

**THEME 2B**  
**Structuration du territoire pour répondre aux objectifs de  
réduction des émissions de gaz à effet de serre**

**SUBVENTION 2010-2011**  
**Octobre 2011**

**RAPPORT FINAL**



Pilote : Jacques TELLER, Lepur-ULg

Chercheurs Lepur-ULg :

1<sup>ère</sup> année: Sébastien DUJARDIN, France-Laure LABEEUW, Eric MELIN, François PIRART

2<sup>ème</sup> année: Florence BREVERS, Sébastien DUJARDIN, François PIRART

## TABLE DES MATIÈRES

<b>1. INTRODUCTION</b> .....	<b>3</b>
<b>2. CONTEXTE ET DONNEES DE CADRAGE</b> .....	<b>5</b>
<b>3. FINALISATION DES MODELES BATI ET MOBILITE</b> .....	<b>6</b>
3.1 ACTUALISATION DU MODÈLE RELATIF AU BÂTI RÉSIDENTIEL.....	6
3.1.1 <i>Rappel de la méthodologie utilisée</i> .....	6
3.1.1.1 Modélisation des dynamiques à l'œuvre dans le parc résidentiel en Wallonie.....	7
3.1.1.2 Modélisation physique du parc résidentiel en Wallonie.....	10
3.1.1.3 Analyse de la consommation énergétique du bâti résidentiel en Wallonie.....	13
3.1.1.4 Actualisation du modèle.....	14
3.2 ACTUALISATION DU MODELE RELATIF A LA MOBILITE DOMICILE-TRAVAIL.....	19
3.2.1 <i>Rappel synthétique de la méthodologie utilisée</i> .....	19
3.2.1.1 Indice de performance environnementale des déplacements domicile-travail.....	19
3.2.1.2 Traitement des données du recensement de 1991 et de l'enquête socio-économique de 2001.....	20
3.2.2 <i>Cadastre des émissions de GES des déplacements domicile-travail</i> .....	21
3.2.2.1 Actualisation du modèle.....	21
3.2.3 <i>Minimum commuting distance et excess commuting</i> .....	24
3.2.3.1 Minimum commuting distance.....	24
3.2.3.2 Excess commuting.....	29
<b>4. ANALYSES STATISTIQUES POUR L'IDENTIFICATION DE VARIABLES TERRITORIALES STRUCTURANTES PERMETTANT D'EXPLIQUER LES EMISSIONS DE GES</b> .....	<b>31</b>
4.1 ANALYSES DE REGRESSION LINEAIRE MULTIPLE.....	31
4.1.1 <i>Préparation des données</i> .....	32
4.1.2 <i>Choix et modalités d'utilisation des variables</i> .....	33
4.1.3 <i>Résultats et interprétation</i> .....	34
4.1.4 <i>Limitations</i> .....	38
4.1.5 <i>Conclusions</i> .....	38
4.2 MODELES D'EQUATIONS STRUCTURELLES (MES).....	39
4.2.1 <i>Préparation des données</i> .....	40
4.2.2 <i>Choix et modalités d'utilisation des variables</i> .....	41
4.2.3 <i>Résultats et interprétation</i> .....	41
4.2.4 <i>Limitations</i> .....	46
4.2.5 <i>Conclusions</i> .....	46
4.3 TYPOLOGIE DE LA FORME URBAINE SUR BASE DE TROIS VARIABLES STRUCTURANTES.....	48
<b>5. ELABORATION DE SCENARII PROSPECTIFS DE STRUCTURATION DU TERRITOIRE A L'HORIZON 2040</b> .....	<b>51</b>
5.1 SYNTHÈSE DES METHODOLOGIES ANALYSEES.....	51
5.1.1 <i>Etude CPDT 2010 « effets du pic pétrolier sur le territoire »</i> .....	51
5.1.2 <i>Etude CPDT 2010 « méthodologie pour un Plan de Secteur durable »</i> .....	53
5.1.3 <i>Etude PUCA-PREBAT</i> .....	55
5.2 CONSTRUCTION DE SCENARII PROSPECTIFS EN MATIERE DE STRUCTURATION DU TERRITOIRE EN WALLONIE.....	56
5.2.1 <i>Approche contrastée</i> .....	56
5.2.1.1 Scénario de référence.....	56
5.2.1.2 Scénario "concentration".....	58
5.2.1.3 Scénario "dispersion".....	58
5.2.2 <i>Approche détaillée</i> .....	60
5.2.2.1 Modèles de structure du territoire et description des scénarii.....	60
5.2.2.2 Évolution de deux variables d'entrée clés.....	62
5.2.2.3 Calcul des variables du modèle.....	66
5.2.2.4 Modèle d'estimation des valeurs d'IPE attendues.....	67
5.2.2.5 Principaux résultats.....	69
5.2.2.6 Précautions et limitations.....	82
<b>6. CONCLUSIONS</b> .....	<b>83</b>
<b>7. DIFFUSION DES RÉSULTATS ET COMMUNICATIONS</b> .....	<b>86</b>

