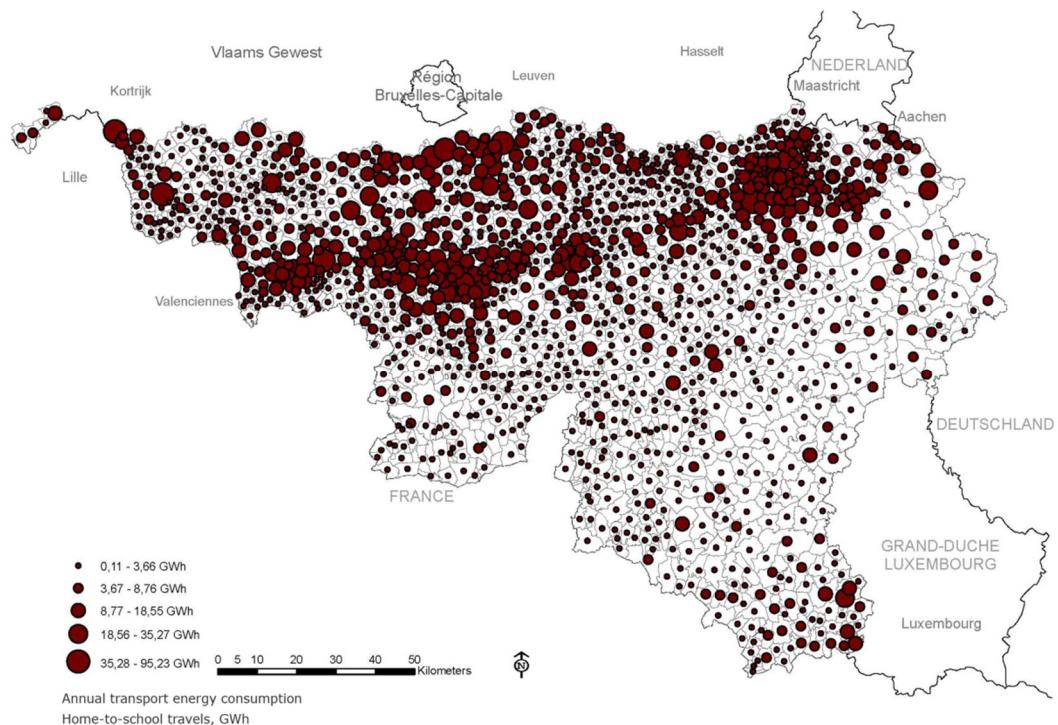


Figure VI-11 : Consommations annuelles pour les déplacements domicile-travail, à l'échelle de l'ancienne commune, données ESE 2001.

### 4.3. Evolution 1991-2001

L'évolution de l'indice de performance des déplacements entre 1991 et 2001 a été calculée et cartographiée à l'échelle de l'ancienne commune (Figure VI-12). L'indice de performance a augmenté de façon significative pour la majorité des anciennes communes wallonnes. Cette augmentation est liée à l'augmentation, d'une part, des distances parcourues et à la diminution, d'autre part, des parts modales de la marche à pied et du vélo. L'augmentation de l'indice de performance des déplacements domicile-travail est particulièrement importante dans le sud de la Wallonie, en particulier à proximité du Grand-Duché de Luxembourg. De nombreux développements résidentiels peu denses y ont en effet été réalisés durant la décennie considérée de façon à répondre aux besoins de logements d'un nombre croissant de ménages belges travaillant au Luxembourg. Cette

<sup>6</sup> Si les consommations annuelles pour les déplacements domicile-travail sont calculées sur base d'un nombre type de jours ouvrables (un trajet aller-retour pendant 253 jours ouvrables), sans tenir compte du temps de travail que les individus ont renseigné dans les recensements, la consommation annuelle est surestimée de près de 20%.

région est caractérisée par des disponibilités foncières importantes, à des prix encore abordables, mais n'offre que peu d'opportunités d'emplois localement.

L'indice de performance des déplacements domicile-travail tend à augmenter plus légèrement dans l'ouest du Hainaut et dans une partie de la périphérie sud de Bruxelles. Des diminutions locales de l'indice de performance sont enregistrées à Lasne, Chaumont-Gistoux, Ottignies, Louvain-La-Neuve et Wavre, en lien avec les phénomènes de recomposition locale mis en évidence précédemment.

L'indice de performance moyen pour les déplacements domicile-travail s'élevait à 9,8 kWh/personne.trajet en 1991 et à 12,1 kWh/personne.trajet en 2001 (augmentation de 19%). Les consommations annuelles pour les déplacements domicile-travail sont passées, durant la même période, de 5.017 GWh à 6.800 GWh, soit une augmentation de 26,2%.

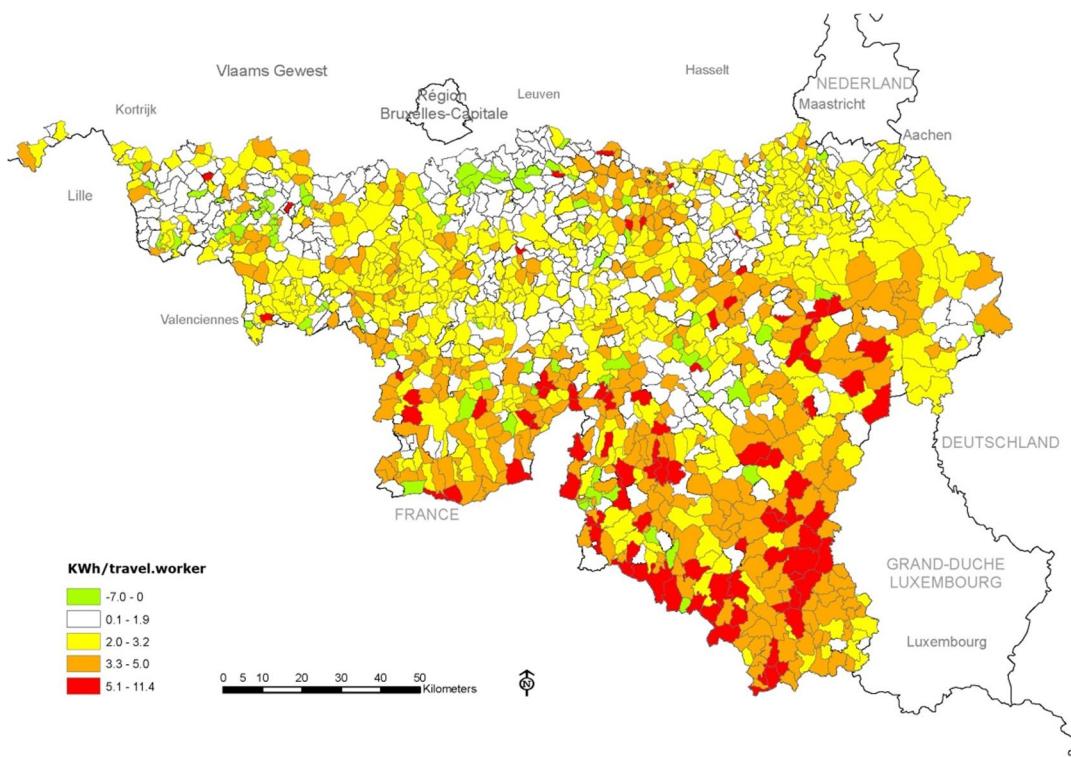


Figure VI-12 : Evolution de l'indice de performance des déplacements domicile-travail entre 1991 et 2001, à l'échelle de l'ancienne commune, données ESE 2001 et recensements 1991.

#### 4.4. Comparaison nationale

Les données utilisées pour la Wallonie sont également disponibles pour les territoires flamands et bruxellois. L'indice de performance des déplacements domicile-travail a été calculé et cartographié pour l'ensemble de la Belgique (Figure VI-13). Les facteurs de consommation calculés pour la Wallonie ont été appliqués sur tout le territoire belge. Les résultats sont donc légèrement défavorables à la Flandre et à Bruxelles en ce qui concerne les transports en commun car les taux d'occupation sont plus élevés qu'en Wallonie. Pour rappel, la congestion, qui peut être très importante à Bruxelles, n'a pas été prise en compte.

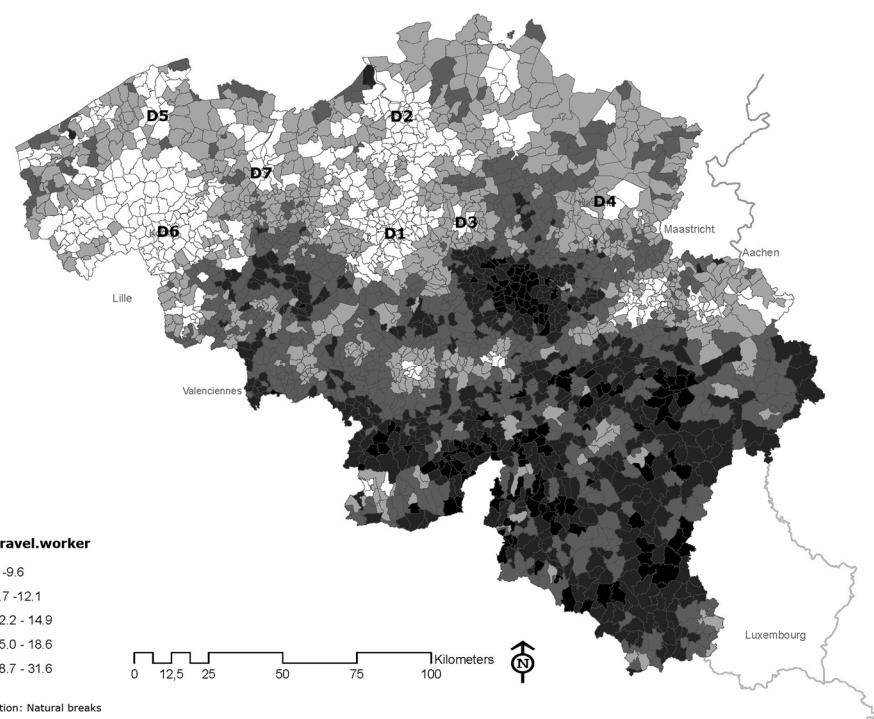


Figure VI-13 : Indice de performance des déplacements domicile-travail, à l'échelle de l'ancienne commune, données ESE 2001.

Tableau VI-7 : Comparaison des indices de performance moyens des déplacements domicile-travail en Wallonie, en Flandre, à Bruxelles et en Belgique, kWh/trajet.travailleur, données ESE 2001.

	Wallonie	Bruxelles	Flandre	Belgique
Travail	12,1	6,0	10,0	10,1

L'indice de performance des déplacements domicile-travail est moins élevé en Flandre, et surtout à Bruxelles, qu'en Wallonie (Tableau VI-7). L'indice moyen pour la Belgique s'élève à 10,1 kWh/trajet.personne, contre 12,1 pour la Wallonie considérée isolément. Il apparaît que Bruxelles (D1 sur la Figure VI-13) et les principales aires urbaines flamandes

(Antwerpen (D2), Leuven (D3), Hasselt (D4), Brugge (D5), Kortrijk (D6) et Gent (D7)), mais aussi leurs banlieues, présentent des indices de performance faibles, alors que l'indice de performance des déplacements domicile-travail a tendance à augmenter plus fortement autour des aires urbaines de Wallonie. Des zones résidentielles périurbaines flamandes (autour d'Antwerpen ou de Kortrijk, notamment) présentent un indice de performance moins élevé que des zones wallonnes plus denses. L'indice de performance est élevé essentiellement dans l'ouest du Limbourg et l'est du Brabant Flamand où l'étalement urbain est important, notamment de par la présence de l'autoroute E40.

L'étude des distances parcourues et des parts modales met en évidence à la fois des distances plus courtes en Flandre et à Bruxelles (18 km en moyenne en Flandre contre 24 km en Wallonie et moins de 2 km à Bruxelles) et une utilisation plus modérée de la voiture pour les déplacements domicile-travail. On observe également une plus grande variation de l'indice de performance des déplacements domicile-travail en Wallonie, en lien probablement avec une plus grande hétérogénéité du territoire, tant en termes de densité, de mixité que de caractéristiques socio-économiques comme la « santé » du marché du travail. Le marché de l'emploi en Flandre est, pour l'instant, plus dynamique qu'en Wallonie, ce qui permet, en combinaison avec une plus grande densité bâtie et un réseau de transports en commun efficace, de minimiser les consommations d'énergie pour les déplacements domicile-travail, en comparaison avec la Wallonie. Sans entrer dans les détails de l'analyse approfondie de la répartition spatiale de l'indice de performance des déplacements domicile-travail en Flandre (voir à ce propos Boussauw and Witlox (2009) et Dujardin et al. (2012b)), l'objet de cette rapide comparaison est de mettre en évidence, au niveau des comportements de mobilité, les spécificités qui peuvent caractériser le territoire wallon et de réaffirmer la nécessité d'une approche locale spécifique au territoire étudié et à ses caractéristiques, en particulier en ce qui concerne les réponses et les stratégies de renouvellement qui seront proposées.

## 5. Variables explicatives

### 5.1. Corrélations bivariées

Les analyses de corrélations bivariées permettent de mettre en évidence les relations de causalité entre variables considérées deux à deux. Plus le coefficient de corrélation (coefficient de Pearson) est proche de un, en valeur absolue, plus la corrélation entre les deux variables considérées est importante (pour autant, comme le rappelle Pouyanne (2004) qui a réalisé le même type d'analyse sur Bordeaux, que les variables considérées soient toutes les deux corrélées à une troisième variable). Les analyses suivantes ont été effectuées à l'échelle de l'ancienne commune (1.471 anciennes communes). Les variables considérées sont les suivantes :

- La densité nette de population (population par hectare urbanisé), calculée par Dujardin et al. (2010).

- La densité nette de logements (nombre de logements par hectare urbanisé), calculée sur base de la cartographie de l'occupation du sol wallon (COSW) par Dujardin et al. (2010).
- La mixité, appréhendée par un indicateur de mixité fonctionnelle développé par Dujardin et al. (2010) et calculé, pour la Wallonie, sur des pixels de 10 \* 10 mètres, sur base de la cartographie de l'occupation du sol wallon (COSW) et pondéré selon la proximité entre les activités.
- L'accessibilité à l'emploi est mesurée par le nombre d'emplois situés dans un rayon de dix kilomètres autour du lieu de résidence.
- La part modale des modes doux pour les déplacements domicile-travail du niveau considéré. Cette donnée provient de l'enquête socio-économique de 2001.
- Le revenu des ménages provient de l'enquête socio-économique de 2001. Cette variable est soumise à plus de précaution dans le sens où il n'est pas certain que les ménages aient renseigné la totalité de leur revenu dans l'enquête.
- Le niveau d'éducation des ménages est assimilé au diplôme le plus élevé obtenu. Il provient de l'ESE 2001
- Le nombre de voitures par ménage provient également de l'ESE 2001.

Le Tableau VI-8 présente les résultats des corrélations bivariées entre, d'une part, l'indice de performance des déplacements domicile-travail, la distance moyenne parcourue et la part modale de la voiture et, d'autre part, les huit variables présentées ci-dessus. Il apparaît que la densité (de population ou de logement), la mixité et le nombre d'emplois situés dans un rayon de 10 kilomètres sont corrélés significativement, et négativement, aux trois indicateurs utilisés, ce qui signifie donc bien qu'une augmentation de la densité, de la mixité ou du nombre d'emplois dans le rayon considéré entraîne une diminution de l'énergie consommée pour les déplacements domicile-travail, de la distance parcourue et de la part modale de la voiture. Il convient toutefois de rester attentif au fait que les résultats présentés représentent une tendance générale mais cachent de grandes variabilités locales, comme mis en évidence sur les Figure VI-14 et Figure VI-15.

Les variables de type socio-économique (revenu, niveau d'éducation et nombre de voitures) augmentent avec l'augmentation des trois indicateurs. C'est le revenu qui présente les coefficients de corrélation de Pearson les plus faibles, ce qui renvoie peut-être à la faible fiabilité de ces données dans les enquêtes socio-économiques. Le revenu du ménage et le nombre de voitures par ménage étant fortement corrélés (coefficient de Pearson = 0,632\*\*), il semble préférable d'utiliser ce dernier indicateur préférentiellement au revenu.

Tableau VI-8 : Résultats des corrélations bivariées (coefficient de Pearson).

	Indice de performance	Distance domicile-travail	Part modale de la voiture
Densité nette de population	-0,470**	-0,419**	-0,453**
Densité nette de logements	-0,432**	-0,385**	-0,478**
Mixité fonctionnelle	-0,565**	-0,483**	-0,515**
Emploi à 10 km	-0,518**	-0,502 **	-0,206**
Part modale des modes doux	-0,348**	-0,347**	-0,572**
Revenu	0,078**	0,123**	0,056**
Niveau d'éducation	0,178**	0,203**	0,117**
Nombre de voitures	0,369**	0,307**	0,543**

\*\* Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed)

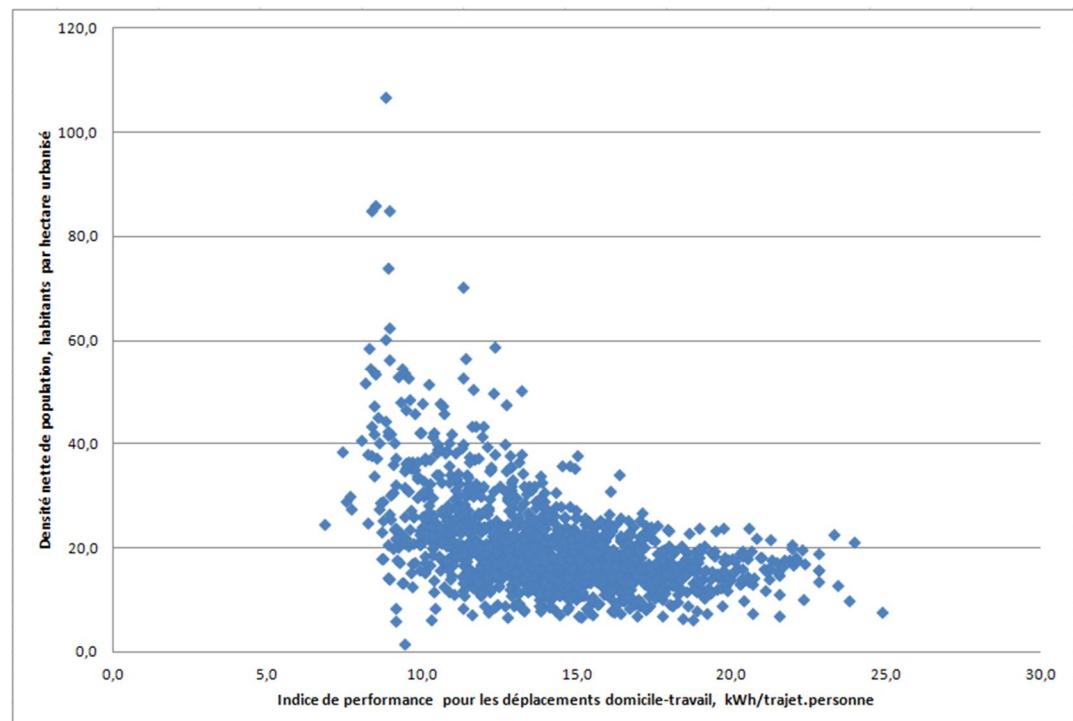


Figure VI-14 : Corrélation entre l'indice de performance et la densité nette de population.

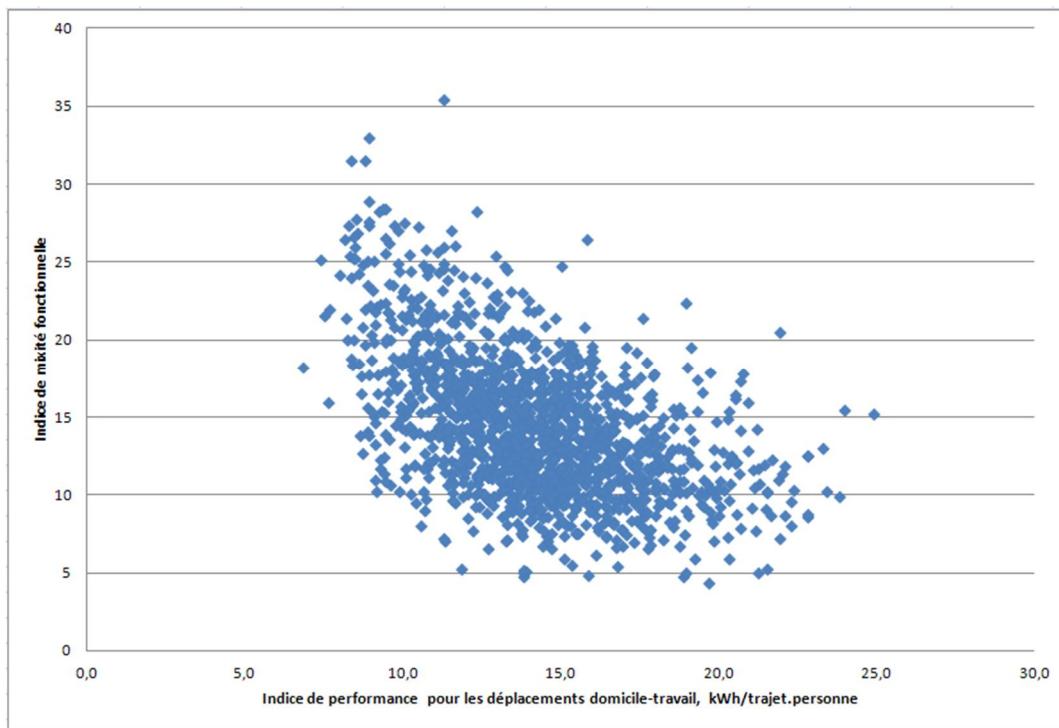


Figure VI-15 : Corrélation entre l'indice de performance des déplacements domicile-travail et l'indice de mixité fonctionnelle.

Le Tableau VI-9 vise à compléter l'analyse en ce qui concerne la part modale des modes doux (marche à pied et vélo). Une corrélation de moins en moins forte est mise en évidence entre la part modale des modes doux et le nombre d'emplois situés dans un périmètre, avec l'augmentation de ce périmètre.

Tableau VI-9 : Résultats des corrélations bivariées (coefficient de Pearson) entre la part modale des modes doux (marche à pied et vélo) et le nombre d'emplois à 1, 2, 3, 4, 5 et 10 kilomètres.

	Emploi à 1km	Emploi à 2km	Emploi à 3km	Emploi à 4km	Emploi à 5km	Emploi à 10km
Parts modes doux	0,275**	0,198**	0,133**	0,092**	0,068**	0,045**

\*\* Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed)

## 5.2. Régressions linéaires multiples

Des analyses de régressions linéaires multiples ont enfin été réalisées de façon à clarifier et valider certains des mécanismes qui sous-tendent les relations mises en évidence entre la structure du territoire wallon et les consommations d'énergie pour les déplacements domicile-travail.

Les régressions linéaires multiples visent à expliquer une variable dépendante Y par la conjonction d'un ensemble de variables explicatives indépendantes  $X_i$ . Formellement,

cette relation s'exprime de la façon suivante où  $\beta_i$  représentent les coefficients de régression à déterminer (ici par la méthode des moindres carrés ordinaires) :

$$(1) \quad Y = \text{Constante} + \beta_1 * X_1 + \beta_2 * X_2 + \dots + \beta_n * X_n$$

Trois paramètres relatifs aux modèles étudiés doivent être étudiés pour analyser les résultats des régressions linéaires multiples et leur potentiel explicatif :

- $R^2$  : le coefficient de détermination mesure la « force explicative» du modèle. Plus le  $R^2$  est proche de 1, plus l'adéquation entre le modèle et les variables est bonne.
- $\beta$  : le coefficient de régression mesure le changement de la variable dépendante lorsque la variable indépendante augmente d'un écart-type. Il exprime ainsi la contribution de chacune des variables indépendantes et permet de déterminer celles qui ont le plus grand pouvoir explicatif.
- P-value : il s'agit de tester la significativité du modèle et donc de tester la probabilité qu'aucune des variables indépendantes ne soit liée à la variable dépendante. Un modèle est significatif si  $p < 0,05$  (ou  $p < 0,01$ ), ce qui signifie qu'il y a moins de 5% (ou 1%) de chances que le modèle testé n'explique pas la variable dépendante.

L'influence de caractéristiques locales (variables indépendantes,  $X_i$ ) a été investiguée pour expliquer la variation de l'indice de performance des déplacements domicile-travail (variable dépendante,  $Y$ ). Les variables indépendantes relatives à la structure du territoire ont été identifiées sur base des résultats précédents et des observations qualitatives dressées lors de l'analyse des cartes de répartition de l'indice de performance des déplacements domicile-travail. Les variables relatives à la structure du territoire sélectionnées sont (Modèle 1) :

- La densité nette de population.
- La mixité fonctionnelle.
- L'accessibilité à l'emploi (10 kilomètres).

Les variables utilisées ont été soumises à une transformation logarithmique à cause de la déviation observée par rapport à une distribution normale. Le Tableau VI-10 (Modèle 1) présente les résultats des régressions linéaires multiples. Les variables sélectionnées expliquent 40% de la variation de l'indice de performance des déplacements domicile-travail. La concentration d'emplois dans un rayon de 10 kilomètres autour du lieu de résidence, en particulier, est une variable explicative forte. La mixité fonctionnelle a un pouvoir explicatif plus important que la densité. Ces résultats confirment et valident les observations plus qualitatives réalisées lors de l'observation des cartes de distribution spatiale de l'indice de performance des déplacements domicile-travail.

La part modale de la voiture (Modèle 2) et des variables de type socio-économique (Modèle 3) ont ensuite été ajoutées au modèle. Le coefficient de détermination  $R^2$  n'est que

légèrement augmenté et c'est toujours le nombre d'emplois localisés à moins de 10 kilomètres du lieu de résidence qui a le pouvoir explicatif le plus fort.