---

TABLE DES MATIERES

---

7.1	ARTICLES DANS DES REVUES .....	86
7.2	ACTES DE COLLOQUES .....	86
7.3	PUBLICATIONS DE VULGARISATION .....	86
<b>8.</b>	<b>RÉFÉRENCES .....</b>	<b>87</b>
8.1	RAPPORTS DE SUBVENTION CPDT .....	87
8.2	BIBLIOGRAPHIE .....	87
<b>9.</b>	<b>ANNEXES .....</b>	<b>88</b>
9.1	ANNEXE - CONSOMMATION ÉNERGÉTIQUE DU BÂTI RÉSIDENTIEL EN WALLONIE PAR SECTEUR STATISTIQUE ET PAR COMMUNE (2009) .....	89
9.2	ANNEXE - ÉMISSIONS DE GES DU BÂTI RÉSIDENTIEL EN WALLONIE PAR SECTEUR STATISTIQUE ET PAR COMMUNE (2009) .....	90
9.3	ANNEXE - CONSOMMATIONS ÉNERGETIQUES DES DÉPLACEMENTS DOMICILE-TRAVAIL EN WALLONIE PAR SECTEUR STATISTIQUE ET PAR COMMUNE (2001) .....	91
9.4	ANNEXE - ÉMISSIONS DE GES MOYENNES DES DÉPLACEMENTS DOMICILE-TRAVAIL EN WALLONIE PAR SECTEUR STATISTIQUE ET PAR COMMUNE (2001) .....	92
9.5	ANNEXE - ÉVOLUTION DES DISTANCES MOYENNES DES DÉPLACEMENTS DOMICILE-TRAVAIL EN WALLONIE ENTRE 1991 ET 2001 PAR COMMUNE .....	93
9.6	ANNEXE – RÉSULTATS DES TESTS DE KOLMOGOROV-SMIRNOV .....	94
9.7	ANNEXE - LISTE DES VARIABLES INTERVENANT DANS LES MODÈLES .....	95
9.8	ANNEXE - CARTOGRAPHIE DES HYPOTHESES SUR L'ÉVOLUTION 2001-2040 DE LA POPULATION .	96
9.9	ANNEXE - CARTOGRAPHIE DES HYPOTHESES SUR L'ÉVOLUTION 2001-2040 DE L'EMPLOI .....	97

## 1. INTRODUCTION

En vertu du protocole de Kyoto et de l'accord communautaire de « partage de la charge », la Belgique est tenue de réduire ses émissions de gaz à effet de serre de 7,5% d'ici 2012 par rapport à 1990, année de référence (CNC 2010). La protection du climat est toutefois de compétence régionale en Belgique. Cet document présente une recherche relative à l'impact de la structuration du territoire sur les émissions de gaz à effet de serre (GES) à l'horizon 2040. A titre de comparaison, la Commission Européenne s'est fixé un objectif de réduction des émissions de GES globales en 2050 de 80% par rapport à 1990 (EC 2011).