Tableau VI-10 : Résultats des analyses de régressions linéaires multiples.

	Modèle 1	Modèle 2	Modèle 3
R <sup>2</sup>	0,401*	0,431*	0,457*
(Constante)	1,471*	1,123*	0,884*
Densité	-0,099*	-0,074*	-0,056*
Mixité	-0,296*	-0,202*	-0,173*
Emploi 10km	-0,379*	-0,385*	-0,421*
Part modale auto		0,204*	0,201*
Niveau d'éducation			0,168*

\* p < 0,05

Les variables de type socio-économique (niveau d'éducation, revenu moyen et nombre de voitures par ménage) considérées comme seules variables indépendantes n'expliquent que 22,9% de la variance de l'indice de performance des déplacements domicile-travail.

La part de la variance de l'indice de performance des déplacements domicile-travail non couverte par les modèles proposés peut s'expliquer par deux éléments : (1) les variables utilisées peuvent ne pas être suffisamment précises et ne pas intégrer toute la complexité de la réalité et (2) des facteurs liés aux comportements humains et aux arbitrages que réalisent les ménages au cas par cas interviennent et ne sont pas considérés dans les modèles proposés.

## 6. Limitations et reproductibilité

Ce chapitre a examiné les relations entre structure du territoire wallon et consommations d'énergie pour les déplacements domicile-travail via la cartographie d'un indice de performance des déplacements. Si ce champ de recherches a déjà été investigué dans la littérature existante, qui cible toutefois essentiellement des zones (très) denses, la contribution proposée dans le cadre de ce chapitre et de l'article qui lui est dédié propose un éclairage nouveau des relations entre structure du territoire et consommations d'énergie pour les déplacements domicile-travail, à l'échelle locale et sur un territoire incluant des zones urbaines, périurbaines et rurales. L'intérêt d'une approche locale, notamment dans l'identification de pôles secondaires présentant un faible indice de performance, a été démontré et permet de dresser un état des lieux plus nuancé des relations entre structure du territoire et consommations d'énergie pour les déplacements domicile-travail, notamment en ce qui concerne les territoires périurbains. Des analyses de régressions linéaires ont ensuite permis de renforcer et valider les observations qualitatives réalisées sur base de l'examen des cartes de répartition de l'indice de performance des déplacements domicile-travail.

Des limitations, intrinsèques à tout travail scientifique, doivent être posées. Premièrement, les facteurs de consommations utilisées ont été calculés pour des territoires périurbains et sont donc défavorables aux milieux urbains où des taux de remplissage plus élevés des transports en commun sont enregistrés. L'influence de la congestion, qui peut significativement augmenter la consommation des véhicules, n'a pas été considérée. Les analyses présentées dans ce chapitre ciblent l'impact de la structure du territoire sur les consommations d'énergie pour les déplacements domicile-travail et ne tiennent pas compte de facteurs externes comme les comportements des individus, qui ont également un rôle explicatif dans les déplacements domicile-travail et dans la mobilité des adultes de façon plus générale.

En ce qui concerne la reproductibilité de l'approche proposée, le calcul de l'indice de performance a été standardisé via une routine Matlab, ce qui rend son application à d'autres territoires relativement facile à envisager pour autant que des données du même type que celles utilisées ici soient disponibles (on pensera par exemple aux recensements de population réalisés par l'INSEE en France, l'ONS au Royaume-Uni ou l'IDESCAT en Catalogne). Les autres facteurs (facteurs de consommation, taux de remplissage des transports en commun, etc.) peuvent être adaptés aux spécificités locales d'autres territoires. La comparaison rapide avec le territoire flamand illustre l'intérêt de cette approche.

Enfin, les données utilisées sont issues de deux recensements datant de 1991 et de 2001. Si une tendance évolutive forte a pu être mise en évidence durant cette décennie, il est difficile d'extrapoler cette tendance jusqu'à aujourd'hui, voire pour la décennie prochaine. Cette limite est d'autant plus cruciale que les recensements du type de ceux utilisés dans ce chapitre ne seront plus organisés à l'avenir. Les résultats des études sectorielles menées sur des échantillons de population de taille réduite ne semblent pas reproductibles à plus grande échelle. Il conviendra donc, à l'avenir, de baser ce type d'étude sur des données d'un autre type et notamment sur celles qui pourraient être obtenues via le développement de modèles de prédiction des flux de transports.

## 7. Conclusions et incidences pratiques

L'investigation des relations entre structure du territoire wallon et consommations d'énergie pour les déplacements domicile-travail grâce au développement d'un indice de performance des déplacements et à son application à l'ensemble du territoire wallon a permis de mettre en évidence deux phénomènes principaux. La concentration d'emplois dans les agglomérations principales, et en particulier dans les métropoles voisines, engendre des distances parcourues et des indices de performance élevés pour les déplacements domicile-travail alors que la relocalisation d'emplois dans certaines zones suffisamment peuplées engendre une diminution des indices de performance pour les déplacements domicile-travail car les travailleurs ont la possibilité de trouver de l'emploi localement. Nous avons montré que le facteur qui a le plus d'influence sur l'indice de

performance des déplacements domicile-travail est la distance parcourue. Le mode de transport utilisé a une influence plus réduite.

Les analyses de régressions ont également montré que la mixité et l'offre d'emplois dans un périmètre de 10 kilomètres sont des éléments déterminants pour expliquer la variation de l'indice de performance des déplacements domicile-travail. A cet effet, il convient donc de favoriser les déplacements de courte distance pour agir de façon efficace sur les consommations d'énergie pour les déplacements domicile-travail, en particulier en accompagnant la densité d'une plus grande mixité fonctionnelle à l'échelle des quartiers de vie. Favoriser la « ville des courtes distances » devrait également permettre un meilleur report modal de la voiture sur les modes doux (marche à pied et vélo) même si cette relation n'est pas directe. Toutefois, en raison de la très forte inertie du stock bâti existant, des changements majeurs affectant les lieux de résidence et d'emplois ne peuvent être envisagés qu'à moyen ou long terme. La localisation des nouveaux développements devrait par contre faire l'objet, dès à présent, de critères stricts visant à éviter de reproduire les zones monofonctionnelles peu denses qui font florès sur le territoire wallon. Plus largement, améliorer les performances des véhicules devrait également mener à des réductions significatives des consommations. Cette stratégie ne permettra toutefois pas de remettre en question les comportements de mobilité, la dépendance à la voiture et leurs influences importantes sur le territoire et la qualité de vie. Promouvoir des transports en commun plus efficaces (tant en termes de performance des véhicules que de desserte) dans les zones les plus denses du territoire est enfin une piste à étudier, même si les mécanismes qui sous-tendent le report modal de la voiture sur les transports en commun sont complexes. Enfin, la question des comportements personnels et des modes de vie, qui pourraient être infléchis via de plus larges campagnes de sensibilisation, devrait également faire l'objet de recherches approfondies.

# Chapitre VII

## Déplacements Scolaires, Energie et Structure du Territoire

### 1. Objectifs et rappels

Tout comme pour les déplacements domicile-travail dans le chapitre précédent, l'objet de ce chapitre est de généraliser l'indice de performance des déplacements scolaires développé et présenté dans le Chapitre IV (Section 2.3.2) à l'ensemble du territoire wallon de façon à identifier les liens entre structure du territoire et consommations d'énergie pour les déplacements scolaires puis à investiguer les principaux facteurs explicatifs<sup>1</sup>.

#### RAPPEL BIBLIOGRAPHIQUE – CHAPITRE III

- Les recherches traitant de la mobilité des enfants et des jeunes se sont principalement intéressées à trois thèmes : le déclin des parts modales de la marche à pied et du vélo (ou « active commuting ») pour les déplacements scolaires, la promotion de la mobilité individuelle des enfants sans le recours à un adulte accompagnant et l'augmentation de l'obésité et de l'inactivité physique chez les enfants.
- L'absence de supervision par un adulte responsable, l'âge de l'enfant et la peur des agressions sont autant de facteurs qui expliquent la diminution des parts modales de la marche à pied et du vélo.
- Ces études concernent essentiellement le contexte nord-américain.
- Les échantillons considérés sont de taille variable (de quelques dizaines d'individus à quelques centaines).
- Les comportements de mobilité des enfants pourraient avoir une influence sur leur comportement de mobilité une fois devenus adultes.

<sup>1</sup> Les résultats présentés dans ce chapitre sont publiés dans l'article : MARIQUE, A.-F., DUJARDIN, S., TELLER, J. & REITER, S. 2013a. School commuting: the relationship between energy consumption and urban form. *Journal of Transport Geography*, 26, 1-11.

## RAPPEL METHODOLOGIQUE – CHAPITRE IV

- Un indice de performance des déplacements scolaires a été formalisé selon l'expression suivante, où, pour chaque niveau scolaire  $I$  (maternel et primaire, secondaire, supérieur),  $Dmil$  représente l'ensemble des distances parcourues par les étudiants résidant dans l'entité  $i$  et scolarisés dans une école du niveau  $I$  grâce au mode de transport  $m$ ,  $fm$  représente le facteur de consommation attribué au mode de transport  $m$  (0,56 kWh/personne.km pour les voitures diesel, 0,60 kWh/p.km pour les voitures essence, 0,45 kWh/p.km pour le bus, 0,15 kWh/p.km pour le train et 0 pour le vélo et la marche à pied) et  $Til$  représente le nombre d'étudiants de l'entité  $i$  qui sont scolarisés dans une école de niveau  $I$ . L'indice de performance des déplacements scolaires s'exprime en kWh/ trajet.étudiant

$$(1) \quad IPE \text{ domicile-école } I (i) = (\sum m Dmil * fm) / Til$$

- En complément de cet indice de performance, les distances parcourues pour les déplacements scolaires et les parts modales sont aussi discutées.
- Les données proviennent de l'enquête socio-économique de 2001 et du recensement de la population au 1<sup>er</sup> mars 1991.
- Les secteurs statistiques avec moins de 10 répondants par niveau scolaire sont éliminés.
- Les étudiants sont distingués selon leur niveau scolaire : maternel et primaire (les données de l'enquête socio-économique 2001 ne concernent que les enfants âgés de plus de 5 ans, donc une partie de la population scolaire du maternel n'est pas considérée), secondaire et supérieur.
- L'échantillon final est composé de 183.617 étudiants (25,0%) des 734.000 étudiants résidant en Wallonie et scolarisés en Wallonie.
- Si un étudiant dispose d'une résidence principale et d'une résidence secondaire (kot), la résidence secondaire seule est prise en compte.
- Si un trajet est réalisé par deux (ou plus) modes de transport différents, seul le mode principal est considéré, selon la hiérarchie suivante basée sur la vitesse de déplacement : train, voiture, bus, vélo, à pied.
- Le nombre de jours scolaires par an est fixé à 180 sur base des calendriers académiques de la Fédération Wallonie-Bruxelles<sup>2</sup>.

<sup>2</sup> [www.enseignement.be](http://www.enseignement.be), consulté en janvier 2012.

La Section 2 de ce chapitre présente une analyse des données de l'enquête socio-économique de 2001 et du recensement de la population au 1<sup>er</sup> mars 1991 en ce qui concerne les distances parcourues et les parts modales pour les déplacements scolaires. Ces éléments sont mis en perspective avec des études de même type réalisées à l'étranger et avec les résultats des déplacements domicile-travail. La Section 3 présente les principaux résultats de l'application de l'indice de performance des déplacements scolaires à l'ensemble du territoire wallon, à l'échelle de l'ancienne commune. La Section 4 investigue l'impact de différents facteurs considérés indépendamment et conjointement. La Section 5 aborde la reproductibilité de l'approche, ses limitations et les perspectives de recherches futures. Enfin, la Section 6 dresse les conclusions principales, notamment en termes d'implications concrètes pour orienter les politiques locales.

## 2. Distances parcourues et parts modales

### 2.1. Etat des lieux (données ESE 2001)

Les Tableau VII-1 et Tableau VII-2 présentent les parts modales et les distances parcourues pour les déplacements scolaires et les déplacements domicile-travail, sur base des données de l'enquête socio-économique de 2001.

*Tableau VII-1 : Parts modales pour les déplacements scolaires, selon le niveau de scolarité, et parts modales pour les déplacements domicile-travail, données ESE 2001.*

	Marche à pied	Vélo	(A pied + vélo)	Moto	Voiture	Bus	Train
Maternelles et primaire	21,3%	2,4%	(23,7%)	0,0%	67,0%	9,0%	0,3%
Secondaire	12,0%	1,3%	(13,3%)	1,7%	37,0%	41,2%	6,8%
Supérieur	12,8%	0,8%	(13,6%)	0,7%	33,3%	36,2%	16,2%
Travail	5,4%	1,2%	(6,6%)	1,9%	80,2%	4,1%	7,2%

*Tableau VII-2 : Distances parcourues pour les déplacements scolaires, selon le niveau de scolarité, et distances parcourues pour les déplacements domicile-travail, données ESE 2001.*

	[0 – 5km[	[5km – 20km[	[20km – 50km[	> 50km	Distance moyenne
Maternelles et primaire	66,6%	28,6%	4,1%	0,8%	5,4km
Secondaire	31,1%	54,5%	12,6%	1,8%	10,7km
Supérieur	19,5%	35,7%	35,7%	9,1%	21,1km
Travail	25,7%	37,1%	24,8%	12,5%	24,0km

La distance moyenne d'un déplacement scolaire diffère fortement selon le niveau de scolarité considéré. Elle s'élève à 5,4 kilomètres, 10,7 kilomètres et 21,1 kilomètres pour les déplacements vers les établissements maternels et primaires, secondaires et supérieurs, respectivement. En comparaison, la distance moyenne d'un déplacement domicile-travail avait été évaluée à 24,0 kilomètres.

66,6% des déplacements scolaires vers les écoles maternelles et primaires font moins de 5 kilomètres. L'aire d'influence des écoles maternelles et primaires est généralement limitée dans l'espace, ce qui permet un recours non négligeable (23,7%) aux modes doux (marche à pied et vélo) en comparaison aux déplacements vers les écoles secondaires (13,3%) et les établissements supérieurs (hautes écoles et universités) (13,6%). La voiture individuelle reste toutefois le mode de transport le plus utilisé pour les déplacements vers les écoles primaires et maternelles. Ce type de déplacement se caractérise, en comparaison avec les autres types, par une très faible part modale des transports en commun (9,0% pour le bus et 0,3% pour le train). L'âge des enfants et les faibles distances à parcourir sont certainement deux des facteurs explicatifs de cette constatation. La marche à pied et le vélo représentent 63,7% des déplacements scolaires de moins d'un kilomètre<sup>3</sup>, avec une augmentation selon le niveau considéré (54,5% pour le maternel et le primaire, 76,2% pour le secondaire et 91,5% pour le supérieur). La marche à pied et le vélo ne représentent plus que 4,9% des déplacements scolaires de plus de 5 kilomètres (2,5% pour le maternel et le primaire, 6,5% pour le secondaire et 7,5% pour le supérieur).

La taille plus importante des écoles secondaires et supérieures et leur nombre plus réduit augmentent les distances à parcourir entre le domicile et l'école. La part des déplacements de courte distance (de 0 à 5 kilomètres) chute respectivement à 31,1% et 19,6% pour ces deux types d'établissements scolaires. En parallèle à la diminution significative des déplacements de courtes distances, la part de la voiture individuelle diminue également au profit des transports en commun. 41,2% des déplacements vers les écoles secondaires sont ainsi réalisés en bus. Les parts modales du bus et du train s'élèvent respectivement à 6,8% et 16,2% pour les déplacements vers les établissements d'enseignement secondaire et supérieur.

Alors que la distance moyenne pour les déplacements vers les établissements d'enseignement supérieur (21,2 kilomètres) est assez proche de la distance moyenne pour les déplacements domicile-travail (24 kilomètres), la répartition modale diffère fortement. On remarquera en particulier la faible part modale de la voiture pour les déplacements vers les établissements d'enseignement supérieur (33,3%), en comparaison avec les déplacements domicile-travail (80,2%).

De ces premières observations, il peut être mis en évidence que le choix d'un mode de transport est clairement corrélé à la distance à parcourir. Cet élément, mis en évidence

---

<sup>3</sup> Un trajet d'un kilomètre peut être réalisé en environ 15 minutes à pied ou en 5 minutes à vélo, selon les vitesses de déplacements standards (4 km/h pour le piéton et 12 km/h pour le cycliste) adoptées notamment dans « Les lignes de force pour la politique d'aménagement du territoire pour le 21ème siècle » du Ministère wallon de l'Aménagement du Territoire.

dans la plupart des études et recherches relatives à la mobilité des enfants, sera approfondi dans la suite de ce chapitre, sur base d'analyses de régression.

## 2.2. Tendances d'évolution

Une analyse comparative des données de l'enquête socio-économique de 2001 et du recensement de population au 1<sup>er</sup> mars 1991 met en évidence des changements importants dans les comportements de mobilité pour les déplacements scolaires. En 1991<sup>4</sup>, la marche à pied et le vélo représentaient 28,9% des déplacements scolaires, tous niveaux confondus. La part modale de la voiture s'élevait alors à 38,1%. En 2001, la part modale des modes doux a chuté à 17,0% tandis que la part modale de la voiture atteint 46,8%. Les navettes en train sont restées relativement stables entre les deux années de référence. La part modale du train représentait 6,4% des déplacements scolaires en 1991 et 6,1% en 2001. La part modale du bus a augmenté légèrement en passant de 26,5% en 1991 à 29,1% en 2001. La distance moyenne d'un déplacement scolaire est passée de 8,8 kilomètres à 9,7 kilomètres, durant la même période.

Ces évolutions ne sont pas spécifiques à la Wallonie. Des tendances similaires sont également observées dans d'autres régions et pays. Aux Etats-Unis, la part modale des modes doux a chuté de 48% en 1969 à 13% en 2009 (McDonald, 2012, McDonald et al., 2011). La marche à pied et le vélo représentaient 87% des déplacements de moins d'un mile (1.609 kilomètres) en 1969 et la part modale de la voiture n'atteignait, la même année, que 7% (McMillan, 2006). En 2001, 36% des déplacements scolaires de moins d'un mile (1.609 kilomètres) étaient réalisés en voiture tandis que la part modale des modes doux chutait à 55% (McDonald, 2005).

En Angleterre, les déplacements à pied et à vélo des étudiants de primaire ont également chuté en passant de 61% en 1992/1994 à 52% en 2002/2003 tandis que la part modale de la voiture augmentait de 30% à 40% (Departement for Transport, 2005). La même tendance a été mise en évidence en Australie où le déclin des modes doux pour les déplacements scolaires est particulièrement marqué. La part modale de la marche à pied s'élevait à 58% en 1971 et à seulement 26% en 2003. La part modale de la voiture passait, durant la même période, de 12% à 48% (Tranter and Sharpe, 2012, Van der Ploeg et al., 2008). Dans l'aire urbaine de Toronto (Canada), la marche à pied pour les déplacements scolaires chez les 11-13 ans et chez les 14-15 ans a chuté respectivement de 53% à 42,5% et de 38,6% à 30,7% (Buliung et al., 2009).

On remarquera, à l'étude de ces chiffres, que si la tendance à une réduction significative de l'usage des modes doux pour les déplacements scolaires est généralisée, les parts modales de la marche à pied et du vélo sont faibles en Wallonie. Cette observation pourrait être liée à la forte décentralisation des fonctions, en particulier des lieux de résidence, qui caractérise le territoire wallon, et qui, en augmentant les distances à parcourir, à tendance à diminuer l'usage potentiel de la marche à pied et du vélo.

---

<sup>4</sup> Les données du recensement de population au 1er mars 1991 ne permettent pas de distinguer le niveau de scolarité, ce qui limite la portée de l'évolution temporelle proposée.

### 3. Consommation d'énergie et structure du territoire

#### 3.1. Indice de performance et niveau de scolarité

L'indice de performance des déplacements scolaires présenté dans le Chapitre IV a été calculé et cartographié pour l'ensemble du territoire wallon à trois échelles complémentaires : la commune, l'ancienne commune et le secteur statistique. Les résultats sont ici présentés à l'échelle intermédiaire de l'ancienne commune qui permet à la fois une grande lisibilité des résultats (au contraire des cartes présentées à l'échelle du secteur statistique) et une précision suffisante (au contraire des cartes présentées à l'échelle de la commune qui « gomme » les spécificités locales).

La Figure VII-1 présente la cartographie de l'indice de performance des déplacements scolaires, tous niveaux confondus (maternel et primaire, secondaire, supérieur). Les deux agglomérations principales de la Wallonie, Liège et Charleroi (identifiées respectivement par les codes A1 et A2 sur la Figure VII-1) présentent les indices de performance pour les déplacements scolaires les plus faibles. D'autres villes et noyaux urbains localisés le long de l'ancien bassin industriel (de l'ouest à l'est, on peut identifier sur la Figure VII-1 Mouscron (B1), Tournai (B2), Mons (B3), Charleroi, Namur (B4), Huy (B5), Liège, Verviers (B6) et Eupen (B7)) présentent également des indices de performance pour les déplacements scolaires relativement faibles. Ces noyaux sont caractérisés par un environnement bâti dense combiné à une bonne mixité fonctionnelle et une desserte efficace en transport en commun.

Deux différences majeures peuvent être mises en évidence entre la cartographie de l'indice de performance des déplacements scolaires et celle relative aux déplacements domicile-travail (Figure VII-2). Les déplacements scolaires présentent des indices de performance, par trajet et par personne, nettement moins élevés que les déplacements domicile-travail, principalement en raison de distances parcourues plus faibles et de meilleures parts modales pour les modes doux, le bus et le train. L'indice de performance moyen pour les déplacements domicile-travail s'élève à 12,1 kWh par trajet et par travailleur alors que l'indice de performance moyen pour les déplacements scolaires n'atteint que 4,1 kWh par trajet et par personne. La seconde différence est relative aux liens entre structure du territoire et consommation d'énergie pour les déplacements qui peuvent être mis en évidence au départ d'une analyse qualitative des cartes proposées. Les phénomènes discutés, dans le Chapitre V, pour les déplacements domicile-travail sont moins évidents à identifier dans le cas des déplacements scolaires.

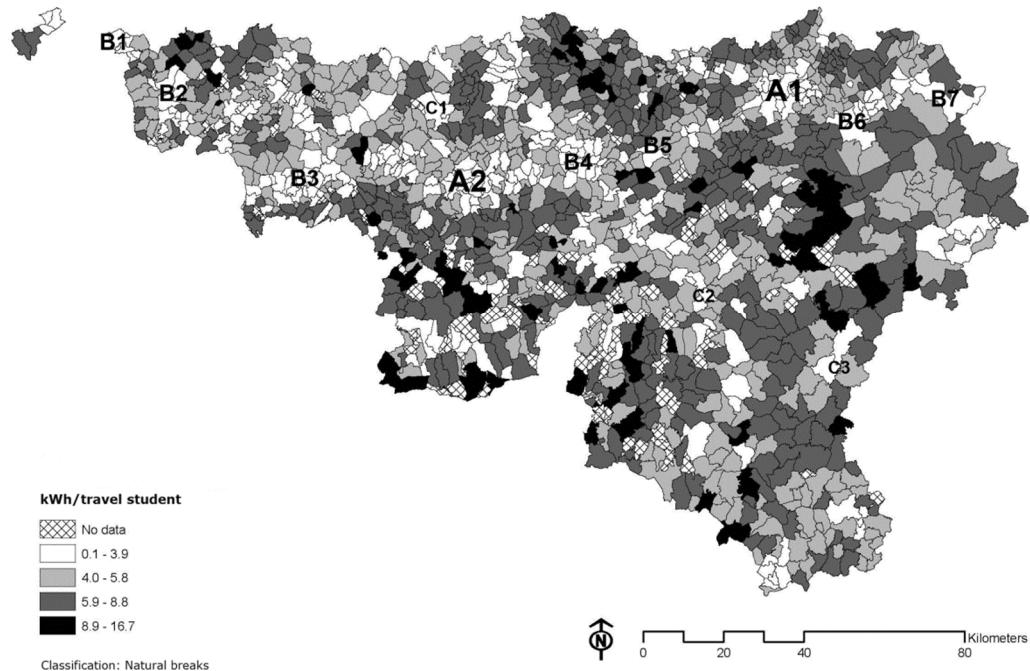


Figure VII-1 : Indice de performance des déplacements scolaires, tous niveaux confondus, à l'échelle de l'ancienne commune, données ESE 2001.

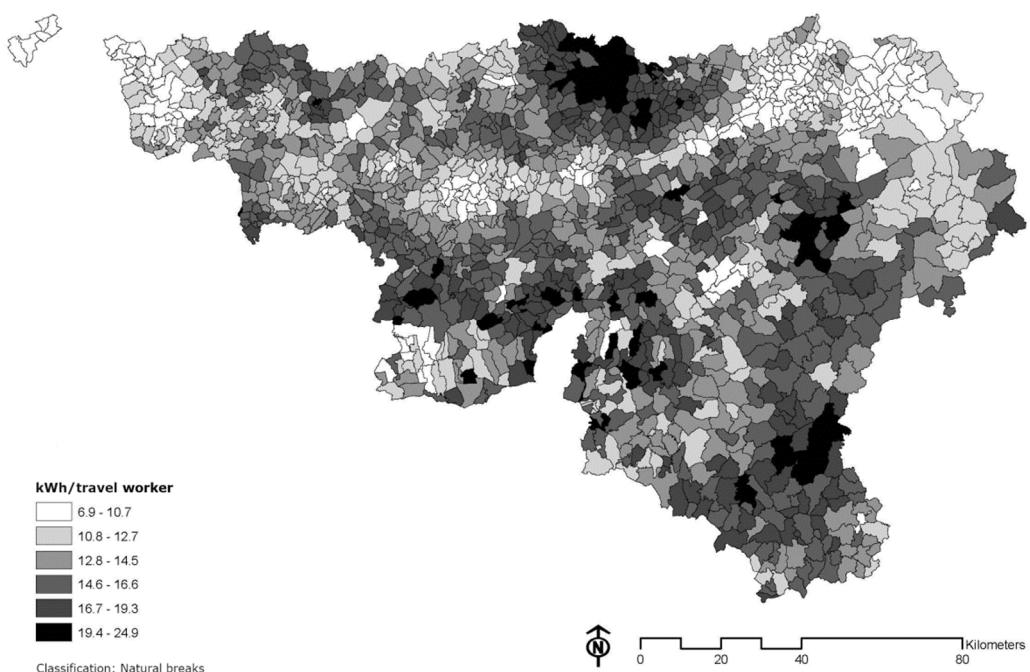


Figure VII-2 : Indice de performance des déplacements domicile-travail, à l'échelle de l'ancienne commune, données ESE 2001.

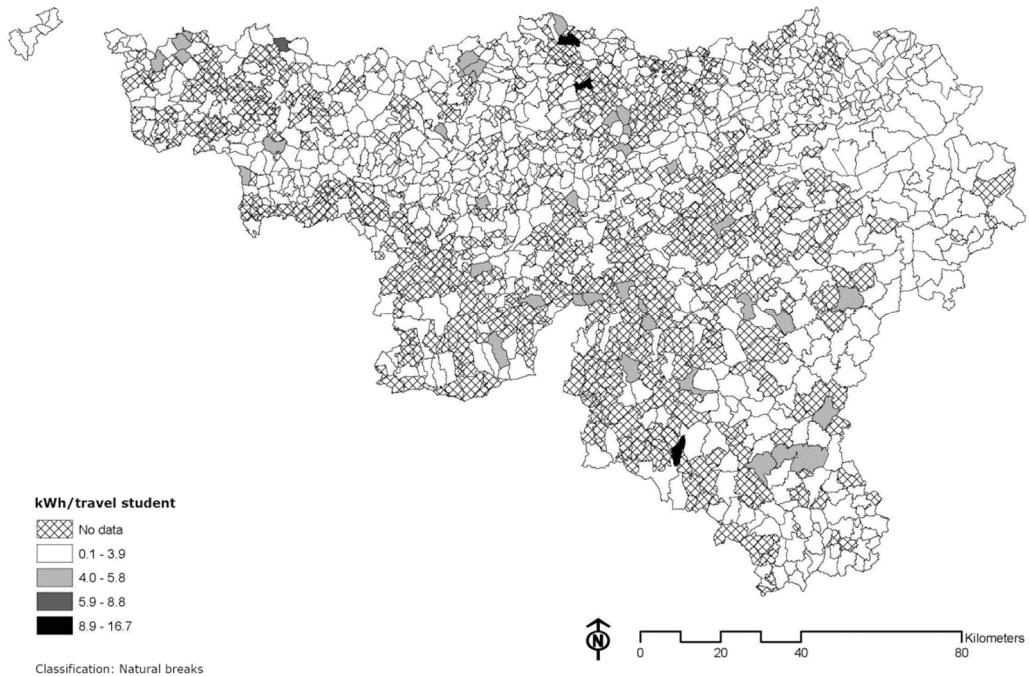


Figure VII-3 : Indice de performance des déplacements scolaires pour les niveaux d'enseignement maternel et primaire, à l'échelle de l'ancienne commune, données ESE 2001.

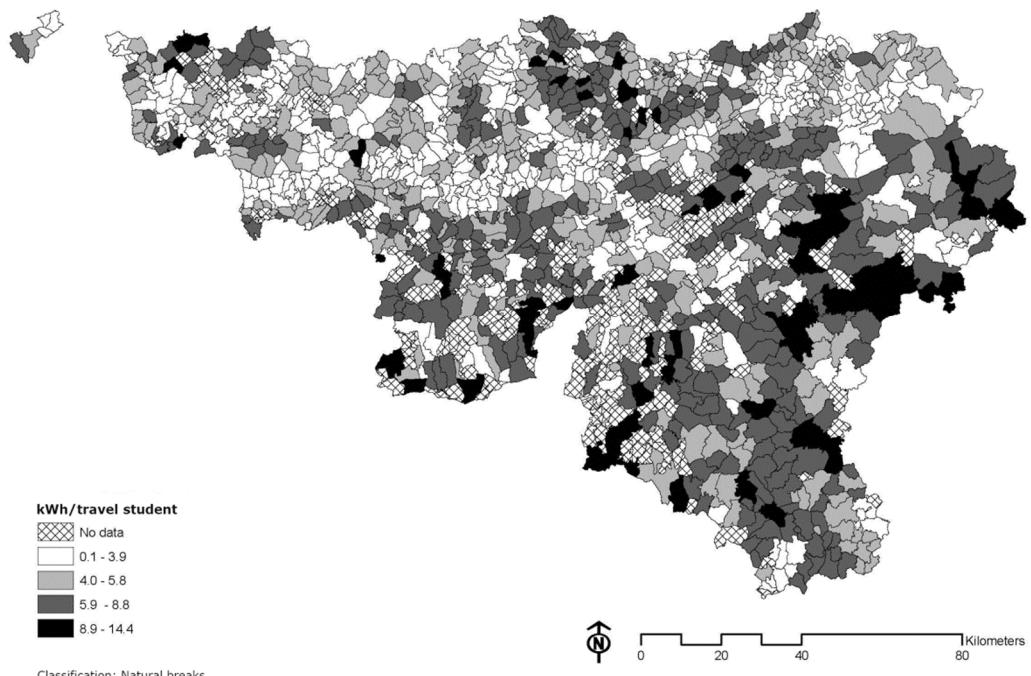


Figure VII-4 : Indice de performance des déplacements scolaires pour le niveau d'enseignement secondaire, à l'échelle de l'ancienne commune, données ESE 2001.

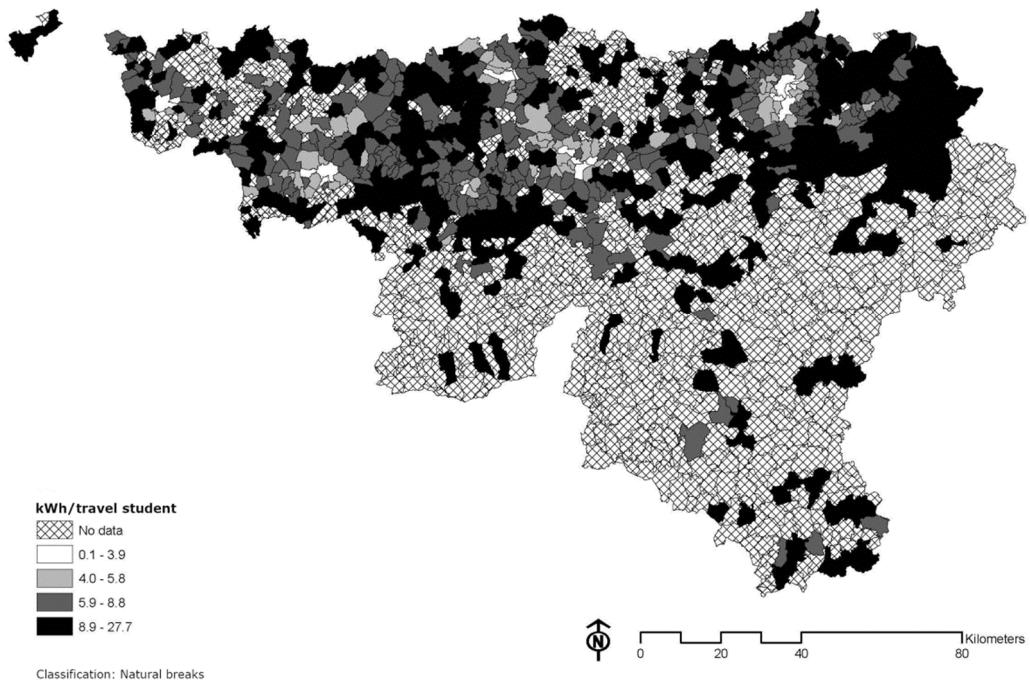


Figure VII-5 : Indice de performance des déplacements scolaires pour le niveau d'enseignement supérieur, à l'échelle de l'ancienne commune, données ESE 2001.

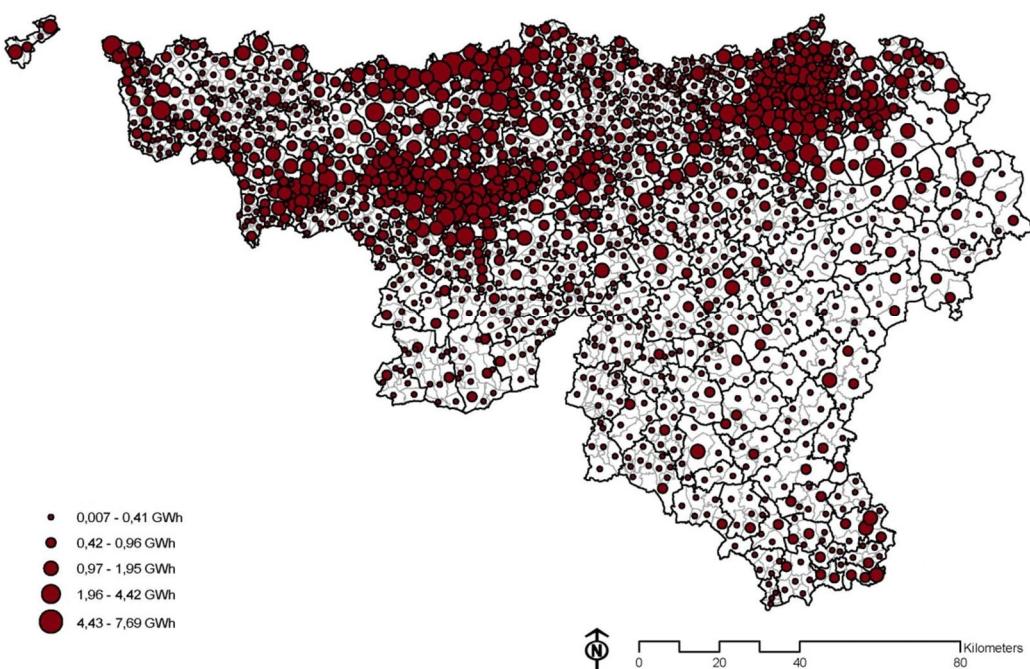


Figure VII-6 : Consommations annuelles pour les déplacements scolaires, tous niveaux confondus, à l'échelle de l'ancienne commune, données ESE 2001.

L'indice de performance des déplacements scolaires relatif à chaque niveau de scolarité a ensuite été calculé et cartographié pour tenter de préciser ces observations. Les Figure VII-3, Figure VII-4 et Figure VII-5 présentent respectivement les cartographies des indices de performance des déplacements scolaires pour le maternel et le primaire, pour le secondaire et pour le supérieur. La même échelle graphique est adoptée sur les trois cartes de façon à faciliter la comparaison. Les anciennes communes hachurées sur ces cartes sont celles pour lesquelles moins de 10 répondants ont été enregistrés pour le niveau de scolarité considéré.

L'indice de performance moyen des déplacements scolaires augmente avec le niveau de scolarité considéré, conformément à la tendance mise en évidence précédemment concernant les distances parcourues. La valeur moyenne de cet indicateur s'élève à 1,1 kWh par trajet et par personne pour les déplacements scolaires relatifs au maternel et au primaire, à 3,7 kWh par trajet et par personne pour le secondaire et à 6,8 kWh par trajet et par personne pour les déplacements vers les établissements d'enseignement supérieur.

L'indice de performance des déplacements scolaires pour les niveaux d'enseignement maternel et primaire est faible sur l'ensemble du territoire. Présenter la Figure VII-3 sur son échelle graphique propre ne permet pas d'identifier plus clairement des zones différencierées présentant un indice de performance particulier. L'analyse des Figure VII-4 et Figure VII-5 relatives aux niveaux d'enseignement secondaire et supérieur mettent en évidence une répartition spatiale de l'indice de performance plus différencierée. Pour l'enseignement secondaire, on retrouve des indices de performance faibles dans les noyaux denses situés le long de l'ancien bassin industriel, comme mis en évidence pour les déplacements domicile-travail, ainsi que dans des pôles secondaires comme Nivelles, Marche et Bastogne (identifiés par les codes C1, C2 et C3) sur la Figure VII-1. L'indice de performance des déplacements scolaires pour le secondaire a également tendance à augmenter dans trois zones particulières : le sud de Bruxelles, la zone de la Province de Luxembourg située dans l'orbite de Luxembourg-Ville et, dans une moindre mesure, la botte du Hainaut (au Sud de Charleroi et de Namur).

La distribution spatiale de l'indice de performance des déplacements scolaires pour le supérieur montre une configuration particulière. De nombreuses anciennes communes sont caractérisées par le faible nombre de répondants (pour rappel, dans le cas où un étudiant dispose à la fois d'une résidence principale et d'une résidence secondaire (kot), c'est la résidence secondaire qui est considérée dans les évaluations). En comparaison avec les niveaux de scolarité inférieurs, l'indice de performance présente des valeurs très élevées. Trois zones de répartition radioconcentrique de l'indice de performance des déplacements scolaires pour le supérieur sont identifiables respectivement autour des pôles d'enseignement de Liège, Louvain-La-Neuve et Mons. Ces pôles proposent une offre d'enseignement diversifiée et abondante à l'échelle régionale et attire des étudiants dans un large rayon. L'indice de performance des déplacements pour le supérieur est particulièrement élevé dans les cantons de l'est, en relation avec l'absence d'établissements d'enseignement supérieur dans cette zone et la relative proximité des villes de Verviers (23 kilomètres) et de Liège (40 kilomètres). Cette zone présentait, au

contraire, des valeurs de consommation très faibles pour les déplacements domicile-travail.

Comme pour les déplacements domicile-travail, les précédentes observations sont renversées si on étudie les consommations annuelles pour les déplacements scolaires (Figure VII-6). Les anciennes communes où les consommations annuelles sont les plus élevées sont les plus denses et peuplées, de par le volume de population qu'elles accueillent. L'augmentation des consommations annuelles entre 1991 (589 GWh) et 2001 (766 GWh) se chiffre, pour les déplacements scolaires, à 23,0%.

Afin de tenter d'expliquer la distribution spatiale particulière des indices de performance relatifs aux trois niveaux d'éducation considérés, la répartition géographique des établissements scolaires a été investiguée. La Wallonie compte 1.612 établissements primaires et maternels, 408 écoles secondaires et 140 écoles supérieures et universités<sup>5</sup>. Un ratio « capacité / demande » a été calculé pour les trois niveaux de scolarité, en divisant la capacité scolaire d'une commune ou d'une ancienne commune (nombre de places disponibles) par le nombre d'étudiants du niveau considéré, domiciliés dans la commune ou l'ancienne commune. Un ratio « capacité / demande » supérieur à un caractérise ainsi une commune, ou une ancienne commune, « attractive » dans le sens où elle attire plus d'étudiants que ceux habitants dans son territoire strict.

Les trois pages suivantes présentent le ratio « capacité / demande » pour les anciennes communes où il est supérieur à un (figures en haut des pages suivantes) puis une classification des 262 communes wallonnes selon la valeur du ratio « capacité / demande » (figures en bas des pages suivantes) respectivement pour l'enseignement maternel et primaire (Figure VII-7 et Figure VII-8), pour l'enseignement secondaire (Figure VII-9 et Figure VII-10) et pour l'enseignement supérieur (Figure VII-11 et Figure VII-12).

La Figure VII-7 montre que pour l'enseignement maternel et primaire le nombre de places disponibles dans une commune est toujours très proche du nombre d'enfants scolarisés dans des établissements maternels et primaires domiciliés dans la commune considérée, ce qui participe à limiter les besoins de mobilité. Le nombre d'établissements d'enseignement maternel et primaire est élevé et ces établissements sont répartis de façon relativement homogène sur l'ensemble du territoire wallon (Figure VII-6). Trente-neuf communes ne sont pas équipées d'établissements maternels et primaires et septante-sept communes ont un ratio « capacité / demande » légèrement supérieur à un pour l'enseignement maternel et primaire. Pour l'enseignement secondaire, seules quarante-sept communes présentent un ratio « capacité / demande » supérieur à un. Au contraire de l'enseignement primaire, la valeur de ce ratio augmente rapidement (Figure VII-9).

---

<sup>5</sup> Estimation réalisée sur base des données reçues aux requêtes postées sur le site [www.enseignement.be](http://www.enseignement.be). L'enseignement en Wallonie étant organisé par la Communauté Wallonie-Bruxelles (anciennement Communauté française) qui régit aussi les établissements de langue française implantés en Région Bruxelles-Capitale et la Communauté Germanophone (établissements de langue allemande situés dans les 9 communes germanophones de la Wallonie), seuls les établissements de la Communauté française localisés dans les cinq provinces de Wallonie ont été pris en compte. Les établissements régis par la Communauté germanophone y ont été ajoutés.

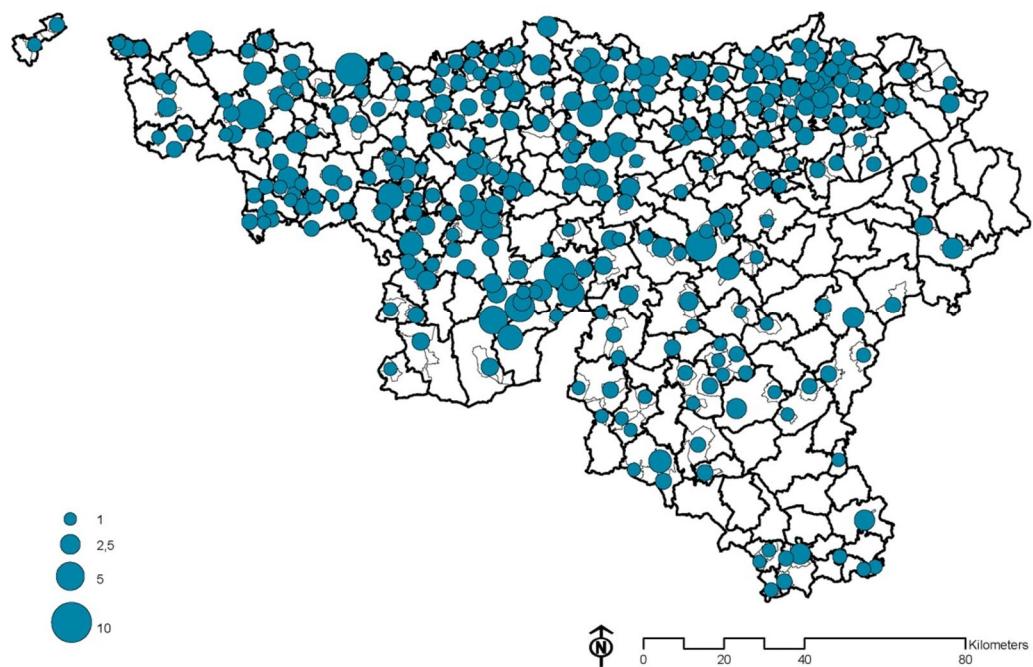


Figure VII-7 : Ratio « capacité / demande » pour les anciennes communes présentant un ratio supérieur à un pour l'enseignement maternel et primaire.

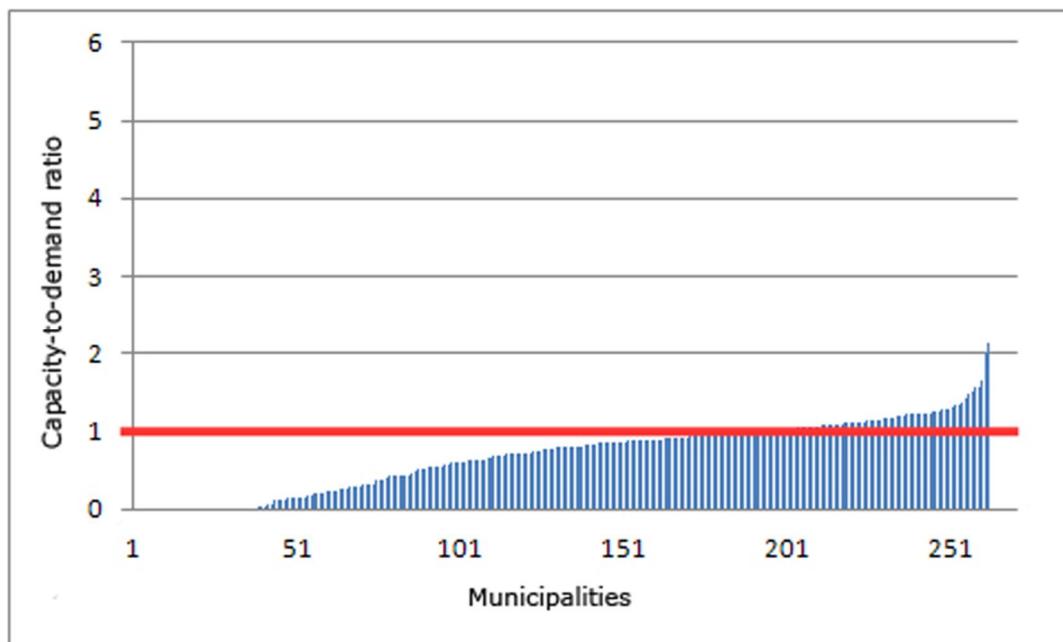


Figure VII-8 : Classification des 262 communes wallonnes selon la valeur du ratio « capacité / demande » pour l'enseignement maternel et primaire.

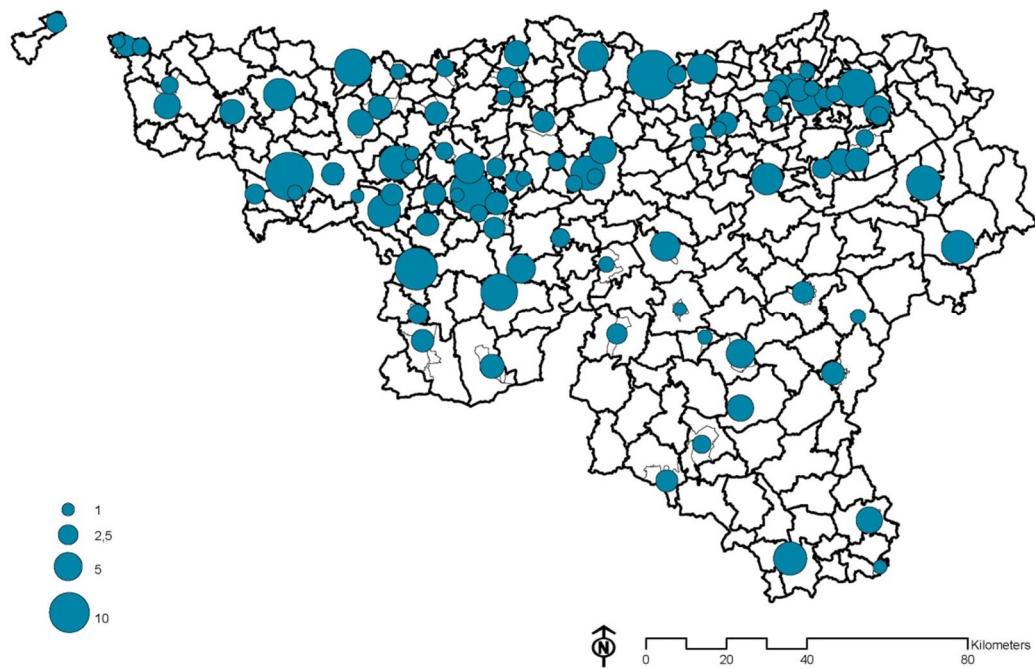


Figure VII-9 : Ratio « capacité / demande » pour les anciennes communes présentant un ratio supérieur à un pour l'enseignement secondaire.

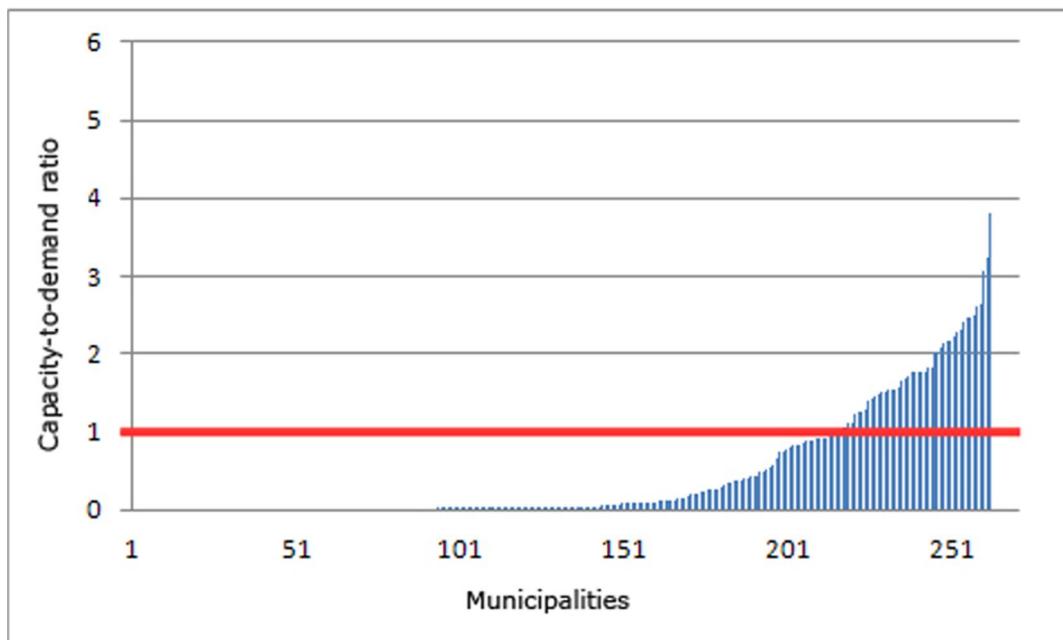


Figure VII-10 : Classification des 262 communes wallonnes selon la valeur du ratio « capacité / demande » pour l'enseignement secondaire.