Le postulat adopté dans ce travail rejoint la thèse de Susan Owens (1986) qui avançait, dès les années 1980, que les facteurs de structuration territoriale, s'ils sont peu susceptibles à eux seuls de produire des effets significatifs à court terme en matière de consommation énergétique, sont caractérisés par un faible degré de réversibilité et influencent de manière décisive les réponses techniques qui pourraient être avancées pour faire face aux enjeux climatiques.

L'étude de la relation entre structure du territoire et émissions de GES s'est rapidement centrée sur des questions de localisation des activités et des ménages ainsi que sur l'analyse des performances du parc de bâtiments résidentiels. Trois champs de variables ont été prospectés à cette fin : les variables territoriales bien sûr, mais également socio-économiques et technologiques, ces deux derniers champs de variables étant susceptibles de conditionner les effets que l'on peut attendre d'actions à mener en terme d'aménagement du territoire. En fin de première année, cette recherche a abouti à l'élaboration de deux cadastres énergétiques : l'un reprenant les performances énergétiques des déplacements domicile-travail, l'autre les performances énergétiques des bâtiments résidentiels (cf. rapport final de la subvention 2009-2010).

Bien qu'en évolution continue, nous considérons que la structure territoriale est avant tout caractérisée par une très grande inertie, que ce soit en termes de localisation, de morphologie des tissus urbanisés ou même de qualité des objets bâtis. Nous défendons une approche pragmatique, basée sur une connaissance fine des différents types d'urbanisation observables sur le territoire. Une telle approche, semi-empirique, nous démarque clairement d'un discours de transformation radicale, basé sur des modèles théoriques que nous jugeons, d'une part, mal adaptés à la réalité de nos territoires et, d'autre part, non pertinents pour l'élaboration contextualisée d'actions aptes à répondre aux défis climatiques à l'horizon 2040.

La revue de la littérature scientifique francophone et anglo-saxonne a permis de mettre en évidence quatre grands types de variables qui interviennent dans la détermination des comportements de mobilité et d'habiter (figure 1) :

1. les formes d'organisation territoriale ;
2. les caractéristiques socioéconomiques ;
3. les facteurs technologiques ;
4. les comportements.

Ces variables interagissent entre elles et, ensemble, influencent les émissions de gaz à effet de serre. Notons que les variables technologiques et socioéconomiques sont des facteurs jugés comme « externes », car les mesures de l'aménagement du territoire ne peuvent pas les influencer de manière directe. Cependant, elles sont souvent identifiées comme des variables explicatives fortes et, par conséquent, sont prises en compte ponctuellement dans notre modèle d'analyse.