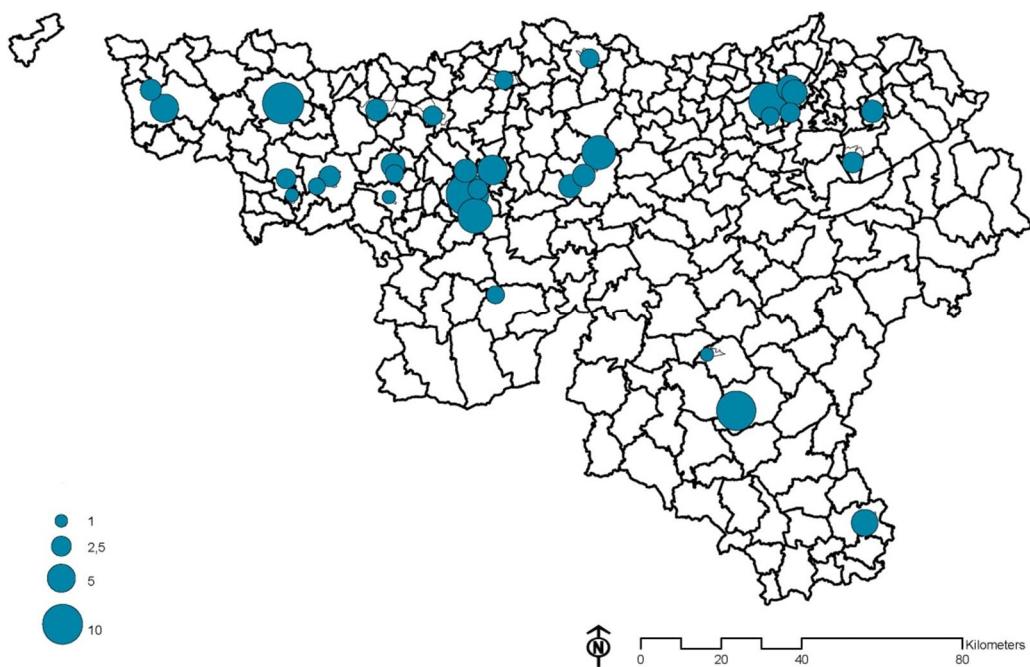


Figure VII-11 : Ratio « capacité / demande » pour les anciennes communes présentant un ratio supérieur à un pour l'enseignement supérieur.

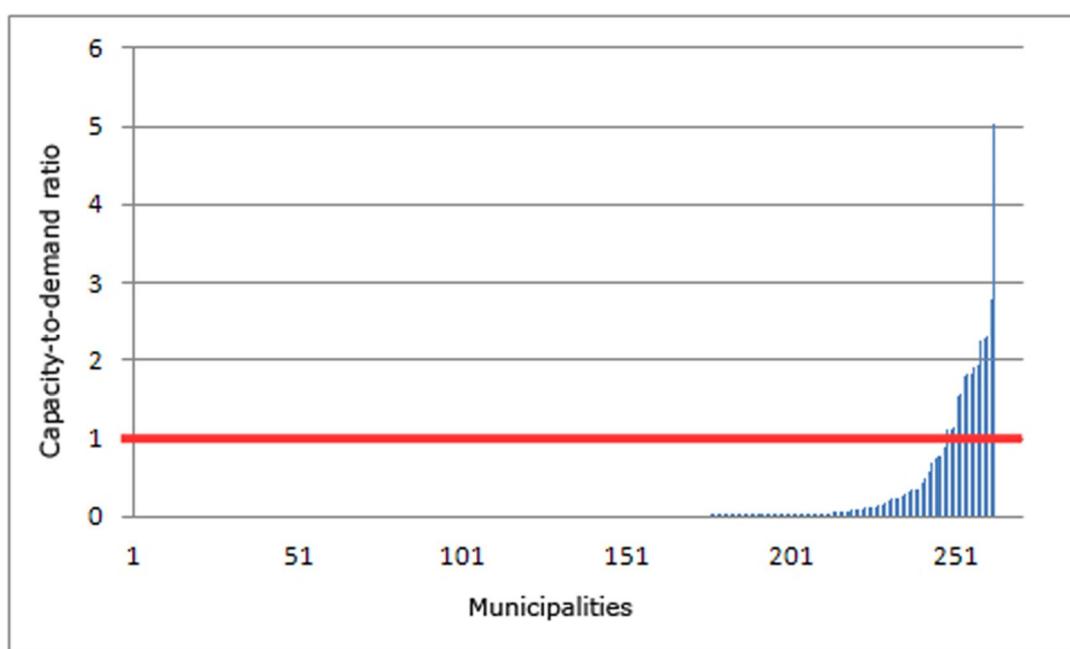


Figure VII-12 : Classification des 262 communes wallonnes selon la valeur du ratio « capacité / demande » pour l'enseignement supérieur.

En termes de répartition géographique, les établissements secondaires sont préférentiellement localisés dans les communes les plus denses et peuplées de la Wallonie, c'est-à-dire celles localisées le long de l'ancien bassin industriel mais aussi dans des pôles plus petits (Figure VII-10). Enfin, les communes présentant un ratio « capacité / demande » supérieur à un pour l'enseignement supérieur sont très peu nombreuses (Figure VII-12). Ces établissements, qui attirent donc un large volume de population scolaire, sont concentrés dans un nombre réduit de pôles (Figure VII-11). Les étudiants domiciliés dans des communes peu ou pas desservies sont contraints de parcourir des distances plus importantes que dans les cas des enseignements maternel, primaire et secondaire pour trouver une offre en matière d'enseignement supérieur.

### 3.2. Comparaison nationale

La répartition spatiale de l'indice de performance des déplacements scolaires a été cartographiée à l'échelle de l'ancienne commune, pour l'ensemble de la Belgique. Les Figure VII-13, Figure VII-14 et Figure VII-15 sont relatives aux déplacements scolaires vers, respectivement, les écoles maternelles et primaires, les écoles secondaires et les établissements d'enseignement supérieur. La tendance à l'augmentation de l'indice de performance avec le niveau de scolarité est confirmée tant pour la Flandre que pour Bruxelles (Tableau VII-3). Les indices de performance les plus faibles sont enregistrés en Flandre pour l'enseignement maternel et primaire et pour le secondaire. Pour l'enseignement supérieur, l'indice de performance moyen à Bruxelles est significativement plus faible que dans les deux autres régions.

La répartition spatiale de l'indice de performance des déplacements scolaires pour le maternel et le primaire semble plus homogène en Wallonie qu'en Flandre où des zones présentant des consommations plus faibles que d'autres peuvent être identifiées autour d'Antwerpen (D2), Leuven (D3), Brugge (D5) ou Kortrijk (D6). La zone située autour de la frontière linguistique présente, tant en Flandre qu'en Wallonie, des consommations plus élevées pour les déplacements vers les écoles maternelles et primaires.

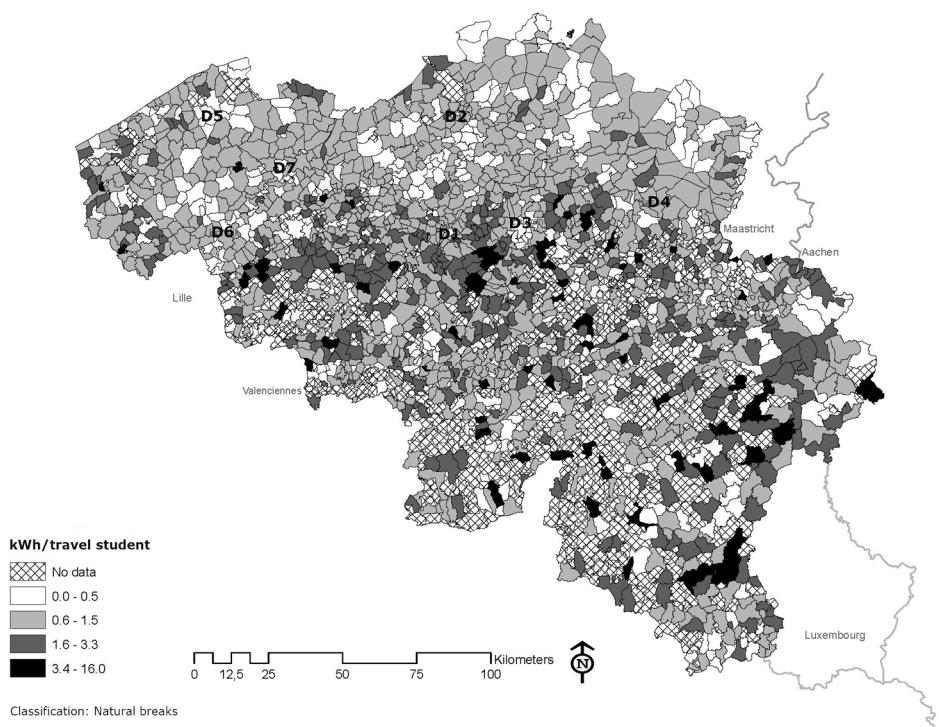
L'indice de performance des déplacements scolaires vers les établissements d'enseignement secondaire est faible en Flandre, en particulier dans et autour des villes principales (Antwerpen (D2), Leuven (D3), Hasselt (D4), Brugge (D5), Kortrijk (D6) et Gent (D7)) bien équipées en établissements scolaires secondaires. L'indice de performance est plus élevé dans deux régions : l'ouest de la Province de Flandre Orientale, à proximité de la France, et la zone résidentielle peu dense située entre Leuven et Hasselt.

Enfin, en ce qui concerne la répartition spatiale de l'indice de performance des déplacements scolaires vers les établissements d'enseignement supérieur, des effets auréolaires, tels que ceux mis en évidence autour de Liège et de Louvain-la-Neuve en Wallonie, peuvent être clairement identifiés autour des quatre pôles universitaires flamands (Leuven, Gent, Hasselt, et dans une moindre mesure Antwerpen). La région frontalière avec les Pays-Bas (nord-est du Limbourg et nord d'Antwerpen) se caractérise par des indices de performance très élevés. L'absence d'un nombre suffisant de répondants dans la partie ouest de la Flandre orientale (région frontalière avec la France)

s'explique par la faible densité de population dans cette zone et l'éloignement des pôles d'enseignement supérieur qui incite les étudiants à louer un logement dans une autre ville. Enfin, l'indice de performance pour les déplacements scolaires vers les établissements supérieurs est faible sur l'ensemble du territoire bruxellois.

*Tableau VII-3 : Comparaison des indices de performance moyens des déplacements scolaires en Wallonie, en Flandre, à Bruxelles et en Belgique, kWh/trajet.étudiant, données ESE 2001.*

	Wallonie	Bruxelles	Flandre	Belgique
Maternel/Primaire	1,1	1,0	0,8	0,9
Secondaire	3,7	2,4	2,3	2,7
Supérieur	6,8	4,2	5,8	5,9



*Figure VII-13 : Indice de performance des déplacements scolaires pour les niveaux d'enseignement maternel et primaire, à l'échelle de l'ancienne commune, données ESE 2001.*

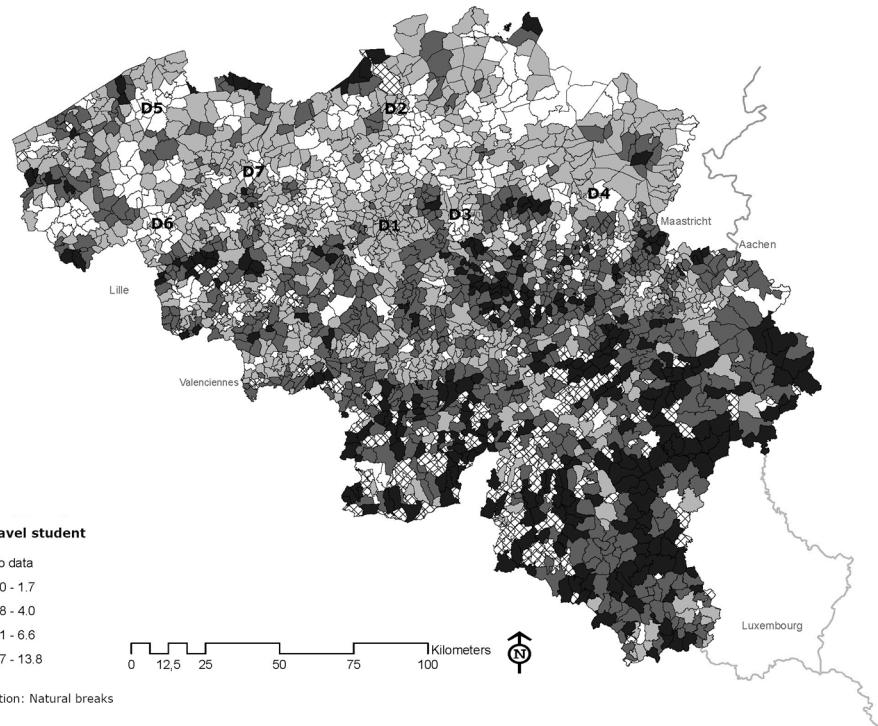


Figure VII-14 : Indice de performance des déplacements scolaires pour le niveau d'enseignement secondaire, à l'échelle de l'ancienne commune, données ESE 2001.

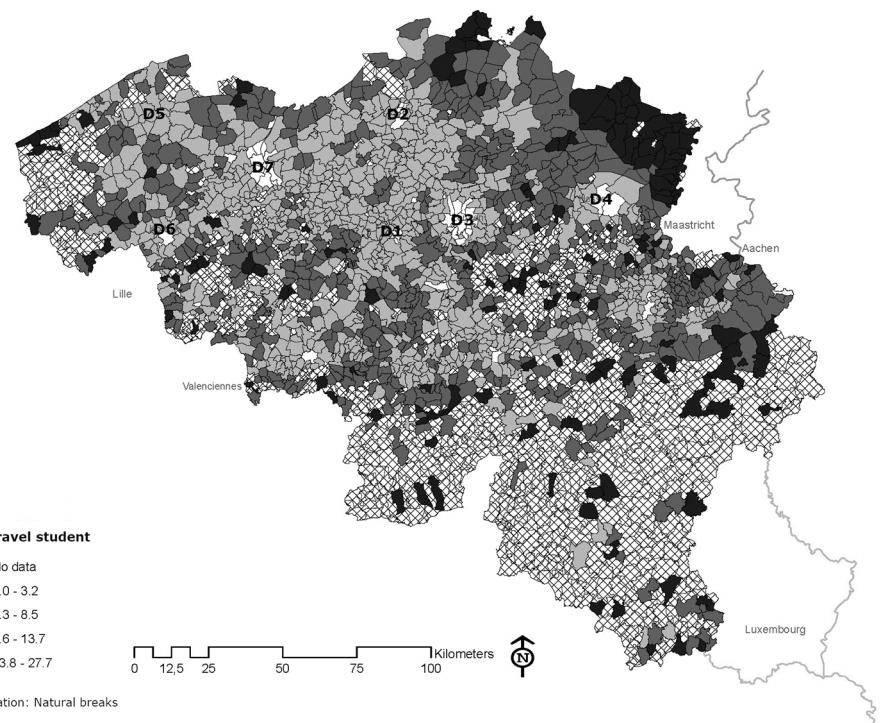


Figure VII- 15 : Indice de performance des déplacements scolaires pour le niveau d'enseignement supérieur, à l'échelle de l'ancienne commune, données ESE 2001.

## 4. Variables explicatives

Comme pour les déplacements domicile-travail, des analyses de régression linéaire multiple ont été réalisées de façon à clarifier certains des mécanismes qui sous-tendent les relations mises en évidence entre la structure du territoire wallon et les consommations d'énergie pour les déplacements scolaires. L'influence de caractéristiques locales (variables indépendantes,  $X_i$ ) a été investiguée pour expliquer la variation de l'indice de performance des déplacements scolaires (variable dépendante,  $Y$ ) pour les trois niveaux de scolarité considérés. Les variables indépendantes les plus efficaces pour expliquer les modèles ont été identifiées sur base des développements précédents et des observations qualitatives dressées lors de l'analyse des cartes de répartition de l'indice de performance des déplacements scolaires. Il s'agit de :

- La densité nette de population, obtenue grâce aux données de l'enquête socio-économique de 2001. C'est le type de densité qui permet d'obtenir les coefficients de régression ( $\beta$ ) et de détermination ( $R^2$ ) les plus élevés en comparaison avec les autres types de densité testés (la densité brute de population, la densité nette de logements et la densité brute de logements).
- La part des modes doux (marche à pied et vélo) pour les déplacements scolaires du niveau considéré. Cette donnée provient de l'enquête socio-économique de 2001.
- L'accessibilité scolaire est mesurée par le nombre de places disponibles dans les établissements du niveau considéré situés dans un rayon de cinq kilomètres autour du lieu de résidence.
- Le revenu des ménages provient de l'enquête socio-économique de 2001. Cette variable est soumise à plus de précaution dans le sens où il n'est pas certain que les ménages aient renseigné la totalité de leur revenu dans l'enquête. Cette variable de type socio-économique a quand même été préférée à deux autres variables testées (le niveau d'éducation des ménages (diplôme le plus élevé obtenu) et le nombre de voitures par ménage) qui n'ont pas été intégrées au modèle en raison de leur faible pouvoir explicatif.

Toutes les variables utilisées ont été soumises à une transformation logarithmique à cause de la déviation observée par rapport à une distribution normale. Le Tableau VII-4 présente les résultats des régressions linéaires multiples pour les trois niveaux de scolarité. Ces résultats confirment et valident les observations plus qualitatives réalisées lors de l'observation des cartes de distribution spatiale de l'indice de performance des déplacements scolaires (Figure VII-3, Figure VII-4 et Figure VII-5).

Les variables sélectionnées ont un effet significatif sur la variation de l'indice de performance des déplacements scolaires pour le secondaire et le supérieur. Dans le cas du secondaire, c'est la part modale des modes doux (marche à pied et vélo) qui a le pouvoir explicatif le plus important. Les écoles secondaires sont en effet relativement bien réparties sur le territoire et l'offre est homogène, ce qui limite les distances à parcourir et favorise le recours aux modes actifs, les étudiants du secondaire disposant de suffisamment d'autonomie (par rapport à ceux du primaire). Dans le cas de

l'enseignement supérieur, la plus grande part de la variabilité de l'indice de performance des déplacements scolaires est expliquée par la densité de population, ce type d'établissement étant préférentiellement localisé dans des centres urbains.

Tableau VII-4 : Résultats des régressions linéaires multiples pour les trois niveaux de scolarité.

	Maternelles et primaire	Secondaire	Supérieur
	$R^2 = 0,268^*$	$R^2 = 0,635^*$	$R^2 = 0,519^*$
	$\beta$	$\beta$	$\beta$
Constante	1,264*	1,500*	-0,534*
Densité de population (ln)	-0,152*	-0,347*	-0,668*
Parts des modes doux (ln)	-0,498*	-0,500*	-0,412*
Accessibilité scolaire (ln)	-0,008	-0,229*	-0,160*
Revenus (ln)	-0,074	-0,074	0,130*

\*  $p < 0,05$

Le modèle développé ne permet pas d'expliquer la variation de l'indice de performance des déplacements scolaires pour le maternel et le primaire ( $R^2 = 0,268$ ). Le facteur relatif à l'accessibilité scolaire, en particulier, est très faible, ce qui pourrait signifier que le rayon de cinq kilomètres autour du lieu de résidence n'est pas approprié dans le cas des déplacements scolaires vers des écoles maternelles et primaires. Toutefois, les données utilisées ne permettent pas de descendre sous ce seuil de cinq kilomètres. Les comportements de mobilité pour les déplacements scolaires vers les écoles maternelles et primaires dépendent ainsi certainement plus de considérations d'ordre socio-économique et d'arbitrages ou de choix personnels des ménages que de variables relatives à la structure du territoire. Enfin, on remarquera que la p-value du revenu des ménages est supérieure à 0,05 pour deux des trois modèles ( $p=0,37$  pour les maternelles et le primaire et  $p=0,06$  pour le secondaire).

## 5. Limitations et reproductibilité

Les relations entre structure du territoire wallon et consommations d'énergie pour les déplacements scolaires ont été étudiées. Ce champ de recherches est peu investigué dans la littérature existante qui traite, en majeure partie, de la diminution de la part modale des modes doux pour les déplacements scolaires, essentiellement dans les pays anglo-saxons. La question de la reproductibilité de l'approche développée est donc intéressante dans le

sens où il pourrait être utile de confronter les éléments mis en évidence pour la Wallonie avec d'autres territoires proches ou plus éloignés, au niveau géographique comme au niveau de la structuration de l'enseignement. Une application de l'indice de performance proposé à un territoire plus large (la France, par exemple) devrait mener aux mêmes types d'observations et renforcer les différences mises en évidence pour la Wallonie, dans le sens où les mêmes phénomènes de décentralisation / concentration des établissements maternels, primaires et secondaires d'une part et des établissements d'enseignement supérieur, d'autre part, coexistent à des échelles plus larges.

La question des chaînes de déplacements, qui tendent à devenir de plus en plus complexes, n'a pas été abordée dans le cadre du présent travail. Ce phénomène pourrait, dans une certaine mesure, expliquer la part modale relativement faible des modes doux et des transports en commun enregistrée en Wallonie, en comparaison avec d'autres contextes, particulièrement lorsque les parents conduisent les enfants à l'école et intègrent les déplacements scolaires dans les chaînes de déplacements plus larges. Bien que les données utilisées ici ne permettent pas cette analyse, les résultats des régressions multi-variées montrent que les déplacements vers les écoles maternelles et primaires seraient des candidats appropriés pour développer, sur base de cette thèse, de nouvelles recherches. Des analyses basées sur des enquêtes auprès d'un échantillon de taille suffisante pourraient, à cet effet, amener des compléments utiles à l'approche développée jusqu'à présent.

De plus, même si l'école est le motif principal de déplacements des enfants les jours scolaires, s'attacher à la mobilité des enfants, hors déplacements domicile-école, pourrait également faire l'objet de recherches futures de façon à proposer une compréhension plus approfondie des consommations d'énergie relatives à la mobilité des enfants.

Enfin, outre l'influence des variables relevant de la structure du territoire, d'autres dynamiques entrent également en jeu dans le choix d'un mode de transport pour les déplacements scolaires, qu'il s'agisse par exemple de la sécurité ou des aménagements proposés sur le chemin de l'école. Leur impact pourrait également être investigué sur base d'une approche plus qualitative basée sur des enquêtes ou des entretiens, à l'image par exemple des développements réalisés dans le cadre du programme américain Safe roads to schools (voir notamment McMillan et al. (2006)).

## 6. Conclusion et incidences pratiques

En conclusion, le développement d'un indice de performance des déplacements scolaires et son application à l'ensemble du territoire wallon, sur base des données de deux recensements nationaux (l'enquête socio-économique de 2001 et le recensement de population au 1<sup>er</sup> mars 1991) confirme que la structure du territoire (comprise ici comme la conjonction de trois éléments : (1) la localisation des écoles sur le territoire, (2) la répartition spatiale de la population selon le lieu de résidence et (3) les infrastructures et réseaux) influence les comportements en matière de mobilité scolaire et les consommations d'énergie pour ce type de déplacements.

Il a été mis en évidence que les comportements de mobilité (choix modaux, distances parcourues et donc consommations d'énergie) sont dépendants du niveau de scolarité considéré. La concentration des établissements d'enseignement supérieur dans quelques pôles spécifiques entraîne des consommations d'énergie accrues pour les déplacements à cause des distances parcourues plus importantes. La décentralisation des établissements maternels et primaires, et dans une moindre mesure des écoles secondaires, sur l'ensemble du territoire mène, au contraire, à des consommations d'énergie plus faibles et autorise un recours accru à la marche à pied et au vélo. L'usage de la voiture individuelle reste toutefois prédominant. Le niveau de scolarité est ainsi un facteur important qui doit être pris en considération. Pour comprendre les mécanismes et les logiques qui sous-tendent les déplacements scolaires et pour établir des stratégies efficaces visant à promouvoir la mobilité douce chez les enfants, il semble, en conclusion, nécessaire de distinguer deux éléments : (1) le type de milieu/quartier dans lequel on intervient et (2) le type d'école ou niveau scolaire considéré car ces deux variables mènent à des comportements de mobilité différents.

Ces résultats fournissent ainsi une meilleure compréhension des comportements de mobilité pour les déplacements scolaires et pourraient informer le développement de politiques ou stratégies concrètes visant à promouvoir la mobilité durable, sûre et active des enfants et des étudiants.

A l'échelle régionale, la localisation spatiale des écoles devrait être étudiée à l'échelle des bassins de scolarité (concentration décentralisée par bassin, en particulier dans le sud de la Wallonie) et en complémentarité avec les politiques de transport, notamment celles relatives aux transports en commun, pour favoriser, d'une part, les courtes distances et, d'autre part, un meilleur usage des transports en commun pour les niveaux d'enseignement secondaire et supérieur. La localisation des établissements à proximité immédiate des gares, en particulier, est une stratégie à favoriser. La question du maintien d'un maillage fin en termes d'écoles maternelles et primaires permet certes des distances très courtes mais constitue un enjeu politique important, notamment de par les coûts générés pour la collectivité. On peut également s'interroger sur le rôle qu'un maillage fin peut jouer sur la périurbanisation des ménages.

A l'échelle locale, des politiques visant à encourager les modes doux pourraient être implémentées car les déplacements de courte distance entre le domicile et l'école sont nombreux, en particulier pour le maternel et le primaire et dans une moindre mesure pour le secondaire. Ces politiques devraient traiter d'aspects plus qualitatifs comme la qualité des espaces publics, la sécurité (routière et des personnes) ou l'organisation de ramassage scolaire sous la responsabilité d'un adulte. Finalement, la localisation des nouveaux quartiers résidentiels doit prendre en compte l'offre existante en matière scolaire et en termes de transports en commun. Pour promouvoir un renouvellement périurbain durable et surtout moins dépendant de la mobilité individuelle en voiture, la localisation de nouveaux habitants dans des noyaux d'habitat mixtes et déjà bien desservis en transports en commun semble indispensable.

# Chapitre VIII

## Conclusions et Perspectives

### 1. Synthèse des principaux résultats de la thèse

L'étalement urbain monofonctionnel et peu dense, au-delà des limites de la ville traditionnelle, est un phénomène majeur de l'évolution de nos territoires. L'étalement urbain, et les quartiers résidentiels peu denses qui le matérialisent, posent une série de problèmes tant environnementaux et économiques que sociaux. Partant des hypothèses que la crise énergétique est un élément déclencheur pour interroger la transition des espaces périurbains vers un modèle plus durable, que les modèles de la ville compacte et de la ville diffuse ne peuvent répondre aux enjeux environnementaux, économiques et sociaux rencontrés et que l'aménagement du territoire est un levier puissant d'action tant en termes de gestion de la forme urbaine produite que de la mobilité induite, la thèse a abordé les questions de l'évaluation énergétique des quartiers périurbains wallons existants et de leur renouvellement sous l'angle énergétique.

#### 1.1. Développement d'une instrumentation

La première étape de la recherche a consisté à proposer et cartographier une définition opérationnelle de l'étalement urbain qui soit adaptée à des études de type morphologique et qui permette d'identifier les configurations typologiques périurbaines les plus représentatives. Il a ensuite s'agit de mettre en place une instrumentation solide permettant l'évaluation énergétique des quartiers périurbains et, sur cette base, d'étudier la durabilité des quartiers périurbains wallons existants et les conditions de leur transition vers un modèle plus durable. Deux leviers ont été mobilisés dans le cadre de cette intervention : la forme périurbaine et la mobilité. La forme périurbaine, d'abord, a été étudiée en complémentarité de l'échelle du bâtiment individuel car les mesures apportées à l'échelle du bâtiment ne sont pas en mesure de répondre, seules, à l'ampleur des enjeux énergétiques qui touchent les territoires périurbains. La mobilité, ensuite, car l'étalement urbain est entretenu et favorisé en grande partie par la capacité des ménages à se déplacer facilement, individuellement et loin. Cette instrumentation repose sur deux indicateurs principaux qui ont été développés et discutés : les besoins de chauffage de différents types

de formes périurbaines et un indice de performance des déplacements domicile-travail et des déplacements scolaires qui prend en compte distance parcourue, fréquence de déplacement et mode de transport. La méthode développée a été mobilisée, hors du cadre de la thèse, pour produire un outil interactif d'évaluation énergétique des quartiers périurbains qui prenne en compte à la fois les consommations de chauffage des bâtiments et les déplacements des habitants. Cet outil, réalisé en collaboration avec l'équipe de recherches Architecture et climat de l'Université catholique de Louvain en ce qui concerne la base de données « bâtiments » est disponible en ligne ([www.safe-energie.be](http://www.safe-energie.be)) et met ainsi à disposition de tous les acteurs du territoire, en particulier des citoyens, les principaux résultats d'une recherche scientifique de trois ans.

## **1.2. Investigation des liens entre structure du territoire et consommations d'énergie**

La méthode d'évaluation énergétique des quartiers périurbains a ensuite été utilisée, dans la thèse, pour identifier les paramètres et les scénarios de renouvellement périurbain les plus efficaces pour améliorer l'efficacité énergétique des quartiers existants. Cette analyse a consisté à quantifier concrètement les consommations d'énergie relatives aux bâtiments, à l'échelle des quartiers, et celles relatives aux déplacements des personnes grâce à l'instrumentation mise en place. Des variations paramétriques ont été réalisées sur quatre quartiers périurbains représentatifs et sur trois quartiers-fictifs. Ces applications ont montré l'applicabilité et l'intérêt de la méthode proposée. Nous avons mis en évidence l'importance de l'isolation, des facteurs de mitoyenneté et de compacité ainsi que de la localisation des quartiers au sens large. Sur cette base, des scénarios de renouvellement des tissus périurbains ont été proposés et leur impact énergétique potentiel quantifié. Ces scénarios ont démontré l'intérêt, en termes d'efficacité énergétique, de la rénovation énergétique à l'échelle des quartiers, de la densification des quartiers existants et de la démolition / reconstruction. Si ce dernier type de stratégie a mis en évidence l'importance de la forme urbaine lors de la reconstruction, la démolition à grande échelle reste difficilement envisageable. Au contraire, la densification des quartiers existants est une piste de renouvellement pertinente. Les quartiers périurbains, même densifiés, bénéficient en particulier de deux atouts qui devraient être exploités : l'isolation des parois des bâtiments existants peut être réalisée de façon relativement simple (par remplissage de la coulisse ou par l'extérieur pour les murs, par exemple) et le potentiel solaire est important car les masques et obstructions restent très limités.

L'influence de la structure du territoire (comprise ici comme la conjonction de trois éléments : (1) la localisation des services, emplois, commerces, etc., (2) la distribution spatiale de la population selon son lieu de résidence et (3) les infrastructures) sur les déplacements domicile-travail et sur les déplacements scolaires a ensuite été investiguée pour l'ensemble du territoire wallon, grâce à la généralisation et à la cartographie des indices de performance des déplacements. Nous avons montré que la génération de mobilité était fortement liée à la localisation spatiale des lieux émetteurs et récepteurs de flux (résidence, emploi, écoles). La mixité fonctionnelle en particulier permet, mieux que la densité de logements, d'expliquer la variation des consommations d'énergie pour les

déplacements. Cet exercice a permis d'identifier, hors des agglomérations principales, des noyaux secondaires qui présentent également des consommations énergétiques plus faibles pour les déplacements domicile-travail. Ces zones témoignent d'un phénomène que nous avons appelé « recomposition territoriale » par lequel la relocalisation locale d'emplois à proximité de lieux de résidences suffisamment denses permet de réduire les distances parcourues entre le domicile et le lieu de travail, et ainsi de réduire les consommations d'énergie qui y sont relatives. L'analyse des cartes de consommations énergétiques relatives aux déplacements domicile-travail et aux déplacements scolaires vers les écoles secondaires renvoie ainsi à la notion d'un « territoire polycentrique » caractérisé par un rapprochement des lieux d'origine et de destination des déplacements à l'échelle de bassins de vie. Il serait ainsi plus favorable aux déplacements de courte distance que l'étalement urbain monofonctionnel ou même que le modèle de la ville compacte dans laquelle restent concentrés les emplois alors que les populations s'en éloignent. Ces résultats mettent en évidence la complexité de la problématique de l'aménagement territorial durable et modèrent la pertinence, voire l'inadéquation, de politiques unilatéralement fondées sur l'idée de la ville compacte. Nous avons également mis en évidence une augmentation généralisée et significative des consommations d'énergie, tant pour les déplacements domicile-travail que pour les déplacements scolaires, entre les deux années de référence traitées (1991 et 2001) même si, depuis le sommet de la terre de Rio en 1992, les considérations énergétiques sont largement médiatisées auprès du grand public et ont percolé dans de nombreux documents d'orientation qui se revendiquent du développement durable.

Un autre résultat important montre que, pour les déplacements domicile-travail, la distance parcourue entre l'origine et la destination, et donc la mixité des quartiers qui favorise des distances plus réduites entre les activités, est le paramètre qui impacte le plus les consommations d'énergie relatives à ce type de déplacements. Au contraire, le mode de transport utilisé n'a qu'une influence relativement faible compte tenu de la relation qui existe entre distance parcourue et mode de transport pour les déplacements domicile-travail. Cette relation n'est plus directe pour les déplacements scolaires car les transports en commun sont également utilisés pour parcourir de plus faibles distances. D'une façon générale, les déplacements scolaires sont nettement moins consommateurs que les déplacements domicile-travail grâce à des distances parcourues plus faibles et un meilleur recours aux modes actifs (marche à pied et vélo) et aux transports en commun (bus pour le secondaire et le train pour le supérieur). Enfin, il convient de distinguer les comportements de mobilité selon le niveau de scolarité (maternel et primaire, secondaire ou supérieur) car chacun possède des spécificités propres. Il a été mis en évidence que la concentration des établissements d'enseignement supérieur dans quelques pôles spécifiques entraîne des consommations d'énergie accrues pour les déplacements à cause des distances parcourues plus importantes. La décentralisation des établissements maternels et primaires, et dans une moindre mesure des écoles secondaires, sur l'ensemble du territoire mène, au contraire, à des consommations d'énergie plus faibles et autorise un recours accru à la marche à pied et au vélo. L'usage de la voiture individuelle reste toutefois largement prédominant, même pour les déplacements de courte distance.

## 2. Le renouvellement périurbain, un concept à opérationnaliser

Les interventions concrètes dans les quartiers périurbains (les interventions à l'échelle du quartier de façon générale) sont, à ce jour, inexistantes en Wallonie, à l'exception de quelques opérations de rénovation énergétique de cités sociales dont les propriétés foncière et immobilière sont publiques. Le concept de « renouvellement périurbain » que nous avons défini, en introduction de la thèse, comme l'évolution et la mutation des quartiers périurbains existants vers un modèle plus économique en énergie, de façon à réduire leur vulnérabilité dans l'optique d'une crise énergétique majeure et leur dépendance aux énergies fossiles reste à opérationnaliser en Wallonie.

Les développements théoriques de la thèse et les principaux résultats synthétisés dans la section qui précède participent à une meilleure connaissance des quartiers périurbains wallons, appréhendés sous l'angle des consommations d'énergie des bâtiments et des déplacements, et des liens entre structure du territoire et énergie. Sur cette base, diverses pistes plus pragmatiques peuvent être esquissées en vue de favoriser l'opérationnalisation de ce concept de « renouvellement périurbain ». Il convient de garder à l'esprit deux contraintes fortes majeures : la grande inertie du stock bâti existant, particulièrement en ce qui concerne les possibilités de mutation des quartiers les plus mal localisés, et la difficulté d'évolution des cadres réglementaires et juridiques existants. Dans la même veine, le succès du modèle périurbain peu dense renvoie également à l'inadéquation entre le cadre urbain existant et les attentes d'une partie de la population. Prôner la ville dense comme seule et unique solution d'évolution de nos territoires n'est ni réalisable ni souhaitable, si on part du principe que tout citoyen a la liberté de choisir son cadre de vie. Nous pensons donc, en dehors de toute idéologie intellectuelle, qu'un renouvellement périurbain durable ne peut être rencontré que si les attentes des habitants qui ont choisi ce modèle d'habitat, l'attachement des ménages à la maison individuelle et la valeur accordée à l'accession à la propriété sont pris en considération. En d'autres termes, il convient de trouver un point d'équilibre entre la volonté individuelle de bénéficier d'un environnement peu dense, l'intérêt collectif qui impose de minimiser notre impact environnemental, tant en termes de consommations d'énergie que de ressources, et les coûts économiques et sociaux à charge de la collectivité.

A cet effet, contraindre les nouveaux développements<sup>1</sup> dans les zones déjà urbanisées et bien localisées<sup>2</sup>, que ce soit par comblement des dents creuses, construction en fond de parcelles, en intérieur d'îlot ou à front de voiries, tout en respectant les gabarits existants et des seuils de densité « moyens », offre un potentiel important d'évolution des quartiers périurbains. Le gisement foncier potentiellement mobilisable dans les quartiers existants

---

<sup>1</sup> Un des objectifs définis dans le cadre de l'actualisation du SDER concerne la nécessité de produire quelques 350.000 logements à l'horizon 2040, dont 280.000 seront localisés dans des « territoires centraux » qui ne sont pas encore définis mais qui devraient comprendre des quartiers périurbains identifiés dans notre classification.

<sup>2</sup> Faible indice de performance des déplacements et/ou fort potentiel d'évolution notamment par le développement d'un transport public structurant ou la présence d'un ensemble suffisant de commerces, services et équipements dans un périmètre qui permet l'utilisation du vélo ou de la marche à pied.

est considérable et on peut raisonnablement envisager que revenir, par ce biais, à des parcelles individuelles de 500 à 600m<sup>2</sup> (soit environ 50% de la moyenne actuelle) devrait permettre de rencontrer les objectifs précédemment établis. Le « périurbain » conserverait ainsi ses « atouts » (faible densité, environnement vert, etc.) mais son impact énergétique serait minimisé.

Deux voies pourraient être envisagées dans ce sens : la « filière individuelle » et la « filière publique ». La « filière individuelle » consiste à laisser aux propriétaires la liberté de diviser leur parcelle et/ou leur habitation pour y développer un ou des nouveaux logements. C'est la filière investiguée, en Ile-de-France, dans le cadre du projet BIMBY (Built in My Back Yard). Cette filière impose une adaptation du cadre réglementaire existant de façon à favoriser ces opérations ponctuelles, à les coordonner au sein d'un même quartier et à s'assurer de l'adéquation des nouvelles formes produites en termes d'isolation, de compacité et de mitoyenneté. Favoriser ce mode d'action impose également de pouvoir le refuser dans les cas où la densification n'est pas souhaitable, notamment si la localisation du quartier impose une dépendance importante à la voiture individuelle. La seconde voie, la « filière publique », impose une attitude plus proactive des pouvoirs publics et une évolution des modes de production du cadre bâti et de ses acteurs. Elle pourrait être mobilisée là où le gisement foncier est important. Nous pensons en particulier aux intérieurs d'îlots de superficie suffisante pour y développer un fragment de quartier homogène. Contrairement à la « filière individuelle », ces terrains à fort potentiel devraient respecter des critères plus stricts en termes de densité et de compacité des formes produites. Le développement de ces zones peut également être favorable aux quartiers périurbains qui les bordent si des services, emplois, commerces et équipements complémentaires à l'offre existante y sont développés. Mener des politiques publiques qui favorisent cette recomposition, spontanée ou orientée, de pôles plurifonctionnels qui, comme nous l'avons montré, permettent de diminuer localement les consommations d'énergie relatives aux déplacements, est assurément une ligne directrice forte à privilégier, en complémentarité avec des politiques visant la revitalisation des centres-villes. Cela pourrait également participer à repenser l'organisation d'une desserte en transports en commun plus efficace (une densité minimale de 50 logements à l'hectare est nécessaire pour envisager l'ouverture d'un arrêt) et l'approvisionnement énergétique par des systèmes collectifs.

La rénovation énergétique des logements est également une piste d'action à privilégier, idéalement à l'échelle des quartiers. Relativement facile à implémenter dans les bâtiments périurbains en théorie, l'isolation des parois, pourtant largement médiatisée et encouragée via des primes individuelles, reste toutefois peu pratiquée en pratique, en particulier par les ménages les plus précarisés. Le faible taux de pénétration de ces politiques d'isolation individuelle plaide en la faveur de politiques réfléchies et financées à une échelle plus large. La faisabilité de ces actions, hors initiatives citoyennes de type « achats groupés », reste aussi problématique.

Enfin, en matière d'aménagement du territoire et de mobilité, une application pratique de nos résultats de recherche pourrait se traduire par les lignes directrices suivantes. A

l'échelle régionale, il conviendrait de travailler par bassins de vie et d'organiser les politiques de transport en commun à cette échelle, de promouvoir une concentration décentralisée des établissements d'enseignement supérieur et des lieux d'emplois, notamment dans le sud de la Wallonie. En ce qui concerne les établissements primaires, le maintien du maillage fin actuel pose question. Il permet de maintenir des consommations réduites localement mais alimente aussi la périurbanisation des ménages. Cette déconcentration a aussi un coût public important qu'il convient de prendre en compte. A l'échelle urbaine, un des enjeux majeurs est de favoriser les modes actifs pour les courtes distances via l'aménagement des espaces publics et des cheminements, la sécurité routière et la sécurité des personnes, l'organisation de systèmes de ramassage scolaire, etc. Favoriser la concentration des populations, en particulier les nouveaux ménages, dans des noyaux d'habitats mixtes et localiser les lieux d'emplois et les écoles supérieures à proximité des gares œuvrent aussi à diminuer les déplacements individuels motorisés.

En conclusion, outre l'efficacité énergétique des bâtiments et des quartiers, c'est surtout l'efficacité énergétique de l'urbanisation qui semble primordiale. L'aménagement du territoire doit créer des conditions favorables pour orienter les activités et les investissements au bon endroit et pour favoriser des formes urbaines plus efficaces, notamment en termes de densité et de mitoyenneté, de façon à minimiser leur impact énergétique. Enfin, rappelons que l'urbanisme reste intrinsèquement lié aux caractéristiques propres de chaque projet, de chaque quartier et que les lignes directrices qui peuvent être tirées de la thèse doivent, au cas par cas, faire l'objet d'arbitrages pour les adapter au mieux aux réalités du terrain, en particulier en ce qui concerne l'implantation de nouveaux logements ou de nouvelles fonctions dans les quartiers existants ou la production de nouveaux quartiers.

### **3. Perspectives de recherches futures**

Comme tout travail scientifique, notre recherche connaît assurément un certain nombre de limites. Les résultats proposés doivent ainsi toujours être étudiés en lien avec les hypothèses qui ont été posées en introduction de la thèse pour circonscrire l'objet de la recherche dans des bornes bien identifiées. La recherche a participé à produire une meilleure connaissance des liens entre structure du territoire périurbain et consommations d'énergie pour le chauffage des quartiers et le déplacement des personnes (déplacements domicile-travail et déplacements scolaires). Elle ouvre la voie à de nombreux approfondissements et perspectives de recherches futures visant, en particulier, à (1) reproduire l'analyse menée dans le cadre de la thèse à d'autres territoires, d'autres types de quartiers et de déplacements, à (2) mettre en place de nouvelles méthodes de récolte de données relatives à la mobilité des ménages à grande échelle et pour différents modes de transport, à (3) étudier et approfondir les mécanismes qui soutiennent un meilleur recours aux modes de transport actifs (marche à pied et vélo), en particulier en ce qui concerne la mobilité des enfants et enfin à (4) développer des outils d'analyse des impacts

environnementaux, économiques et sociaux de scénarios de démolition / reconstruction menés à l'échelle des quartiers.

### **3.1. La reproduction des analyses**

La thèse a montré l'intérêt de travailler à la fois sur les consommations d'énergie relatives aux bâtiments et aux déplacements des personnes, à l'échelle du quartier, et l'importance de la localisation des activités sur le territoire. Trois types de reproductibilité peuvent être envisagés sur cette base : (1) l'analyse des territoires urbains et ruraux, (2) l'extension aux fonctions non résidentielles (bureaux, écoles, etc.) et (3) l'étude des nouveaux territoires périurbains. Une attention particulière a ainsi été portée à la reproductibilité de l'instrumentation développée, tout au long de la thèse. Car si les résultats proposés ne peuvent être généralisés, en l'état, à d'autres territoires compte tenu des nombreuses caractéristiques spécifiques de l'étalement urbain wallon, la méthode d'évaluation développée et ses composants sont aisément reproductibles à d'autres quartiers périurbains ou à d'autres types de quartiers, par l'adaptation des paramètres locaux tels que le climat pour la partie relative aux besoins de chauffage des quartiers ou la consommation des véhicules et le taux de remplissage des transports en commun pour la partie relative aux déplacements.

La reproductibilité des développements proposés aux quartiers urbains et ruraux wallons fait actuellement l'objet du projet de recherches SOLEN (SOlutions for Low Energy Neighbourhoods) financé par la Direction générale opérationnelle - Aménagement du territoire, Logement, Patrimoine et Energie de la Wallonie (DGO4). Il s'agit concrètement d'affiner l'instrumentation mise en place dans le cadre de la thèse et d'adapter certains paramètres à l'étude des quartiers urbains et des quartiers ruraux. La classification typologique des bâtiments et la base de données comprenant les résultats des simulations thermiques dynamiques des bâtiments seront, à cet effet, complétées et enrichies. Il est également souhaitable, à terme, de compléter ces deux outils par des données relatives aux bâtiments non-résidentiels, qu'il s'agisse de bâtiments de bureaux, d'écoles ou autres.

Ensuite, si les questions abordées dans le cadre de la thèse sont importantes à l'échelle de la Wallonie, elles devraient également être étudiées dans un cadre plus large puisque l'étalement urbain tend aujourd'hui à se généraliser à de nombreux pays d'Europe de l'est (Pologne) et du sud (Espagne et Italie) ainsi qu'aux pays émergents, Chine et Inde en tête. Il serait ainsi intéressant d'effectuer des comparaisons avec des territoires similaires (France) et totalement différents (Chine) pour tester la stabilité des résultats proposés, notamment en ce qui concerne la hiérarchisation des paramètres explicatifs.

### **3.2. Le renouvellement des données relatives au transport**

Les données utilisées dans la thèse pour évaluer les consommations énergétiques relatives aux déplacements des personnes proviennent des deux derniers recensements statistiques de la Direction générale Statistique et Information économique : le recensement de la population et des logements au 1<sup>er</sup> mars 1991 et l'enquête socio-économique générale de

2001. L'organisation de ces recensements a été abandonnée récemment (il n'y a pas eu de recensement en 2011). Ces bases de données qui couvrent l'ensemble de la population belge à une échelle très désagréée sont précieuses et l'obtention de données actualisées et détaillées sur les ménages, leurs logements et leurs déplacements est cruciale dans le cadre qui nous occupe mais également pour de nombreux autres domaines de recherches ainsi que pour les acteurs opérationnels. Il convient donc de développer de nouvelles méthodes d'acquisition de données précises, complètes et fiables, à l'échelle individuelle et pour un territoire significatif (région, pays). La réalisation d'enquêtes sur un échantillon de taille limitée (de quelques dizaines à quelques centaines d'individus) est la solution qui paraît la plus accessible actuellement. Elle est couramment utilisée dans la littérature mais la généralisation des résultats obtenus sur un échantillon de taille limitée à un ensemble territorial plus large pose question. La mise en place de systèmes d'acquisition de données *in situ*, notamment via les nouvelles technologies de l'information et de la communication (GSM, GPS, Bluetooth, etc.) et le développement de modèles précis de prédiction des flux sont deux domaines de recherches très porteurs dans cette perspective.

Le développement de nouvelles méthodes d'acquisition des données relatives à la mobilité des personnes et la constitution de nouvelles bases de données pourraient également permettre de combler deux limitations intrinsèques aux recensements statistiques utilisés dans la thèse en permettant, d'une part, d'étendre les analyses à d'autres types de déplacements que les déplacements domicile-travail et les déplacements scolaires et, d'autre part, d'aborder la problématique des chaînes de déplacements qui se sont fortement complexifiées ces dernières années.

### **3.3. La mobilité active et la mobilité des enfants**

Une des pistes qui nous paraît pertinente pour diminuer les consommations énergétiques relatives aux déplacements, et en corollaire augmenter la qualité de vie des espaces bâties, vise à favoriser les modes de transports « actifs » (marche à pied et vélo) pour les déplacements de courte distance. Si la densification des noyaux existants et la mixité fonctionnelle sont deux éléments préalables qui permettent de réduire les distances à parcourir, étudier les choix comportementaux en la matière, en particulier le rôle de la marche à pied comme mode de transport à part entière (et donc pas seulement comme une activité de loisirs) sont des champs de recherches qui paraissent importants dans l'optique d'une mutation de nos territoires vers un modèle plus durable et d'une diminution de notre dépendance aux combustibles fossiles, et ce d'autant plus que la thèse a montré que la part modale de la voiture individuelle reste très importante pour les déplacements de courte distance, qu'ils concernent les adultes ou les enfants.

Dans le même ordre d'idée, les comportements de mobilité des enfants et leurs liens avec l'urbanisme et le design urbain, que ce soit en ce qui concerne les déplacements scolaires ou les déplacements non-scolaires, relèvent d'un champ de recherches encore très peu investigué dans la littérature existante, en particulier en Europe. Il est souvent admis que les comportements de mobilité des enfants conditionnent en grande partie leurs comportements de mobilité en tant que futurs adultes. Favoriser l'usage des modes actifs

dans le futur passe donc, à la fois, par la construction d'une meilleure connaissance des mécanismes relatifs à la mobilité des enfants et par une plus grande prise en compte, notamment dans l'aménagement urbain, des besoins des enfants et des jeunes en tant qu'utilisateurs à part entière de la ville.

### **3.4. La démolition / reconstruction des quartiers**

Enfin, il nous paraît nécessaire de développer des méthodes et des connaissances relatives aux processus de démolition / reconstruction à l'échelle des quartiers, en milieu périurbain comme en milieu urbain. Si l'histoire de la ville fut marquée, jusqu'il y a quelques décennies, par des processus spontanés de démolition / reconstruction de bâtiments ou de quartiers entiers, les mouvements citoyens et environnementaux qui ont vu le jour dans les années 60 ont largement remis en question la pertinence de la démolition de fragments urbains, en particulier sur base de considérations relatives au patrimoine et aux aspects sociaux qu'elle engendre (relocalisation des populations pendant les travaux, « gentrification », etc.). La question de la démolition / reconstruction ne peut toutefois plus être éludée (on pensera notamment aux objectifs stipulés en la matière dans le cadre de la révision du SDER) ni cantonnée aux opérations ponctuelles de bureaux ou de services. Il importe, à notre sens, de développer des recherches sur les impacts globaux de la démolition / reconstruction en abordant de façon conjointe les aspects environnementaux, patrimoniaux, économiques et sociaux. La question de l'équilibre « coût – efficacité énergétique » en particulier devrait être investiguée pour fournir aux décideurs et acteurs opérationnels une base solide d'aide à la décision. Les impacts de la démolition sur la santé humaine devraient également être mieux maîtrisés. Ce vaste chantier impose notamment de clarifier et compléter les outils d'analyse en cycle de vie existants pour permettre leur utilisation à l'échelle plus large que le bâtiment individuel en prenant en compte notamment les infrastructures, de préciser les bases de données relatives aux matériaux, notamment en ce qui concerne le recyclage, la réutilisation ou la mise en décharge des déchets ainsi que les indicateurs environnementaux utilisés, d'aborder les mécanismes relatifs à l'opérationnalisation de la démolition / reconstruction en particulier pour la fonction résidentielle (réglementations, rente foncière, fiscalité, etc.). Enfin, comme la thèse l'a montré, structure du territoire, forme urbaine, mobilité et consommations d'énergie sont étroitement liées. Il convient d'approfondir ces connaissances en abordant également l'impact de la localisation, de la densité et de la mixité des projets de rénovation, de démolition et de (re)construction sur la génération de mobilité et les besoins en infrastructures de façon, par exemple, à permettre une comparaison globale et raisonnée d'un projet de construction d'un « quartier durable » en milieu périurbain avec un projet de rénovation d'un quartier existant en centre-ville.