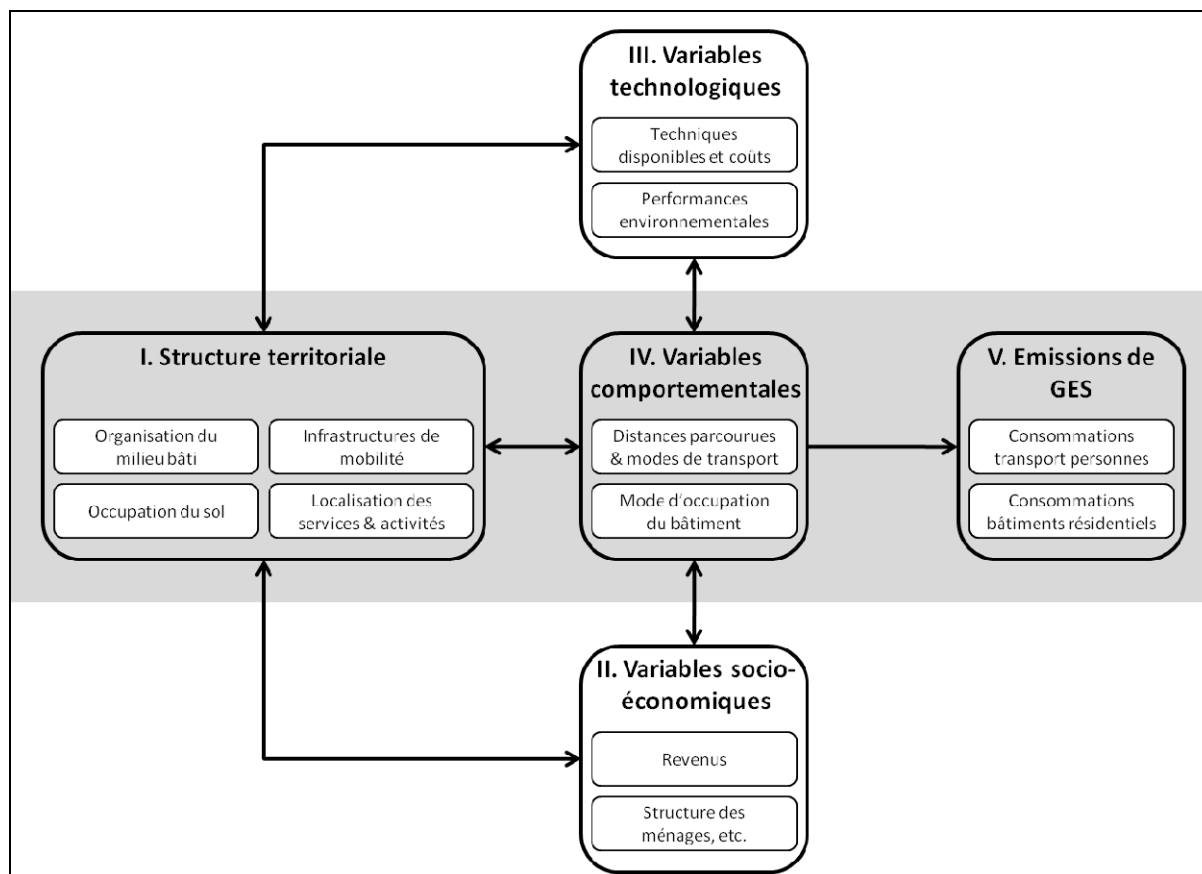


Figure 1. Modèle général de la démarche adoptée au cours de la recherche

## 2. CONTEXTE ET DONNEES DE CADRAGE

Dans le cadre de la Déclaration de Politique Régionale (DPR) du 16 juillet 2009, le Gouvernement wallon s'est engagé dans les démarches d'actualisation du Schéma de Développement de l'Espace Régional (SDER) et d'élaboration du Plan Air-Climat-Energie (sur base de l'actuel plan Air-Climat et du projet de Plan pour la Maîtrise Durable de l'Énergie). Il fait également part de son intention d'adopter un décret régional « climat » qui inscrira dans la législation des objectifs généraux et sectoriels de réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES). Le futur Plan « Air-Climat-Énergie » regroupera les mesures nécessaires à la réalisation des objectifs fixés par le décret et proposera des actions, parmi lesquelles certaines viseront à structurer le territoire de façon à réduire les besoins en énergie et limiter les émissions de GES.

Le Gouvernement wallon vise ainsi à apporter une réponse efficace aux défis climatiques, énergétiques et de mobilité à l'aide d'objectifs chiffrés et d'indicateurs. Parmi ces objectifs, il s'engage notamment à poursuivre une stratégie qui permette de réduire les émissions de GES de 30% d'ici 2020 et de 80 à 95% d'ici 2050.

Echelle	Année de référence	Objectifs de réduction des émissions de GES par rapport à l'année de référence	Source
Monde	1990	25-40% d'ici 2020 80-95% d'ici 2050 (pays industrialisés)	GIEC (2007)
	2000	50-85% d'ici 2050 (pays industrialisés)	GIEC (2007)
	1990	5,2% d'ici 2012	Protocole de Kyoto (1997)
	1990	50% d'ici 2050 (accord non contraignant)	Conférence de Copenhague (2009)
Union européenne	1990	20% d'ici 2020 30% si engagement des autres pays industrialisés	Accord de Copenhague (2009)
	2005	Secteurs couverts par le système ETS : 21% d'ici 2020 Secteurs non couverts par le système ETS (dont transports et logement): 10% d'ici 2020	Parlement européen (paquet « Energie-Climat » du 17 décembre 2008)
Belgique	1990	7,5% d'ici 2012	Protocole de Kyoto (1997)
Région wallonne	1990	7,5% d'ici 2012	Accord de coopération entre Régions (2004)
	1990	30% d'ici 2020	Déclaration de Politique Régionale 2009-2014

**Tableau 1. Synthèse des objectifs de réduction des émissions de GES selon les différents niveaux de pouvoir**

### 3. FINALISATION DES MODELES BATI ET MOBILITE

#### 3.1 ACTUALISATION DU MODÈLE RELATIF AU BÂTI RÉSIDENTIEL

##### 3.1.1 Rappel de la méthodologie utilisée

La question de la réduction des émissions de GES dans le secteur résidentiel doit se comprendre comme la somme d'actions sur un ensemble de paramètres très différents. Plusieurs facteurs entrent en jeu :

- La performance thermique des constructions: un bâtiment ancien présente généralement un taux de déperdition énergétique plus élevé qu'une construction récente, cela en raison des matériaux utilisés et de leur mise en œuvre. Néanmoins, les mouvements de rénovation ne doivent pas pour autant être négligés.
- La morphologie (notamment la compacité du tissu): celle-ci influe positivement sur les émissions de GES en réduisant la surface de déperdition entre le volume protégé et l'air extérieur, mais peut également agir négativement en augmentant les effets de masques solaires. Les gains par rayonnement solaire direct sont les plus sensibles dans le cas d'un haut taux de vitrage.
- Les mouvements internes au stock bâti: renouvellement et remobilisation permettent quant à eux d'évaluer le rythme d'amélioration énergétique des tissus urbanisés et l'évolution des besoins en surface chauffée.
- Les équipements et les énergies utilisées : un système de chauffage ancien peut consommer jusqu'à deux fois plus qu'un système récent. De plus, chaque vecteur énergétique utilisé présente un taux d'émissions de GES qui lui est propre.
- Les apports internes et le comportement des habitants : les modalités d'occupation du bâtiment font varier les besoins en régulation thermique. Le comportement influe notamment sur la température interne moyenne des locaux chauffés suivant la sensibilité des occupants. La durée estimée ou réelle de la période de chauffe (heures où le chauffage est allumé) est un élément qui impacte directement les consommations énergétiques.
- L'environnement : les températures extérieures ont une influence directe sur les besoins énergétiques des bâtiments. Elles varient de manière significative en fonction de l'altitude et de la continentalité selon un zonage sud-ouest - nord-est. L'insolation, qui dépend de la localisation et de l'orientation des tissus construits, influence les apports passifs dont le bâtiment pourrait bénéficier.

Nous avons choisi de dissocier les paramètres liés à la réalité constructive et morphologique du stock bâti résidentiel wallon de ceux liés à son équipement énergétique. En effet, nous considérons qu'il s'agit ici de deux leviers distincts de réduction des émissions GES, et leur analyse doit se faire de manière dissociée. Nous avons donc décidé de mettre en avant les indicateurs morphologiques en analysant dans un premier temps les besoins nécessaires à la régulation thermique des logements. Les variables dont l'influence sur ces besoins en Wallonie est présumée sont ensuite construites. Les consommations énergétiques et les émissions de GES dépendent du croisement des besoins de régulation thermique et d'un système de production et de vecteurs d'énergie. Nous n'intégrons pas les comportements des occupants.