## Bibliographie

- ACOSTA, R. 1994. Politiques foncières comparées. Belgique, ADEF, Paris.
- ADALBERTH, K., ALMGREN, A. & PETERSEN, E. H. 2001. Life cycle assessment of four multi-family buildings. International Journal of Low Energy & Sustainable 2.
- ADEME 2007. Bilan carbone. Entreprises et collectivités. Guide méthodologique, version 5. Objectifs et principes de comptabilisation.
- ANTONI, J.-P. 2011. Des éclairages pour modéliser la ville. Modéliser la ville. Formes urbaines et politiques de transport: Ed Economica.
- ARIES, P. 1962. Centuries of childhood, Harmondsworth: Penguin.
- BAKER, N. & STEEMERS, K. 2000. Energy and Environment in Architecture. London: E&FN Spon.
- BANISTER, D. 1992. Energy use, transport and settlement patterns. In: BREHENY, M. (ed.) Sustainable development and urban form. London: Pion Ltd.
- BANISTER, D. 1998. Sustainable development and transport. Report for the Bundesforschungsanstalt für Landeskunde und Raumordnung. The Urban 21 project.
- BANISTER, D., WOOD, C. & WATSON, S. 1997. Sustainable cities: transport, energy and urban form. Environment and Planning B: Planning and Design, 24, 125-143.
- BAUDELLE, G. 2010. La maîtrise de l'étalement urbain : une comparaison Belgique - Pays-Bas. In: DJELLOULI, Y., EMELIANOFF, C., BENNASR, A. & CHEVALIER, J. (eds.) L'étalement urbain. Un processus incontrôlable? Rennes: Presses Universitaires de Rennes.
- BERRY, B. J. L. & OKULICZ-KOZARYN, A. 2009. Dissatisfaction with city life: A new look at some old questions. Cities, 26, 117-124.
- BLENGINI, G. A. 2009. Life cycle of buildings, demolition and recycling potential: A case study in Turin, Italy. Building and Environment, 44, 319-330.

- BOARNET, M. G. & CRANE, R. 2001. The influence of land use on travel behaviour: Specification and estimation strategies. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 36, 823-845.
- BOCHET, B. 2007. Débat ville étalée - ville compacte : la réponse des projets lausannois. *Revue économique et sociale*, 4, 1-13.
- BOUSSAUW, K. & WITLOX, F. 2009. Introducing a commute-energy performance index for Flanders. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 43, 580-591.
- BRANDEMUEHL, M. 2004. Editorial. *ASHRAE Research toward sustainable buildings. HVAC&R Research*, 10, 1-3.
- BREHENY, M. & GORDON, P. 1997. Urban densities, travel behaviour and the limits to planning. *BEPAC/EPSRC Conference on sustainable buildings*. Abingdon.
- BREHENY, M. 1995. The compact city and transport energy consumption. *Transactions of the Institute of British Geographers*, 20, 81-101.
- BRÜCK, L. 2002. La périurbanisation en Belgique : comprendre le processus de l'étalement urbain, Liege, SEGEFA.
- BRULARD, T. & VAN DER HAEGEN, H. 1972. La subdivision des communes belges en secteurs statistiques. Le point de vue des géographes. *Acta Geographica Lovaniensia*, 10, 21-36.
- BULIUNG, R. N., MITRA, R. & FAULKNER, G. 2009. Active school transportation in the Greater Toronto Area, Canada: An exploration of trends in space and time (1986-2006). *Preventive Medicine*, 48, 507-512.
- BULIUNG, R., SULTANA, S. & FAULKNER, G. 2012. Guest editorial: special section on child and youth mobility – current research and nascent themes. *Journal of Transport Geography*, 20, 31-33.
- BURGESS, P. 1998. Revisiting "sprawl": Lessons from the past [Online]. The Urban Center Publications, Cleveland State University. Available: <http://urban.csuohio.edu/research/pubs/respawl.pdf>.
- BUTTENHEIM, H. & CORNICK, P. 1938. Land reserves for American cities. *The Journal of Land and Public Utility Economics*, 14, 254-265.
- CAMBIEN, A. 2011. La modélisation urbaine : une approche historique. In: ANTONI, J.-P. (ed.) *Modéliser la ville. Formes urbaines et politiques de transport*. Paris: Ed. Economica.
- CARTER, H. 1995. *The study of urban geography*, Londres, Arnold.
- CEEW 2007. Rapport analytique sur l'état de l'environnement wallon 2006-2007. MRW - Direction générale des ressources naturelles et de l'environnement. Rapport D/2007/5322/45. Cellule Etat de l'Environnement Wallon.
- CELLULE ETAT DE L'ENVIRONNEMENT WALLON 2007. Rapport analytique sur l'état de l'environnement wallon 2006-2007, Namur.

- CEM 2002. La Cémathèque. Mobilité, consommation et pollution de l'air : quels enjeux pour demain? Réseaux des conseillers en mobilité.
- CERVERO, R. & KOCKELMAN, K. 1997. Travel demand and the 3Ds: Density, diversity, and design. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2, 199-219.
- CERVERO, R., SARMIENTO, O. L., JACOBY, E., FERNANDO GOMEZ, L. & NEIMAN, A. 2009. Influences of built environments on walking and cycling: Lessons from Bogota. *International Journal of Sustainable Transportation*, 3, 203-226.
- CHARMES, E. 2007. Le malthusianisme foncier. *Etudes Foncières*, 125, 12-16.
- CHERQUI, F. 2005. Méthodologie d'évaluation d'un projet d'aménagement durable d'un quartier. Méthode ADEQUA. Thèse de doctorat non publiée, Université de La Rochelle.
- CONVERSE, P. D. 1938. *The elements of marketing*, New York, Prentice Hall.
- CPDT 2005. Rapport final de la subvention 2004-2005. Thème 2. Contribution du développement territorial à la réduction de l'effet de serre. Résumé et annexes. Ministère de la Région wallonne.
- DA SILVA, A. N. R., COSTA, G. C. F. & BRONDINO, N. C. M. 2007. Urban sprawl and energy use for transportation in the largest Brazilian cities. *Energy for Sustainable Development*, 11, 44-50.
- DAXHELET, D., KESSLER, L., LAMBOTTE, J.-M., MERENNE-SCHOUMAKER, B., HALLEUX, J.-M. & CORNET, Y. 2002. Etude complémentaire relative aux profils d'accessibilité - profils de mobilité. Namur.
- DE KEERSMAECKER, M.-L. 2002a. Introduction. Les coûts de la désurbanisation. Namur: Ministère de la Région wallonne.
- DE KEERSMAECKER, M.-L. 2002b. Les comportements migratoires des ménages. Les coûts de la désurbanisation. Namur: Ministère de la Région Wallonne.
- DE MEESTER, T. 2009. Guide de la rénovation basse énergie des logements en Belgique. LEHR, Low Energy Housing Retrofit- Low Energy Housing Retrofit, Architecture et Climat, Université catholique de Louvain, financé par la Politique Scientifique Fédérale, dans le cadre du « Programme de stimulation au transfert de connaissance dans des domaines d'importance stratégique », [www.lehr.be](http://www.lehr.be), 2009.
- DE SMET, F. 2012. Caractérisation des espaces périurbains. Morphologie actuelle et prospective. Thèse de doctorat non publiée, Université de Liège, Liège, 343p.
- DE VLIEGER, I., CORNELIS, E., PANIS, L., SCHROOTEN, L., GOVAERTS, L., PELKMANS, L., LOGGHE, S., VANHOVE, F., DE CEUSTER, G., MACHARIS, C., PEKIN, E., VAN MIERLO, J., TIMMERMANS, J.-M., MATHEYNS, J., VAN BLADEL, K., DE JONG, M., DE GEEST, C. & VAN WALSUM, E. 2006. Milieurapport Vlaanderen, Achtergronddocument 2006, Transport [Online]. Aalst: Vlaamse Milieumaatschappij.
- DECROP, J. 2002. Agglomération et dynamique des activités économiques dans les villes belges. Une approche spatiale sectorielle.

- DELLINGER, A. M. & STAUNTON, C. E. 2002. Barriers to children walking and bicycling to school - United States, 1999. *Morbidity and Mortality Weekly*, 51, 701-704.
- DEPARTEMENT FOR TRANSPORT 2005. Focus on personal travel: England 2005. London:TSO.
- DESJARDINS, X. & LLORENTE, M. 2009. Quelle contribution de l'urbanisme et de l'aménagement du territoire à l'atténuation du changement climatique?
- DESJARDINS, X. 2009. Peut-on habiter au vert quand le pétrole devient cher? *Revue POUR*, 199, 116-122.
- DEYMIER, G. & NICOLAS, J.-P. 2005. Modèles d'interaction entre transport et urbanisme : état de l'art et choix d'un modèle pour le projet SIMBAD.: Rapport du laboratoire d'économie des transports pour le compte de la DRAST et de l'ADEME, Groupe 11 du PREDIT.
- DIAS, D., LANGUMIER, J. & DEMANGE, D. 2008. Mutabilité du périurbain. Le modèle pavillonnaire face aux crises énergétique et environnementale. *Les Annales de la Recherche Urbaine*, 104, 149-156.
- DOUCET, P. 1985. La politique foncière, une nécessité oubliée? *Les Cahiers de l'Urbanisme*, 6, 65-78.
- DUBOIS, O. & HALLEUX, J.-M. 2003. Politique foncière et mécanismes fonciers en Wallonie. Objectifs politiques, outils juridiques et mise en oeuvre. *Ruimte & Planning*, 4, 265-283.
- DUBOIS, O. & HANIN, Y. 2005. Centres et périphéries : entre développement territorial soutenable et financement des collectivités locales. *Bulletin de documentation, Service Public Fédéral Finances*, 65, 87-106.
- DUJARDIN, S., LABEEUW, F.-L., MELIN, E., PIRART, F. & TELLER, J. 2010. Thème 2b. Structuration du territoire pour répondre aux objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre. Subvention 2009-2010. Rapport final. Conférence Permanente du Développement Territorial.
- DUJARDIN, S., BOUSSAUW, K., BRÉVERS, F., LAMBOTTE, J.-M., TELLER, J. & WITLOX, F. Home-to-work commuting, spatial structure and energy consumption: A comparative analysis of Wallonia and Flanders. In: CORNELIS, E., ed. *Proceedings of the BIVEC/GIBET Transportation Research Day*, 2011 Namur. University Press BVBA, 1-14.
- DUJARDIN, S., PIRART, F., BRÉVERS, F., MARIQUE, A.-F. & TELLER, J. 2012a. Home-to-work commuting, urban form and potential energy savings: A local scale approach to regional statistics. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 46, 1054-1065.
- DUJARDIN, S., BOUSSAUW, K., BREVERS, F., LAMBOTTE, J.-M., TELLER, J. & WITLOX, F. 2012b. Sustainability and change in the institutionalized commute in Belgium: Exploring regional differences. *Applied Geography*, 35, 95-103.
- DUMONT, M. & BOSSÉ, A. 2006. L'au-delà des villes contre l'entre-deux des villes. Un espace suburbain français occulté. *Espaces Temps*.

- DUNCAN, S. S. & ROWE, A. 1993. Self-provided Housing: The First World's Hidden Housing Arm. *Urban Studies*, 30, 1331-1354.
- EGGERICKX, T. & CAPRON, C. 2001. Rurbanisation et périurbanisation dans le centre de la Wallonie : une approche socio-démographique. *Espaces, Population, Société*, 1-2, 123-137.
- ENERDATA 2004. Efficacité énergétique des modes de transport. Rapport final. Grenoble-Gières.
- EPSRC 2009. Sustainability of land use and transport in outer neighborhood, Final report: strategic scale.
- EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY 2006. Urban sprawl in Europe - The ignored challenge. Luxembourg: European Environment Agency.
- EUROPEAN COMMISSION 2008. European energy and transport - Trends to 2030.
- EWING, R. H. & CERVERO, R. 2001. Travel and the built environment: A synthesis. *Transportation Research Record*, 1780, 87-114.
- EWING, R. H. & CERVERO, R. 2010. Travel and the built environment. *Journal of the American Planning Association*, 7, 265-294.
- EWING, R. H. & RONG, F. 2008. The impact of urban form on US residential energy use. *Housing Policy Debate*, 19, 1.
- EWING, R. H. 1994. Characteristics, causes, and effects of sprawl: A literature review. *Environmental and Urban Issues*, 1-15.
- EWING, R. H. 1997. Is Los Angeles-Style Sprawl desirable? *Journal of the American Planning Association*, 63, 107-126.
- EWING, R. H., BARTHOLOMEW, K., WINKELMAN, S., J. W. & CHEN, D. 2008. Growing cooler: the evidence on urban development and climate change, Washington DC, Urban Land Institute.
- EWING, R. H., SCHROEER, W. & GREENE, W. 2004. School location and student travel: Analysis of factors affecting mode choice. *Transportation Research Record*, 1895, 55-63.
- FAULKNER, G., RICHICHI, V., BULIUNG, R., FUSCO, C. & MOOLA, F. 2010. What's quickest and easiest? Parental decision making about school trip mode. *International Journal of Behavioral Nutrition and Physical Activity*, 7, 1-11.
- FENG, J., GLASS, T. A., CURRIERO, F. C., STEWARD, W. F. & WCHWARTZ, B. S. 2010. The built environment and obesity: A systematic review of the epidemiologic evidence. *Health & Place*, 16, 175-190.
- FOUCHIER, V. 1997. Les densités urbaines et le développement durable. Le cas de l'Ile-de-France et des villes nouvelles: Edition du SGVN.
- FRASER, C. & MARÉCHAL, L. 2003. Belgium: the case of Wallonia. In: COUCH, C., FRASER, C. & PERCY, S. (eds.) *Urban Regeneration in Europe*. RICS Foundation.

- FUSCO, C., MOOLA, F., FAULKNER, G., BULIUNG, R. & RICHICHI, V. 2012. Toward an understanding of children's perceptions of their transport geographies: (non)active school travel and visual representations of the built environment. *Journal of Transport Geography*, 20, 62-70.
- GALSTER, G., HANSON, R., WOLMAN, H., COLEMAN, S. & FREIHAGE, J. 2000. Wrestling sprawl to the ground: Defining and measuring an elusive concept. *Housing Policy Debate*, 12, 681-717.
- GARCÍA-PALOMARES, J. C. 2010. Urban sprawl and travel to work: the case of the metropolitan area of Madrid. *Journal of Transport Geography*, 18, 197-213.
- GILBERT, R. & O'BRIEN, C. 2005. Child- and youth-friendly land-use and transport planning guidelines., Toronto, The Centre for Sustainable Transportation.
- GILBERT, R. & PERL, A. 2008. *Transport Revolutions: Moving People and Freight Without Oil*, Earthscan, London.
- GLICKSMAN, L. R. 2003. Promoting sustainable buildings. *HVAC&R Research*, 9, 107-109.
- GONTIER, P. 2005. Symbiocité. *Faces*, 60, 32-35.
- GORDON, I. R. 2008. Density and the built environment. *Energy Policy*, 36, 4652-4656.
- GORDON, P. & RICHARDSON, H. W. 1989. Gasoline consumption and cities - a reply. *Journal of the American Planning Association*, 55, 342-345.
- GORDON, P. & RICHARDSON, H. W. 1997. Are compact cities a desirable planning goal? *Journal of the American Planning Association*, 63, 95-106.
- GRAHAM, A. 2000. Demand for leisure air travel and limits to growth. *Journal on Air Transport Management*, 6, 109-118.
- GROSJEAN, B. 2010. *Urbanisation sans urbanisme. Une histoire de la "ville diffuse"*, Belgium, Mardaga.
- GUILLUY, C. & NOYÉ, C. 2004. *Atlas des nouvelles fractures sociales en France*, Paris, Editions Autrement.
- HALLEUX, J.-M. & LAMBOTTE, J.-M. 2006. Comment maîtriser la demande en mobilité et limiter la dépendance automobile par l'aménagement du territoire? *Les Cahiers du CEPES*, 1, 23-43.
- HALLEUX, J.-M. & LAMBOTTE, J.-M. 2008. Reconstruire la Ville sur la Ville. Le Recyclage Morphologique et le Renouvellement des Espaces Dégradés. *Territoire(s) Wallon(s)*, 2, 7-22.
- HALLEUX, J.-M. 2005. Le rôle des promotions foncières et immobilières dans la production des périphéries : application à la Belgique et à ses nouveaux espaces résidentiels. *Revue Géographie de l'Est*, 45, 161-173.
- HALLEUX, J.-M. 2008. Mobilité relâchée et surabondance foncière : pourquoi et comment gérer l'offre de manière parcimonieuse? In: MONTEVENTI WEBER, L., DESCHEAUX, C. & TRANDA-PITTION, M. (eds.) *Campagne-ville. Le pas de deux*.

- Enjeux et opportunités des recompositions territoriales. Lausanne, Suisse: Presses polytechniques et universitaires romandes.
- HALLEUX, J.-M., BRÜCK, L. & MAIRY, N. 2002a. La périurbanisation résidentielle en Belgique à la lumière des contextes suisses et danois : enracinement, dynamiques centrifuges et régulations collectives. *Belgeo*, 4, 333-354.
- HALLEUX, J.-M., LAMBOTTE, J.-M. & BRÜCK, L. 2002b. Désurbanisation et services collectifs : les surcoûts financiers des infrastructures de viabilisation. *Les coûts de la désurbanisation*. Namur: Ministère de la Région wallonne.
- HANSON, C. 1996. *The cohousing handbook - Building a place for a community*, USA, Hartley & Marks Publishers.
- HANSON, S. 1982. The Determinants of Daily Travel Activity Patterns: Relative Location and Socio Demographic Factors. *Urban Geography*, 3, 179-202.
- HAUMONT, A., HAUMONT, N., RAYMOND, H. & RAYMOND, M. G. 1966. L'habitat pavillonnaire, Paris, Institut de sociologie urbaine, Centre de recherche d'urbanisme.
- HERAN, F. 2001. La réduction de la dépendance automobile. *Cahiers Lillois d'Economie et de Sociologie*, 37, 61-86.
- HICKMAN, R. & BANISTER, D. 2007. Transport and reduced energy consumption: What role can urban planning play?
- HILDERSOHN, W., MLECNIK, E. & CRÉ, J. 2010. Potential of low energy housing retrofit: Insights from building stock analysis. *Rapport Politique Scientifique Belge*, Belgique.
- HILLMAN, M., ADAMS, J. & WHITELEGG, J. 1990. One false move... A study of children's independent mobility, London, Policy Studies Institute.
- HOFFNER, M., E, A & DOL, C., P 2000. Statistiques du logement dans l'Union Européenne. Commission Européenne, DG V, Bruxelles.
- HOLDEN, E. & NORLAND, I. T. 2005. Three challenges for the compact city as a sustainable urban form: household consumption of energy and transport in eight residential areas in the greater Oslo. *Urban Studies*, 42, 2145-2166.
- HOLLOWAY, S. L. & VALENTINE, G. 2000. *Children's Geographies: Playing, Living, Learning.*, London, Routledge.
- HOWARD, E. 1946. *Garden cities of To-morrow*. Reprinted, edited with a preface of F.J. Osborne and an Introductory Essay of Lewis Mumford., Faber and Faber, London, 168p.
- HUBERMAN, N. & PEARLMUTTER, D. 2008. A life-cycle energy analysis of building materials in the Negev desert. *Energy and Buildings*, 40, 837-848.
- HUBERT, J.-P. & TOINT, P. 2002. La mobilité quotidienne des belges, Namur, Presses Universitaires de Namur.
- HUBERT, J.-P. 2004. Mobilité urbaine, périurbaine, rurale en Belgique : Où sont les différences? *Les Cahiers Scientifiques du Transport*, 45, 83-100.

IAURIF 1995. Référentiel de densités et de formes urbaines. Contribution pour un référentiel appliqué à l'habitat dans la Région Ile-de-France. Paris: IAURIF, 97p.

IBI GROUP 2000. Emissions de gaz à effet de serre attribuables aux déplacements urbains : outil d'évaluation de la durabilité des quartiers. Rapport de recherches pour la société canadienne d'hypothèques et de logement et Ressources naturelles Canada, série sur la maison et les collectivités saines.

ICEDD 2005. Bilan énergétique wallon 2005. Consommations du secteur du logement 2005. MRW, Direction générale des technologies, de la recherche et de l'énergie - Conception et réalisation ICEDD asbl - Namur.

ICEDD 2009. Bilan énergétique de la Région wallonne 2007 - Bilan de l'industrie et bilan global. Pour le compte de SPW DGO ATLPE.

IEA 1988. Technical note AIVC 23 - Inhabitant behaviour with respect to ventilation - a summary report of IEA Annex VIII.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. 2007. Climate change 2007: The physical science basis. Summary for policymakers [Online]. Available: <http://www.ipcc.ch> [Accessed juin 2012].

ISO 2006a. ISO 14040. Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework, International Standardization Organization.

ISO 2006b. ISO 14044 Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines. International Standardization Organization.

IWEPS 2007. Chiffres-clés de la Wallonie. N° 7. En ligne : <http://www.iweps.be/publication-categorie/chiffres-cles-de-la-wallonie>, consulté en décembre 2010.

JAMES, A. & JENKS, C. 1996. Public perceptions of childhood criminality. The British Journal of Sociology, 47, 315-331.

JENKS, R. & BURGESS, P. 2002. Compact cities: sustainable urban forms for developing countries, London, Spon Press.

JONES, P., WILLIAMS, J. L. & LANNON, S. 2000. Planning for a sustainable city: an energy and environmental prediction model. Journal of Environmental Planning and Management, 43, 855-872.

KAHN, M. E. 2000. The environmental impact of suburbanization. Journal of Policy Analysis and Management, 19, 569-586.

KAHN, M. E. 2006. The quality of life in sprawled versus compact cities.

KAUFMANN, V. 2002. La périurbanisation n'est pas fatale. Urbanisme, 324, 56-61.

KENWORTHY, J. Transport energy use and greenhouse gases in urban passenger transport systems: a study of 84 global cities. . Third Conference of the Regional Government Network for Sustainable Development, September 17-19, 2003 2003 Notre Dame University, Fremantle, Western Australia.

- KINTS, C. 2008. La rénovation énergétique et durable des logements wallons. Analyse du bâti existant et mise en évidence des typologies de logements prioritaires. Etude réalisée pour la Division de l'Energie, Direction générale des Technologies, de la Recherche et de l'Energie, Ministère de la Région wallonne.
- LAMBOTTE, J.-M. 2010. Les plans stratégiques des régions frontalières, source d'inspiration en cas de révision du SDER. *Territoire(s) Wallon(s)*, 5, 101-112.
- LAVADINHO, S. & LENSEL, B. 2010. Importons la notion de centralité en périphérie : Pour une soutenable émergence de la qualité urbaine dans la Zwischenstadt. *Urbia*, 11, 113-143.
- LEFÈVRE, B. 2007. La soutenabilité environnementale des transports urbains dans les villes du sud : le couple "transport - usage des sols" au cœur des dynamiques urbaines. *ENSPM*.
- LENTIER, F. 2012. Comparaison environnementale entre la démolition et la rénovation d'un bâtiment. Mémoire de Master non publié. Université de Liège, 170p.
- LINE, T., CHATTERJEE, K. & LYONS, G. 2010. The travel behaviour intentions of young people in the context of climate change. *Journal of Transport Geography*, 18, 238-246.
- LITTLEFAIR, P. J. 2009. Site layout planning for daylight and sunlight, a guide to good practice, Garston.
- LOOPMANS, M., UITERMARK, J. & DE MAESSCHALK, F. 2003. Against all odds: poor people jumping scales and the genesis of an urban policy in Flanders, Belgium. *Belgeo*, 2, 243-258.
- LUSSON, P. 1997. L'étalement de la ville. In: DUBOIS-TAINE, G. & CHALAS, Y. (eds.) *La ville émergente. Monde en Cours, l'aube*, 43-53.
- LUYTEN, S. & VAN HECKE, E. 2007. Socio-economische Enquête 2001 - Working papers. *Algemene Directie Statistiek en Economische Informatie*, Brussels, 88p.
- MAÏZIA, M. 2010. Densité énergétique versus densité urbaine. *Etudes Foncières*, 145, 37-38.
- MAÏZIA, M., SÈZE, C., BERGE, S., TELLER, J., REITER, S. & MÉNARD, R. 2009. Energy requirements of characteristic urban blocks. *CISBAT 2009 - Renewables in a changing climate, from nano to urban scale*. Lausanne, Switzerland.
- MANGIN, D. 2004. La ville franchisée. Formes et structures de la ville contemporaine., Paris, Eds de la Villette.
- MARIQUE, A.-F. & REITER, S. 2012a. A method for evaluating transport energy consumption in suburban areas. *Environmental Impact Assessment Review*, 33, 1-6.
- MARIQUE, A.-F. & REITER, S. 2012b. A Method to Evaluate the Energy Consumption of Suburban Neighbourhood. *HVAC&R Research*, 18, 88-99.
- MARIQUE, A.-F., DUJARDIN, S., TELLER, F. & REITER, S. 2013a. School commuting : the relationship between energy consumption and urban form. *Journal of Transport Geography*, 26, 1-11.