Afin d'estimer les performances énergétiques des tissus urbanisés à l'échelle régionale, nous nous sommes basés sur une modélisation de l'enveloppe de l'ensemble des bâtiments résidentiels de la région, soit 1.300.000 bâtiments recensés en Wallonie. Cette modélisation a été élaborée à partir de données cadastrales (base de donnée Cadmap) et de photogrammétrie aérienne (Projet Informatique de Cartographie Continue ou PICC). La base de données que nous avons constituée reprend ainsi, pour chaque bâtiment, sa localisation, sa date de construction, son emprise au sol et le pourcentage de mitoyenneté qui le caractérise. Les caractéristiques techniques de l'enveloppe sont inférées sur base de l'âge du logement, en nous basant sur deux sources principales : le volet logement de l'enquête socio-économique générale (ESE) de 2001 (plus de 1.300.000 logements recensés) (Vanneste et al. 2007) et l'enquête qualité du logement réalisée par la Région wallonne en 2006 (plus de 6.000 logements sondés) (MRW 2007). L'estimation des besoins de chauffage est basée sur la méthode du BE500 (Uyttenbroeck et Carpentier 1984). Cette méthode de calcul nous permet en effet de prendre adéquatement en compte les variables climatiques, les apports internes et solaires ainsi que l'inertie du bâtiment. Pour les besoins énergétiques du bâtiment, nous nous sommes basés sur des données de l'ADEME (2007) pour déterminer les taux d'émissions de GES de différents vecteurs de chauffage (gazole de chauffage, gaz naturel, GPL et électricité), en tenant compte de facteurs de conversion et de leurs incertitudes. L'ensemble de ces données est appliqué aux consommations actuelles et passées.

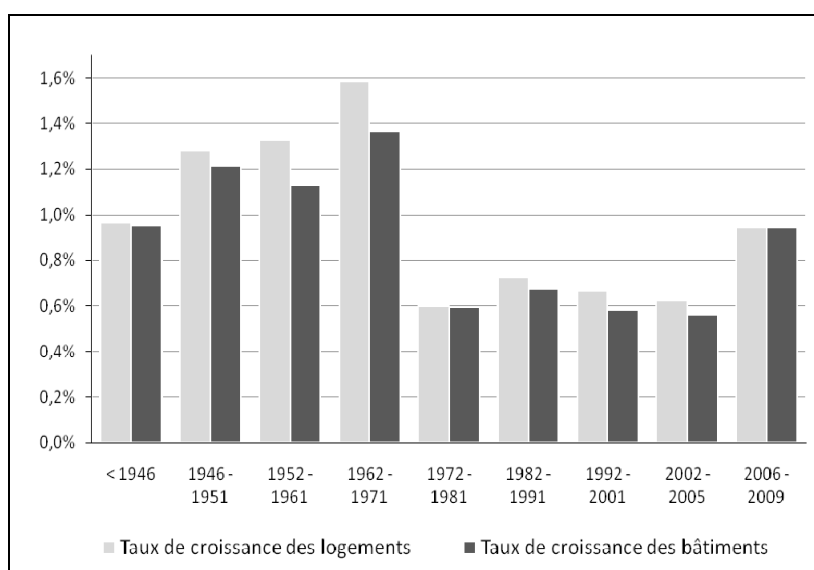
La date de construction des bâtiments est considérée ici comme une information clef pour la modélisation des besoins énergétiques du stock résidentiel wallon. Pour évaluer les émissions de GES des bâtiments, nous avons donc opéré une segmentation du stock de logements par classe d'âge. Chaque classe d'âge a été bornée en fonction, d'une part, de l'évolution des traditions constructives et, d'autre part, de l'évolution des réglementations thermiques. C'est la raison pour laquelle les classes retenues ne sont pas homogènes et différent des classes d'âges de l'enquête socio-économique de 2001 ou de l'enquête qualité logement de 2006. Cinq périodes de construction significatives sont déterminées : « avant 1945 », « 1946-1970 », « de 1971 à 1985 », « de 1986 à 1996 », « 1997-2009 ». Ce choix est basé sur l'évolution des modes constructifs pour les trois premiers segments : 1945, généralisation des murs creux et 1970, diffusion des murs creux de deuxième génération et apparition de l'isolation des coulisses. Les deux derniers segments sont définis sur base de l'application des réglementations thermiques en Wallonie (1985, puis 1996). Les plus récentes réglementations thermiques datent de 2004 et 2006. Au vu du faible nombre de logements construits d'après ces normes par rapport à l'ensemble du stock, nous avons choisi de les intégrer à la dernière classe d'âge.