- MARIQUE, A.-F., DUJARDIN, S., TELLER, F. & REITER, S. 2013b. Urban sprawl, commuting and travel energy consumption. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 166, 1-13.
- MCDONALD, N. C. & AALBORG, A. E. 2009. Why parents drive children to school. *Journal of the American Planning Association*, 75, 331-342.
- MCDONALD, N. C. 2005. Getting to school: the impact of free transit on low income and minority students. Washington D.C.: Annual Meeting of the Transportation Research Board.
- MCDONALD, N. C. 2012. Is there a gender gap in school travel? An examination of US children and adolescents. *Journal of Transport Geography*, 20, 80-86.
- MCDONALD, N. C., BROWN, F., MARCHETTI, L. & PEDROSO, M. 2011. US school travel, 2009: An assessment of trends. *American Journal of Preventive Medicine*, 41, 146-151.
- MCMILLAN, T. E. 2005. Urban form and a child's trip to school: The current literature and a framework for future research. *Journal of Planning Literature*, 19, 440-456.
- MCMILLAN, T. E. 2006. The relative influence of urban form on a child's travel mode to school. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 41, 69-79.
- MCMILLAN, T. E., DAY, K., BOARNET, M. G., ALFONZO, M. & ANDERSON, C. 2006. Johnny walks to school - Does Janes? Sex differences in children's active travel to school. *Children, Youth and Environments*, 16, 75-89.
- MÉRENNE-SCHOUMAKER, B. 2003. *Géographie des services et des commerces*, Presses Universitaires de Rennes.
- MERENNE-SCHOUMAKER, B., VAN DER HAEGEN, H. & VAN HECKE, E. 1998. Recensement général de la population et des logements au 1er mars 91, urbanisation. Monographie 11a. Bruxelles: Institut National de la Statistique, Ministère des Affaires Economiques, 196p.
- MINDALI, O., RAVEH, A. & SALOMON, I. 2004. Urban density and energy consumption: a new look at old statistics. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 38, 143-162.
- MIRA 2007. Milieurapport Vlaanderen, Achtergronddocument 2007, Transport, Ina De Vlieger, Erwin Cornelis, Luc Int Panis, Liesbeth Schrooten, Leen Govaerts, Luc Pelkmans, Steven Logghe, Filip Vanhove, Kris Vanherle, Griet De Ceuster, Cathy Macharis, Ethem Pekin, Laurence Turcksin, Kelly van Bladel, Marjolein de Jong, Joeri Van Mierlo, Jean-Marc Timmermans, Julien Matheys, Caroline De Geest en Els van Walsum, Vlaamse Milieumaatschappij, [www.milieurapport.be](http://www.milieurapport.be).
- MITRA, R. & BULIUNG, R. N. 2012. Built environment correlates of active school transportation: neighborhood and the modifiable areal unit problem. *Journal of Transport Geography*, 20, 51-61.
- MITRA, R., BULIUNG, R. N. & ROORDA, M. J. 2010. The built environment and school travel mode choice in Toronto, Canada. *Transportation Research Record*, 2156, 2150-2159.

- MRW 2004. Guide d'urbanisme pour la Wallonie, Namur, Ministère de la Région wallonne, DGATLP, 227p.
- MRW 2007. Enquête sur la qualité de l'habitat en Région wallonne 2006-2007. Etudes et documents, Logement n°5, Région wallonne, Namur.
- MUNIZ, I. & GALINDO, A. 2005. Urban form and the ecological footprint of commuting. The case of Barcelona. *Ecological Economics*, 55, 499-514.
- NAESS, P., SANDBERG, S. L. & ROE, P. G. 1996. Energy use for transportation in 22 nordic towns. *Scandinavian Housing and Planning Research*, 13, 79-97.
- NAMDEO, A., MITCHELL, G. & DIXON, R. 2002. TEMMS: an integrated package for modeling and mapping urban traffic emissions and air quality. *Environmental Modeling Software*, 17, 177-188.
- NAYAK, A. 2003. "Through children's eyes": Childhood, place and fear of crime. *Geoforum*, 34, 303-315.
- NESAMANI, K. S. 2010. Estimation of automobile emissions and control strategies in India. *Science of the Total Environment*, 408, 1800-1811.
- NEUMAN, M. 2005. The compact city fallacy. *Journal of Planning Education and Research*, 25, 11-26.
- NEWMAN, P. & KENWORTHY, J. 1989a. Cities and automobile dependence: a sourcebook, Victoria, Gower, Aldershot and Brookfield.
- NEWMAN, P. & KENWORTHY, J. 1989b. Gasoline consumption and cities - A comparison of UK cities with a global survey. *Journal of the American Planning Association*, 55, 24-37.
- NEWMAN, P. & KENWORTHY, J. 1996. The land use - transport connection. An overview. *Land Use Policy*, 13, 1-22.
- NORMAN, J., MACLEAN, H. L. & KENNEDY, C. A. 2006. Comparing high and low residential density: Life-cycle analysis of energy use and greenhouse gas emissions. *Journal of Urban Planning and Development*, 132, 10-21.
- ORFEUIL, J.-P. 1996. Urbain et périurbain : qui va où? *Urbanisme*, 289.
- OWENS, S. 1986. Energy, planning and urban form, London, Pion Ltd.
- OWENS, S. 1992. Land-use planning for energy efficiency. *Applied Energy*, 43, 81-114.
- OWENS, S. 1995. A response to Michael Breheny. *Transactions of the Institute of British Geographers*, 20, 381-86.
- PEUPORTIER, B. & POLSTER, B. Non daté. Logiciel EQUER. Simulation du cycle de vie des bâtiments. Manuel d'utilisation du logiciel.
- PEUPORTIER, B. 1989. Validation of Comfie. Rapport CEC. University de Stuttgart ITW, Allemagne.

- PEUPORTIER, B. 2004. La simulation et les nouvelles attentes liées au concept de développement durable, documentation fournie avec les logiciels IZUBA.
- PEUPORTIER, B. Bancs d'essai de logiciels de simulation thermique. Proceedings de la Journée Thématique SFT-IBPSA, 2005.
- PIERSON, C. 2010. Approche sociologique de l'habitat périurbain. Mémoire de master Ingénieur Architecte non publié, Université de Liège.
- PIRON, O. 2007. Les déterminants économiques de l'étalement urbain. Etudes Foncières, 129, 24-26.
- PISARSKI, A. E. 2006. Commuting in America III. Washington D.C.
- PLOEGAERTS, L. & PUTTEMANS, P. 1987. L'oeuvre architecturale de Henry Van De Velde., Atelier Vokaer, Bruxelles, 462p.
- POORTINGA, W., STEG, L., VLEK, C. & WIERSMA, G. 2003. Household preferences for energy-saving measures: A conjoint analysis. *Journal of Economic Psychology*, 24, 49-64.
- POPOVICI, E. & PEUPORTIER, B. Using life-cycle assessment as a decision support in the design of settlements. Proceedings of PLEA, 2004 Eindhoven, The Netherlands. 6p.
- POPOVICI, E. 2006. Contribution à l'analyse en cycle de vie des quartiers. Thèse de Doctorat non publiée, Ecole des Mines de Paris.
- POUYANNE, G. 2004. Forme urbaine et mobilité quotidienne. Thèse de doctorat non publiée, Université Montesquieu, Bordeaux.
- RANDOLPH, J. 2008. Comment on Reid Ewing and Fang Rong's "The impact of urban form on U.S. residential energy use". *Housing Policy Debate*, 19, 45-52.
- RATTI, C., BAKER, N. & STEEMERS, K. 2005. Energy consumption and urban texture. *Energy and Buildings*, 37, 762-776.
- REITER, S. & MARIQUE, A.-F. In press. Toward low energy cities: A case study of the urban area of Liege. *Journal of Industrial Ecology*.
- REITER, S. 2007. Elaboration d'outils méthodologiques et techniques d'aide à la conception d'ambiances urbaines de qualité pour favoriser le développement durable des villes. Thèse de Doctorat non publiée, Université catholique de Louvain.
- RÉRAT, P. 2006. Mutations urbaines, mutations démographiques. Contribution à l'explication de la déprise démographique des villes-centres. *Revue d'Economie Régionale & Urbaine*, 5, 725-750.
- REY, E. 2007. Quels processus pour la création d'un quartier durable : l'exemple du projet Ecoparc à Neufchatel. *Urbia*, 4, 123-146.
- ROSSI, B., MARIQUE, A.-F., GLAUMANN, M. & REITER, S. 2012a. Life-cycle assessment of residential buildings in three different European locations, basic tool. *Building and Environment*, 51, 395-401.

- ROSSI, B., MARIQUE, A.-F. & REITER, S. 2012b. Life-cycle assessment of residential buildings in three different European locations, case study. *Building and Environment*, 51, 402-407.
- SAELENS, B. E. & HANDY, L. 2008. Built environment correlates a walking: A review. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 40, 550-566.
- SAUNDERS, M. J., KUHNIMHOF, T., CHLOND, B. & DA SILVA, A. N. R. 2008. Incorporating transport energy into urban planning. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 42, 874-882.
- SAVENBERG, S. & VAN HECKE, E. 1998. Typologie van de migraties naar leeftijd. DWTC "De residentiële keuze van de huishoudens in het licht van de problematiek van duurzame ontwikkeling. KUL, Instituut voor Sociale en Economische Geographie.
- SCHEUER, C., KEOLEIAN, G. A. & REPPE, P. 2003. Life cycle energy and environmental performance of a new university building: modeling challenges and design implications. *Energy and Buildings*, 35, 1049-1064.
- SCHWANEN, T., DIELEMAN, F. M. & DIJST, M. 2001. Travel behaviour in Dutch monocentric and polycentric urban systems. *Journal of Transport Geography*, 9, 173-186.
- SJOLIE, A. N. & THUEN, F. 2002. School journeys and leisure activities in rural and urban adolescents in Norway. *Health Promotion International*, 17, 21-30.
- SOUCHÉ, S. 2010. Measuring the structural determinants of urban travel demand. *Transport Policy*, 17, 127-134.
- SPORCK, J. A., VAN DER HAEGEN, H. & PATTYNS, M. 1985. L'organisation spatiale de l'espace urbain. La cité belge d'aujourd'hui, quel devenir?, 153-164.
- STEAD, D. 2001. Relationships between land-use, socio-economic factors and travel patterns in Britain. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 28, 499-528.
- STEADMAN, P. 1979. Energy and patterns of land use. In: WATSON, D. (ed.) *Energy conservation through building design*. McGraw-Hill.
- STEADMAN, P., HOLTIER, S., BROWN, F., TURNER, J., DE LA BARRA, T. & RICKABY, P. A. 1998. An integrated building stock, transport and energy model of medium size.
- STEEMERS, K. 2003. Energy and the city: density, buildings and transport. *Energy and Buildings*, 35, 3-14.
- SUSILO, Y. O. & WAYGOOD, E. O. D. 2012. A long term analysis of the mechanisms underlying children's activity-travel engagements in the Osaka metropolitan area. *Journal of Transport Geography*, 20, 41-50.
- SWAN, L. G. & UGURSAL, V. I. 2009. Modeling of end-use energy consumption in the residential sector: A review of modeling techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13, 1819-1835.
- TELLER, J. & AZAR, S. 2001. Townscope II—A computer system to support solar access decision-making. *Solar Energy*, 70, 187-200.

- TELLER, J. 2009. Développement de l'entre-soi communautaire dans les espaces résidentiels périurbains. *Déviance et Société*, 33, 547-556.
- TIMPERIO, A., BALL, K., SALMON, J., ROBERTS, R., GILES-CORTI, B., SIMMONS, D., BAUER, L. A. & CRAWFORD, D. 2006. Personal, family, social and environmental correlates of active commuting to school. *American Journal of Preventive Medicine*, 30, 45-51.
- TOMMERUP, H. & SVENDSEN, S. 2006. Energy savings in Danish residential building stock. *Energy and Buildings*, 38, 618-626.
- TRANTER, P. & SHARPE, S. 2012. Disney-Pixar to the rescue: harnessing positive affect for enhancing children's active mobility. *Journal of Transport Geography*, 20, 34-40.
- TRAPP, G. S. A., GILES-CORTI, B., CHRISTIAN, H. E., BULSARA, M., TIMPERIO, A., MCCORMACK, G. R. & VILLANUEVA, K. P. 2011. Increasing children's physical activity: Individual, social and environmental factors associated with walking to and from school. *Health Education and Behaviour*, DOI: 10.1177/1090198111142372.
- TRAVISI, C. M., CAMAGNI, R. & NIJKAMP, P. 2010. Impacts of urban sprawl and commuting: a modeling study for Italy. *Journal of Transport Geography*, 18, 382-392.
- TWEED, C. & JONES, P. 2000. The role of models in arguments about urban sustainability. *Environmental Impact Assessment Review*, 20, 277-287.
- UITP 2003. Pour une meilleure mobilité urbaine dans les pays en développement. Rapport D/2003/0105/27. [www.uitp.com](http://www.uitp.com)
- URBANTASKFORCE 1999. Towards an urban renaissance. London.
- VAN DE COEVERING, P. & SCHWANEN, T. 2006. Re-evaluating the impact of urban form on travel patterns in Europe and North-America. *Transport Policy*, 13, 229-239.
- VAN DER HAEGEN, H. & PATTYNS, M. 1979. Les régions urbaines belges. *Bulletin de la statistique, Institut National de la Statistique*, 5ème année.
- VAN DER HAEGEN, H. 1991. Les franges périurbaines en Belgique : quelques éléments de recherche concernant leur délimitation, leur population et leurs caractéristiques sociales. *Espaces, Population, Société*, 2, 259-269.
- VAN DER HAEGEN, H., VAN HECKE, E. & JUCHTMANS, G. 1996. Les régions urbaines belges en 1991. *Etudes statistiques de l'INS* 104.
- VAN DER PLOEG, H., MEROM, D., CORPUZ, G. & BAUMAN, A. 2008. Trends in Australian children traveling to school 1971-2003: Burning petrol or carbohydrates? *Preventive Medicine*, 46, 60-62.
- VAN HECKE, E. & SAVENBERG, S. 2002. Suburbanisation et développement durable. *Espace, Populations, Sociétés*, 2002(1-2), 25-36.
- VERBEECK, G. & HENS, H. 2005. Energy savings in retrofitted dwellings: economically viable? *Energy and Buildings*, 37, 747-754.
- VERBEECK, G. & HENS, H. 2007. Life cycle optimization of extremely low energy dwellings. *Journal of Building Physics*, 31, 143-177.

- WALLEMACQ, V., MARIQUE, A.-F. & REITER, S. Development of an urban typology to assess residential environmental performance at the city scale. In: BODARD, M. & EVRARD, A., eds. PLEA 2011, 2011 Louvain-La-Neuve. Presses Universitaires de Louvain, 119-125.
- WEGENER, M. 1994. Operational urban models: State of the art. *Journal of the American Planning Association*, 60, 17-29.
- WEGENER, M. 2004. Overview of land-use transport models. In: DAVID, A. & BUTTON, K. (eds.) *Transport geography and spatial systems*. Pergamon/Elsevier.
- WEINER, E. 2008. *Urban transportation planning in the United States: history, policy, and practice*, New York, Springer.
- YAPING, W. & MIN, Z. 2009. Urban spill over vs. local urban sprawl: Entangling land-use regulations in the urban growth of China's megacities. *Land Use Policy*, 26, 1031-1045.
- YEUNG, J., WEARING, S. & HILLS, A. P. 2008. Child transport practices and perceived barriers in active commuting to school. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 42, 895-900.
- ZAHAVI, Y. 1976. Travel characteristics in cities of developing and developed countries. Staff Working Paper, n°230, World Bank, Washington D.C.
- ZITOUNI, B. 2010. *Agglomérer, une anatomie de l'extension bruxelloise (1828-1915)*, VUB Press, Bruxelles, 331p.
- ZIVIANI, J., SCOTT, J. & WATLEY, D. 2004. Walking to school: incidental physical activity in the daily occupations of Australian children. *Occupational Therapy International*, 11, 1-11.

## **Liste des Publications Rédigées dans le Cadre de la Thèse**

/// La liste ci-dessous reprend les articles rédigés par l'auteur, dans le cadre de la thèse de doctorat, et publiés dans des journaux scientifiques ou des proceedings avec peer-reviewing. Les textes intégraux de ces articles ainsi que les autres communications scientifiques de l'auteur sont disponibles sur ORBI, le répertoire institutionnel de l'Université de Liège, à l'adresse <http://orbi.ulg.ac.be/ph-search?uid=U193370>. ///

### **Journaux scientifiques avec peer-reviewing : articles publiés, premier ou dernier auteur**

1. MARIQUE, A.-F., DUJARDIN, S., TELLER, J. & REITER, S. 2013a. School commuting: the relationship between energy consumption and urban form. *Journal of Transport Geography*, 26, 1-11.

**Abstract:** A large amount of research in the past has focused on the relationships between the energy consumption for home-to-work travels and land-use patterns. However, little is known about children's mobility. This paper analyses the energy consumption, travel distances and mode choices for school commuting based on two decennial surveys in Belgium. The results highlight the following: (1) Mobility behaviours have evolved drastically over the past decades for school commuting, an evolution that cannot be entirely related to land-use variables. (2) The energy consumption for school commuting is strongly dependent upon the school level. (3) The links between land-use patterns and energy consumption for school commuting are different than those highlighted within the literature between urban forms and home-to-work commutes. The concentration of secondary schools and tertiary institutions in urban centres induces higher energy consumption rates, whereas the decentralisation of nursery and primary schools across the entire territory leads to very low local energy consumption and increased walking and cycling. These results provide a better understanding of school commuting within

- the European context and could guide future policies focused on transport energy consumption at the local scale.
2. MARIQUE, A.-F., DUJARDIN, S., TELLER, J. & REITER, S. 2013b. Urban sprawl, commuting and travel energy consumption. Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Energy, 166, 1-13.
- Abstract : Commuting to and from dense urban centres is often believed to be more energy efficient than commuting from more suburban areas. However, quantitative evidence is lacking. In this context, this paper investigates the interactions between the spatial structure of the territory and transport energy consumption for commuting. Based on empirical surveys carried out every 10 years in Belgium, a quantitative method was developed and applied to assess energy efficiency of home-to-work and home-to-school travels. Our main findings highlight that urban planning structure acts upon travel energy consumption for commuting and that major cities present low energy consumption. However, a local-scale approach is useful for refining these observations, and this approach highlights the existence of secondary suburban and rural cores that also are characterized by low transport energy consumption. In this respect, the distance from home to a destination is paramount, whereas the mode of transport used has a lower impact.
3. REITER, S. & MARIQUE, A.-F. In press. Toward low energy cities: A case study on the urban area of Liège. *Journal of Industrial Ecology*.
- Abstract : Within the framework of sustainable development, it is important to take into account environmental aspects of urban areas related to their energy use. In this article, a methodology is proposed for assessing residential energy uses for buildings and transport at the city scale. This method is based on the use of GIS tools combined with a statistical treatment of urban and transport criteria. The methodology allows to model buildings and transport energy use at the city scale, as well as to consider the possible evolution of the city energy consumption and to simulate the effects of some strategies of urban renewal. An application is given to study different energy management strategies for the urban area of Liège. Buildings and transport energy consumption are compared at the city scale and their possible evolution in the future is highlighted. Forecast scenarios on future energy policies for Liège's building stock show that the European Directive on the Energy Performance of Buildings and even more selective energy policies applied only on new buildings are not sufficient to widely decrease buildings energy consumptions at the city scale. The renovation of the existing building stock has a much larger positive impact on city energy consumption reductions. The methodology developed in this article can be adapted and/or reproduced on many other territories in Belgium but also in Europe or even further.
4. MARIQUE, A.-F. & REITER, S. 2012. A method to evaluate the energy consumption of suburban neighbourhood. *HVAC&R Research*, 18, 88-99.

**Abstract :** Energy use in buildings, transportation systems, and lighting networks represents a significant contribution to the overall energy consumption in urban and suburban areas. This article presents a method to evaluate the energy consumption of suburban neighborhoods from these three points of view, aiming to highlight the most relevant variables linking urban form and neighborhoods' energy consumptions. The method includes three parts: (1) a computational approach combining dynamic simulation tools and a database of building typologies to determine the energy consumed in heating; (2) an empirical approach to assess the energy consumed by transportation systems (four purposes of travel are taken into account: work, school, leisure, and shopping); and (3) a simplified approach to calculate the energy consumed by public lighting. Results from the application of the method to three characteristic suburban neighborhoods in Belgium are presented along with a life cycle energy assessment of buildings. A sensitivity analysis was conducted to determine the effects of building and neighborhood characteristics and of building inhabitant behavior on calculated energy consumption. Results from the analysis show that building insulation, building distribution, heating system management, and neighborhood location are critically important factors in the energy efficiency of suburban residential areas.

5. MARIQUE, A.-F. & REITER, S. 2012. A method for evaluating transport energy consumption in suburban areas. *Environmental Impact Assessment Review*, 33, 1-6.

**Abstract :** Urban sprawl is a major issue for sustainable development. It represents a significant contribution to energy consumption of a territory especially due to transportation requirements. However, transport energy consumption is rarely taken into account when the sustainability of suburban structures is studied. In this context, the paper presents a method to estimate transport energy consumption in residential suburban areas. The study aimed, on this basis, at highlighting the most efficient strategies needed to promote awareness and to give practical hints on how to reduce transport energy consumption linked to urban sprawl in existing and future suburban neighborhoods. The method uses data collected by using empirical surveys and GIS. An application of this method is presented concerning the comparison of four suburban districts located in Belgium to demonstrate the advantages of the approach. The influence of several parameters, such as distance to work places and services, use of public transport and performance of the vehicles, are then discussed to allow a range of different development situations to be explored. The results of the case studies highlight that traveled distances, and thus a good mix between activities at the living area scale, are of primordial importance for the energy performance, whereas means of transport used is only of little impact. Improving the performance of the vehicles and favoring home-work give also significant energy savings. The method can be used when planning new areas or retrofitting existing ones, as well as promoting more sustainable lifestyles regarding transport habits.

## Actes de conférences avec peer-reviewing, premier auteur

6. MARIQUE, A.-F., DE MEESTER, T. & REITER, S. An online interactive tool for the energy assessment of residential buildings and transportation. PLEA 2012, Passive and Low Energy Architecture, In press, Lima, Peru.
7. MARIQUE, A.-F., PÉTEL, M., HAMDI, A. & REITER, S. Combining territorial data with thermal simulations to improve energy management of suburban areas. GEOProcessing 2012, 2012, Valence, Spain.
8. MARIQUE, A.-F., DUJARDIN, S., TELLER, J. & REITER, S. Urban sprawl and travel energy consumption: the case of the Walloon region of Belgium. ITRN 2011 - Irish Transport Research Network, 2011, Cork, Ireland.  
*« Best paper » dans la catégorie « greening transportation », sélectionné par le comité scientifique de la conférence pour soumission au journal Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Energy (publié).*
9. MARIQUE, A.-F. & REITER, S. Improving energy efficiency of existing suburban areas through district energy planning. ISHVAC 2011, 2011, Shanghai, China.
10. MARIQUE, A.-F., DE MEESTER, T. & REITER, S. Energy requirements and solar availability in suburban areas: the influence of built density in an existing district. CISBAT 2011 - Clean Tech for Sustainable Buildings - From Nano to Urban Scale, 2011, Lausanne, Switzerland. 925-930.
11. MARIQUE, A.-F. & REITER, S. Towards more sustainable neighborhoods: are good practices reproducible and extensible? A review of a few existing “sustainable neighbourhoods”. In: BODARD, M. & EVRARD, A., eds. Passive and Low Energy Architecture, 2011, Louvain-La-Neuve. Presses Universitaires de Louvain, 27-32.
12. MARIQUE, A.-F. & REITER, S. A method to assess transport consumption in suburban areas. PLUREL 2010 - Managing the Urban Rural Interface. Strategies and Tools for Urban Development and Sustainable Peri-urban Land Use Relationships, 2010, Copenhagen, Denmark.
13. MARIQUE, A.-F. & REITER, S. A method to assess energy requirements of suburban areas at the neighbourhood scale. IAQVEC 2010 - International Conference on Indoor Air Quality, Ventilation and Energy Conservation, 2010, Syracuse, USA.  
*Sélectionné par le comité scientifique de la conférence pour soumission, dans une version étendue, au journal HVAC&R Research (publié).*

## **Journaux scientifiques avec peer-reviewing, co-auteur (collaborations scientifiques effectuées dans le cadre de la thèse)**

14. ROSSI, B., MARIQUE, A.-F., GLAUMANN, M. & REITER, S. 2012. Life-cycle assessment of residential buildings in three different European locations, basic tool. *Building & Environment*, 51, 395-401.
15. ROSSI, B., MARIQUE, A.-F. & REITER, S. 2012. Life-cycle assessment of residential buildings in three different European locations, case study. *Building & Environment*, 51, 402-407.
16. DUJARDIN, S., PIRART, F., BREVERS, F., MARIQUE, A.-F. & TELLER, J. 2012. Home-to-work commuting, urban form and potential energy savings: A local scale approach to regional statistics. *Transportation Research. Part A: Policy & Practice*, 46, 1054-1065.

## **Actes de conférences avec peer-reviewing, co-auteur (collaborations scientifiques effectuées dans le cadre de la thèse)**

17. ROSSI, B., MARIQUE, A.-F. & REITER, S. Life-cycle carbon footprint of a residential steel framed building in different climates. *World Sustainable Building Conference: SB11*, 2011, Helsinki.
18. DUJARDIN, S., MARIQUE, A.-F. & TELLER, J. Spatial planning as a driver for change in both mobility and residential energy consumptions. *CISBAT 2011 - Clean Tech for Sustainable Buildings - From Nano to Urban Scale*, 2011, Lausanne, Switzerland. 635-640.  
*Sélectionné par le comité scientifique de la conférence pour être soumis, dans une version étendue, au journal Energy and Buildings. Une version révisée de l'article (minor revisions) a été soumise en octobre 2012.*
19. WALLEMACQ, V., MARIQUE, A.-F. & REITER, S. Development of an urban typology to assess residential environmental performance at the city scale. In: BODARD, M. & EVRARD, A., eds. *Passive and Low Energy Architecture*, 2011, Louvain-La-Neuve. Presses Universitaires de Louvain, 119-125.
20. DE MEESTER, T., MARIQUE, A.-F. & REITER, S. The influence of occupation mode on building heating loads: The case of a detached house located in a suburban area. In: BODARD, M. & EVRARD, A., eds. *Passive and Low Energy Architecture*, 2011, Louvain-La-Neuve. Presses Universitaires de Louvain, 450-456.

# Table des Illustrations

## 1. Figures

Figure II-1	Evolution de l'urbanisation dans l'aire urbaine de Liège, de 1850 à 2010 ©Christophe Breuer, données 2010 du SPF – Finances.	13
Figure II-2	La lecture associant vitesse de déplacement et organisation spatiale urbaine conduit à distinguer trois grands modèles urbains © Newman and Kenworthy (1996) et Halleux and Lambotte (2006).	16
Figure II-3	Etalement urbain en Angleterre, aux Pays-Bas et en Flandres.	23
Figure II-4	Evolution de la taille moyenne et du prix moyen au m <sup>2</sup> des terrains à bâtir vendus en Wallonie ©(CEEW, 2007).	25
Figure II-5	Taille moyenne des terrains à bâtir par commune ©(CEEW, 2007).	25
Figure II-6	Les aires urbaines de Wallonie.	41
Figure II-7	Les noyaux d'habitat de l'INS ©sder.wallonie.be.	42
Figure II-8	Les 25 îlots définis dans le référentiel de densités et de formes urbaines comprennent 7 types d'îlots à caractère périurbain.	45
Figure II-9	Deux quartiers de Liège qui appartiennent tous les deux à l'agglomération opérationnelle de Liège.	45
Figure II-10	Deux quartiers d'Houffalize qui ne sont pas répertoriés dans la classification des aires urbaines.	46
Figure II-11	Répartition des secteurs statistiques selon la densité par hectare.	48
Figure II-12	Identification des secteurs statistiques considérés comme périurbains (densité nette comprise entre 5 et 12 logements par hectare).	49
Figure II-13	Identification des secteurs statistiques dont la densité nette est supérieure à 12 logements par hectare.	49
Figure II-14	Identification des secteurs statistiques dont la densité nette est inférieure à 5 logements par hectare.	50
Figure II-15	Nombre de logements par secteur statistique dit « périurbain » (densité nette comprise entre 5 et 12 logements par hectare).	50

Figure II-16	Nombre de logements présents dans des secteurs statistiques «périurbains», agrégation à l'échelle de la commune.	51
Figure II-17	Exemples de quartiers répondant aux quatre types principaux mis en évidence.	53
Figure III-1	Consommation de carburant et densité urbaine, d'après Newman et Kenworthy, version française par Heran (2001).	58
Figure III-2	Facteurs qui affectent la consommation d'énergie dans le bâtiment Baker and Steemers (2000) ; l'impact de la forme urbaine n'est pas quantifié.	65
Figure III-3	Cadre conceptuel (Ewing and Rong, 2008) pour lier forme urbaine et consommation d'énergie dans le secteur du bâtiment résidentiel.	66
Figure III-4	Modèles d'utilisation des sols en milieu urbain : (i) généralisation du modèle de Burgess aux villes industrielles en croissance, (ii) modèle en secteur de Hoyt et (iii) modèle polynucléaire de Harris et Ullman, adapté de Carter (1995) par Mérenne-Schoumaker (2003).	71
Figure III-5	Boucles de rétroaction transport / urbanisme ©Wegener (1994), cité par Lefèvre (2007) et repris par Desjardins and Llorente (2009).	73
Figure IV-1	Hypothèses posées pour déterminer le mode de transport pour les déplacements du domicile à la gare quand le train est le mode principal utilisé.	98
Figure IV-2	Exemple de résultats.	100
Figure IV-3	Part du chauffage dans la consommation des ménages et répartition des consommations électriques entre postes ©ICEDD (2005).	101
Figure IV-4	Carte indicative des degrés-jours en Wallonie, ©OPTI-maisons.	107
Figure V-1	Cas 1 - Un quartier de type « ruban » à Tintigny-Bellefontaine.	115
Figure V-2	Cas 2 - Un quartier de type « semi-mitoyen » à Fontaine-L'Evêque.	115
Figure V-3	Cas 3 - Un quartier de type « nappe » à Jambes.	115
Figure V-4	Cas 4 - Un quartier de type « mixte » à Rotheux.	116
Figure V-5	Impact des masques (forêt et maisons voisines) pour une habitation « 4 façades ».	118
Figure V-6	Impact des masques sur les besoins en chauffage et les apports solaires d'une maison « 4 façades » implantée dans un quartier présentant une densité de 10 logements à l'hectare.	119
Figure V-7	Exemple de résultats d'une analyse en cycle de vie réalisée avec le logiciel EQUER pour un bâtiment « 4 façades » de 120m <sup>2</sup> et une durée de vie de 80 ans.	120
Figure V-8	Trois composants de quartiers périurbains fictifs présentant respectivement une densité nette de 6, 10 et 12 logements par hectare.	131
Figure V-9	Densification des trois composants de quartiers fictifs.	134
Figure V-10	Cas d'étude : le quartier de type « nappe » de Jambes (Géronsart).	136
Figure V-11	Quatre scénarios de densification.	136
Figure V-12	Comparaison des obstructions générées par les quatre scénarios de densification du quartier, calcul réalisé en un point central, au 15 juin.	137

Figure V-13	Densification du quartier de type « semi-mitoyen » de Fontaine-L-Evêque par du logement collectif de gabarit R+1.	139
Figure V-14	Densification du quartier de type « nappe » de Jambes par du logement collectif de gabarit R+3, dans la zone centrale (J-SC5).	139
Figure V-15	Densification du quartier de type « mixte » de Rotheux par du logement collectif de gabarit R+3, en cœur d'îlot (R-SC1).	140
Figure V-16	Application de la méthode de Littlefair (2009) aux cas d'une maison unifamiliale R+1 sous comble et d'un immeuble de gabarit R+3 à implanter dans un quartier de type périurbain.	142
Figure V-17	Une même densité de logements par hectare peut prendre des formes très différentes (Source : Vivre en Ville, adapté de UrbanTaskForce (1999), <a href="http://www.sagacite.org">www.sagacite.org</a> ).	143
Figure VI-1	Carte de la Wallonie.	152
Figure VI-2	Aires urbaines de Van der Haegen et al. (1996).	154
Figure VI-3	Distance moyenne parcourue pour les déplacements domicile-travail, à l'échelle de l'ancienne commune, données ESE 2001.	155
Figure VI-4	Evolution de la distance moyenne entre 1991 et 2001, à l'échelle de l'ancienne commune, données ESE 2001 et recensement 1991.	155
Figure VI-5	Parts modales du bus pour les déplacements domicile-travail, à l'échelle de l'ancienne commune, données ESE 2001.	157
Figure VI-6	Parts modales du train pour les déplacements domicile-travail, à l'échelle de l'ancienne commune, données ESE 2001.	157
Figure VI-7	Parts modales des modes doux (marche à pied et vélo) pour les déplacements domicile-travail, à l'échelle de l'ancienne commune, données ESE 2001.	158
Figure VI-8	Indice de performance des déplacements domicile-travail, à l'échelle de la commune, données ESE 2001.	159
Figure VI-9	Indice de performance des déplacements domicile-travail, à l'échelle de l'ancienne commune, données ESE 2001.	162
Figure VI-10	Indice de performance des déplacements domicile-travail sur l'aire urbaine de Liège, à l'échelle du secteur statistique, données ESE 2001.	164
Figure VI-11	Consommations annuelles pour les déplacements domicile-travail, à l'échelle de l'ancienne commune, données ESE 2001.	165
Figure VI-12	Evolution de l'indice de performance des déplacements domicile-travail entre 1991 et 2001, à l'échelle de l'ancienne commune, données ESE 2001 et recensements 1991.	166
Figure VI-13	Indice de performance des déplacements domicile-travail, à l'échelle de l'ancienne commune, données ESE 2001.	167
Figure VI-14	Corrélation entre l'indice de performance et la densité nette de population.	170
Figure VI-15	Corrélation entre l'indice de performance des déplacements domicile-travail et l'indice de mixité fonctionnelle.	171
Figure VII-1	Indice de performance des déplacements scolaires, tous niveaux confondus, à l'échelle de l'ancienne commune, données ESE 2001.	182

Figure VII-2	Indice de performance des déplacements domicile-travail, à l'échelle de l'ancienne commune, données ESE 2001.	182
Figure VII-3	Indice de performance des déplacements scolaires pour les niveaux d'enseignement maternel et primaire, à l'échelle de l'ancienne commune, données ESE 2001.	183
Figure VII-4	Indice de performance des déplacements scolaires pour le niveau d'enseignement secondaire, à l'échelle de l'ancienne commune, données ESE 2001.	183
Figure VII-5	Indice de performance des déplacements scolaires pour le niveau d'enseignement supérieur, à l'échelle de l'ancienne commune, données ESE 2001.	184
Figure VII-6	Consommations annuelles pour les déplacements scolaires, tous niveaux confondus, à l'échelle de l'ancienne commune, ESE 2001.	184
Figure VII-7	Ratio « capacité / demande » pour les anciennes communes présentant un ratio supérieur à un pour l'enseignement maternel et primaire.	187
Figure VII-8	Classification des 262 communes wallonnes selon la valeur du ratio « capacité / demande » pour l'enseignement maternel et primaire.	187
Figure VII-9	Ratio « capacité / demande » pour les anciennes communes présentant un ratio supérieur à un pour l'enseignement secondaire.	188
Figure VII-10	Classification des 262 communes wallonnes selon la valeur du ratio « capacité / demande » pour l'enseignement secondaire.	188
Figure VII-11	Ratio « capacité / demande » pour les anciennes communes présentant un ratio supérieur à un pour l'enseignement supérieur.	189
Figure VII-12	Classification des 262 communes wallonnes selon la valeur du ratio « capacité / demande » pour l'enseignement supérieur.	189
Figure VII-13	Indice de performance des déplacements scolaires pour le niveau d'enseignement maternel et primaire, à l'échelle de l'ancienne commune, données ESE 2001.	191
Figure VII-14	Indice de performance des déplacements scolaires pour le niveau d'enseignement secondaire, à l'échelle de l'ancienne commune, données ESE 2001.	192
Figure VII- 15	Indice de performance des déplacements scolaires pour le niveau d'enseignement supérieur, à l'échelle de l'ancienne commune, données ESE 2001.	192

## 2. Tableaux

Tableau II-1	Utilisation du sol (en km <sup>2</sup> et évolution en %), de 1980 à 2009, sur base des chiffres du SPF Economie P.M.E, classes moyennes et Energie © economie.fgov.be/.	12
Tableau II-2	Répartition de l'échantillon par classes de superficie.	54
Tableau II- 3	Répartition de l'échantillon par classes d'âge.	54
Tableau IV-1	Hypothèses sur les classes de distances du recensement de 1991.	90

Tableau IV-2 Hypothèses sur les modes de transport du recensement de 1991.	91
Tableau IV-3 Hypothèses sur les classes de temps de travail du recensement 1991.	91
Tableau IV-4 Synthèse des niveaux scolaires et de leurs caractéristiques principales.	93
Tableau IV-5 Facteurs de consommation utilisés pour convertir des kilomètres parcourus par mode de transport en kWh.	94
Tableau IV-6 Composition et coefficients de transmission thermique des murs selon la période de construction.	103
Tableau IV-7 Caractéristiques des vitrages.	103
Tableau IV-8 Composition et coefficients de transmission thermique des toitures selon la période de construction.	104
Tableau IV-9 Composition et coefficients de transmission thermique des dalles de sol selon la période de construction.	104
Tableau IV-10 Autres caractéristiques.	104
Tableau IV-11 Caractéristiques relatives aux données météorologiques utilisées (Uccle) et comparaison avec Saint-Hubert.	106
Tableau V-1 Caractéristiques principales des 4 cas d'études.	116
Tableau V-2 Résultats de l'évaluation énergétique des 4 cas d'études, par unité de comparaison (kWh/personne.an).	117
Tableau V-3 Consommation de chauffage (kWh/m <sup>2</sup> .an) pour différents scénarios d'orientation et d'isolation.	122
Tableau V-4 Diminution des consommations de chauffage des quatre quartiers-types, pour cinq scénarios de rénovation énergétique.	124
Tableau V-5 Consommation de chauffage (kWh/m <sup>2</sup> .an) pour une maison de 120m <sup>2</sup> et pour différents scénarios de mitoyenneté, d'orientation et d'isolation.	125
Tableau V-6 Résultats des variations paramétriques.	126
Tableau V-7 Résultats des variations paramétriques : diminution des consommations globales (bâtiment + transport) pour 7 scénarios.	128
Tableau V-8 Diminution des besoins de chauffage du composant de quartier-fictif D1, pour cinq scénarios de rénovation énergétique.	132
Tableau V-9 Diminution des besoins de chauffage du composant de quartier-fictif D2, pour cinq scénarios de rénovation énergétique.	132
Tableau V-10 Diminution des besoins de chauffage du composant de quartier-fictif D3, pour cinq scénarios de rénovation énergétique.	132
Tableau V-11 Epaisseurs d'isolant, caractéristiques des vitrages et ventilation pour atteindre les standard « PEB », « basse énergie » et « passif » pour un bâtiment « 4 façades » de 160m <sup>2</sup> .	133
Tableau V-12 Besoins de chauffage et apports solaires, avant et après doublement de la densité des trois quartiers-fictifs.	134
Tableau V-13 Réduction potentielle des besoins de chauffage, pour 4 scénarios de densification.	137
Tableau V-14 Réduction maximum de l'ensoleillement sur un point central des toitures existantes, pour les différents scénarios de densification.	141

Tableau V-15	Réduction maximum de l'ensoleillement sur un point central des façades existantes, situé à deux mètres du sol, pour les différents scénarios de densification.	141
Tableau V-16	Besoins de chauffage (kWh/m <sup>2</sup> .an) du quartier de type « nappe » de Jambes en l'état actuel, dans l'optique d'une rénovation des bâtiments existants au standard PEB et pour deux scénarios de reconstruction (en barres et en îlots).	145
Tableau VI-1	Distances parcourues pour les déplacements domicile-travail, données ESE 2001.	153
Tableau VI-2	Distances parcourues pour les déplacements domicile-travail, selon le type d'aire urbaine, données ESE 2001.	153
Tableau VI-3	Parts modales pour les déplacements domicile-travail, données ESE 2001 et recensement 1991.	156
Tableau VI-4	Indice de performance moyen pour les déplacements domicile-travail, selon la classification des aires urbaines de Sporck et al. (1985) et Van der Haegen et al. (1996), distances moyennes et parts modales des transports en commun.	160
Tableau VI-5	Classements des 30 communes présentant l'indice de performance domicile-travail le plus faible (à gauche) et des 30 communes présentant l'indice de performance le plus élevé.	161
Tableau VI-6	Indice de performance moyen des déplacements domicile-travail pour trois classes de densité, à l'échelle du secteur statistique, données ESE 2001.	163
Tableau VI-7	Comparaison des indices de performance moyens des déplacements domicile-travail en Wallonie, en Flandre, à Bruxelles et en Belgique, kWh/trajet.travailleur, données ESE 2001.	167
Tableau VI-8	Résultats des corrélations bivariées (coefficient de Pearson).	170
Tableau VI-9	Résultats des corrélations bivariées (coefficient de Pearson) entre la part modale des modes doux (marche à pied et vélo) et le nombre d'emplois à 1, 2, 3, 4, 5 et 10 kilomètres.	171
Tableau VI-10	Résultats des analyses de régressions linéaires multiples.	173
Tableau VII-1	Parts modales pour les déplacements scolaires, selon le niveau de scolarité, et parts modales pour les déplacements domicile-travail, données ESE 2001.	178
Tableau VII-2	Distances parcourues pour les déplacements scolaires, selon le niveau de scolarité, et distances parcourues pour les déplacements domicile-travail, données ESE 2001.	178
Tableau VII-3	Comparaison des indices de performance moyens des déplacements scolaires en Wallonie, en Flandre, à Bruxelles et en Belgique, kWh/trajet.étudiant, données ESE 2001.	191
Tableau VII-4	Résultats des régressions linéaires multiples, pour les trois niveaux de scolarité.	194

# Table des Matières

<b>CHAPITRE I : INTRODUCTION GENERALE</b>	<b>1</b>
1. CONTEXTE DE LA RECHERCHE	1
2. OBJET DE LA THESE	4
3. STRUCTURE DE LA THESE	5
<b>CHAPITRE II : L'ETALEMENT URBAIN</b>	<b>8</b>
1. INTRODUCTION	8
2. GRANDES TENDANCES EN WALLONIE	10
2.1. Un phénomène de long terme toujours d'actualité.	10
2.2. Des causes multiples	14
2.2.1. <i>Les contraintes de mobilité et les infrastructures</i>	14
2.2.2. <i>Les évolutions sociétales et les préférences des habitants</i>	17
2.2.3. <i>Les réglementations et politiques</i>	19
2.3. Des caractéristiques	22
2.3.1. <i>La dispersion spatiale</i>	22
2.3.2. <i>Une faible densité.</i>	23
2.3.3. <i>La monofonctionnalité.</i>	26
2.4. Des conséquences	26
2.4.1. <i>La dépréciation des espaces centraux traditionnels.</i>	26
2.4.2. <i>Une source d'inégalités socio-spatiales.</i>	26
2.4.3. <i>Les surcoûts de la désurbanisation</i>	27
2.4.4. <i>La banalisation des formes produites</i>	28
2.4.5. <i>Des conséquences non compatibles avec les principes du DD</i>	28
2.4.6. <i>Des avantages aussi</i>	29
2.5. Des interrogations	30
2.5.1. <i>Le vieillissement des espaces déjà urbanisés</i>	30
2.5.2. <i>La pérennité du modèle</i>	30
2.5.3. <i>La perpétuation du modèle périurbain</i>	30

2.6. Des documents d'orientation et des politiques sectorielles	31
2.6.1. <i>En matière d'aménagement du territoire et d'utilisation des sols</i>	31
2.6.2. <i>En matière de transport et de mobilité</i>	34
2.6.3. <i>En matière d'efficacité énergétique des quartiers et bâtiments</i>	35
2.6.4. <i>Les incidences pratiques de ces politiques</i>	37
3. DÉFINITION DU CHAMP DE L'ÉTUDE	38
3.1. Les définitions existantes	38
3.1.1. <i>La spatialisation de l'étalement urbain</i>	38
3.1.2. <i>Les typologies de quartiers existantes</i>	42
3.1.3. <i>Synthèse et confrontation à notre objet de recherche</i>	45
3.2. Une définition morphologique de l'étalement urbain et des quartiers périurbains	46
3.2.1. <i>Une définition spatiale morphologique</i>	47
3.2.2. <i>Une typologie des quartiers périurbains wallons</i>	52
3.2.3. <i>Une typologie de logements périurbains</i>	54
3.2.4. <i>Limites de notre approche</i>	55
<b>CHAPITRE III : ENERGIE ET FORME URBAINE</b>	<b>56</b>
1. INTRODUCTION	56
2. FORME URBAINE ET ÉNERGIE, ÉTAT DE L'ART	58
2.1. Forme urbaine et transport	58
2.2. Forme urbaine et bâtiment	63
2.3. Forme urbaine, transport et bâtiment	68
3. MÉTHODES D'ÉVALUATION ÉNERGÉTIQUE EXISTANTES	70
3.1. Les modèles et méthodes relatives au transport	70
3.1.1. <i>Les modèles de base de l'économie spatiale</i>	70
3.1.2. <i>Les modèles de base de l'écologie urbaine</i>	70
3.1.3. <i>Les modèles d'interactions spatiales et de prédiction des flux</i>	72
3.1.4. <i>Les méthodes basées sur des enquêtes statistiques</i>	74
3.1.5. <i>Les méthodes simplifiées</i>	77
3.2. Les méthodes relatives au bâtiment et au quartier	79
3.2.1. <i>Les méthodes basées sur des modèles mathématiques</i>	79
3.2.2. <i>Les méthodes d'analyse en cycle de vie (ACV)</i>	81
3.2.3. <i>Les méthodes simplifiées de type « check list »</i>	83
4. SYNTHÈSE ET POSITIONNEMENT DE LA THÈSE	84
<b>CHAPITRE IV : MÉTHODE D'EVALUATION ENERGÉTIQUE</b>	<b>87</b>
1. INTRODUCTION ET OBJECTIFS	87
2. EVALUATION ÉNERGÉTIQUE DES DÉPLACEMENTS	88
2.1. Objectifs	88
2.2. Données et hypothèses	89
2.2.1. <i>Les déplacements domicile-travail</i>	90
2.2.2. <i>Les déplacements scolaires</i>	92

2.3.	Méthode	93
2.3.1.	<i>Les facteurs de consommation</i>	93
2.3.2.	<i>Les indices de performance des déplacements</i>	96
2.3.3.	<i>Les autres indices</i>	96
2.3.4.	<i>Deux modules complémentaires</i>	97
3.	EVALUATION ÉNERGÉTIQUE DES BÂTIMENTS	101
3.1.	Objectifs	101
3.2.	Données et hypothèses générales	101
3.3.	Méthode et hypothèses de calculs	102
3.3.1.	<i>La classification typologique des bâtiments</i>	102
3.3.2.	<i>Les simulations thermiques dynamiques</i>	105
3.3.3.	<i>Les hypothèses de calcul</i>	106
3.3.4.	<i>Consommations énergétiques, à l'échelle du quartier</i>	108
4.	CYCLE DE VIE DES BÂTIMENTS	108
4.1.	Objectifs	108
4.2.	Outil et hypothèses	108
4.2.1.	<i>Les inventaires utilisés</i>	109
4.2.2.	<i>Les matériaux de construction</i>	109
4.2.3.	<i>L'énergie</i>	110
4.2.4.	<i>L'eau</i>	110
4.2.5.	<i>Les déchets</i>	110
4.2.6.	<i>Le transport des personnes</i>	110
5.	GISEMENT SOLAIRE	111
5.1.	Objectifs	111
5.2.	Outils et hypothèses	111
6.	REPRODUCTIBILITÉ, LIMITATIONS ET TYPES D'APPLICATIONS	112
	<b>CHAPITRE V : APPLICATIONS ET SCÉNARIOS PROSPECTIFS</b>	<b>114</b>
1.	INTRODUCTION ET OBJECTIFS	114
2.	CAS D'ÉTUDES	114
3.	EVALUATION ENERGETIQUE	117
4.	VARIATIONS PARAMÉTRIQUES	120
4.1.	Les paramètres relatifs à la forme urbaine	121
4.1.1.	<i>La mitoyenneté</i>	121
4.1.2.	<i>L'orientation du quartier</i>	121
4.1.3.	<i>La consommation des bâtiments en phase d'utilisation</i>	123
4.1.4.	<i>Le croisement des paramètres</i>	124
4.2.	Les paramètres relatifs aux déplacements	126
4.3.	L'approche combinée	128
5.	SCÉNARIOS DE RENOUVELLEMENT PÉRIURBAIN	130
5.1.	La rénovation énergétique	130
5.2.	La densification	133
5.2.1.	<i>Densification des quartiers fictifs par du logement individuel</i>	134
5.2.2.	<i>Densification d'un quartier existant par du logement individuel</i>	135

5.2.3. <i>Densification des quartiers-types par du logement collectif</i>	138
5.2.4. <i>Limites de l'approche par la densité</i>	142
5.3. La démolition / reconstruction	145
6. SYNTHÈSE ET GÉNÉRALISATION	147
 <b>CHAPITRE VI : DÉPLACEMENTS DOMICILE-TRAVAIL, ENERGIE ET STRUCTURE DU TERRITOIRE</b>	 <b>150</b>
1. OBJECTIFS ET RAPPEL	150
2. ZONE D'ÉTUDE	152
3. DISTANCES PARCOURUES ET PARTS MODALES	153
3.1. Les distances parcourues	153
3.2. Les parts modales en 2001	156
4. CONSOMMATIONS D'ÉNERGIE ET STRUCTURE DU TERRITOIRE	158
4.1. Indice de performance	158
4.2. Consommations annuelles	164
4.3. Evolution 1991-2001	165
4.4. Comparaison nationale	167
5. VARIABLES EXPLICATIVES	168
5.1. Corrélations bivariées	168
5.2. Régressions linéaires multiples	171
6. LIMITATIONS ET REPRODUCTIBILITÉ	173
7. CONCLUSIONS ET INCIDENCES PRATIQUES	174
 <b>CHAPITRE VII : DÉPLACEMENTS SCOLAIRES, ENERGIE ET STRUCTURE DU TERRITOIRE</b>	 <b>176</b>
1. OBJECTIFS ET RAPPELS	176
2. DISTANCES PARCOURUES ET PARTS MODALES	178
2.1. Etat des lieux	178
2.2. Tendances d'évolution	180
3. CONSOMMATION D'ENERGIE ET STRUCTURE DU TERRITOIRE	181
3.1. Indice de performance et niveau de scolarité	181
3.2. Comparaison nationale	190
4. VARIABLES EXPLICATIVES	193
5. LIMITATIONS ET REPRODUCTIBILITE	194
6. CONCLUSION ET INCIDENCES PRATIQUES	195
 <b>CHAPITRE VIII : CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES</b>	 <b>197</b>
1. SYNTHÈSE DES PRINCIPAUX RESULTATS DE LA THÈSE	197
1.1. Développement d'une instrumentation	197
1.2. Investigation des liens entre structure du territoire et consommations d'énergie	198

2.	LE RENOUVELLEMENT PÉRIURBAIN, UN CONCEPT À OPÉRATIONNALISER	200
3.	PERSPECTIVES DE RECHERCHES FUTURES	202
3.1.	La reproduction des analyses	203
3.2.	Le renouvellement des données relatives au transport	204
3.3.	La mobilité active et la mobilité des enfants	204
3.4.	La démolition/reconstruction des quartiers	205
<b>BIBLIOGRAPHIE</b>		<b>206</b>
<b>LISTE DES PUBLICATIONS RÉDIGÉES DANS LE CADRE DE LA THÈSE</b>		<b>221</b>
<b>TABLE DES ILLUSTRATIONS</b>		<b>226</b>
<b>TABLE DES MATIÈRES</b>		<b>232</b>