### ***3.1.1.1 Modélisation des dynamiques à l'œuvre dans le parc résidentiel en Wallonie***

Les données liées à la taille de la population et au nombre de ménages sont des informations qui conditionnent la demande de logements. La population wallonne comptait 3.435.879 habitants en 2007 (SPF Economie - DGSIE, 2008). Les perspectives de population 2007-2060 du Bureau fédéral du plan (2008) envisagent que le rythme d'augmentation de la population wallonne sera plus soutenu jusqu'en 2017 (+ 7,1 % de 2007 à 2017) par rapport aux dix années précédentes (+ 3,5 % de 1997 à 2007). En 2007, la Wallonie comptait 1.473.054 ménages privés (par distinction aux ménages collectifs comme les résidences pour personnes âgées, les prisons...). Le nombre de ménages privés croît plus rapidement que la population : + 10,7 % contre + 3,7 % entre 1995 et 2007, en raison de l'érosion progressive de la taille des ménages. La taille moyenne des ménages privés a affiché un recul de 6,4 % sur la même période, en passant de 2,48 personnes par ménage en 1995 à 2,33 personnes vivant sous le même toit en 2007.



L'information principale permettant de caractériser la dynamique du parc est celle de son taux de croissance annuel. Les bases de données convoquées pour obtenir cette information clef sont d'une part les données de l'Institut Wallon de la Prospective et de la Statistique (IWEPS) de 2010 sur la dynamique de construction neuve dans le secteur résidentiel, et d'autre part les statistiques du SPF Economie DGSIE de 2009 basées sur le cadastre. Sur base de ces données, nous avons mené une première estimation du taux d'accroissement moyen du parc de logement : le résultat obtenu est 0,71 % par an sur la période 1991-2001. Ce taux d'accroissement du parc de logement a ensuite été affiné. Une analyse de plus large spectre historique a été menée sur la base des données du cadastre 2009 (Figure 2). Une comparaison entre le taux d'accroissement du parc de logements et du parc des bâtiments est rendue possible par l'utilisation d'un tel set de données.



**Figure 2. Taux d'accroissement annuel du parc de logement et du parc de bâtiment en Wallonie depuis 1945. Source : Cadmap 2009, SPF Economie - DGSIE.**

On observe une forte cassure dans la dynamique d'accroissement du parc. Après le boom économique des trente glorieuses, suite aux crises économiques et la crise énergétique des années septante, le taux d'accroissement du parc de logement chute de plus de 50% (1,60 % en 1971 et 0,60 % en 1981), pour se stabiliser autour des 0,65 % par an jusqu'à 2005. Sur une dynamique identique à celle observée pour le parc de bâtiments, on note une augmentation du taux d'accroissement du parc de logements entre 2006 et 2009, où il atteint 0,95 % par an. L'écart entre le taux de croissance du parc de bâtiments et celui des logements se creuse entre 1952 et 1972. Cette tendance peut être expliquée par deux phénomènes : la division de nombreuses maisons unifamiliales urbaines en plusieurs logements, et une construction neuve marquée par un grand nombre de bâtiments collectifs. Dans les trente dernières années, le taux d'accroissement du parc de bâtiments et de logements évolue de manière semblable avec peu d'écart, ce qui souligne la permanence de l'hégémonie de la maison unifamiliale dans le patrimoine bâti wallon.

Nous pouvons dès lors réaliser une première projection pour le taux d'accroissement du parc de bâtiment entre 2009 et 2050 sur base de trois hypothèses de croissance : 0,5 %, 0,75 % et 1 % par an. L'hypothèse des 1 % de croissance annuelle du parc est une projection très optimiste. En effet ces taux n'ont été mesurés en Wallonie qu'entre les années 50 et 70. Depuis lors, nous sommes à un taux assez stable approchant les 0,70 % par an. Dans la première hypothèse (taux de 0,5 %), les bâtiments d'ores et déjà construits représenteront un peu plus de 80 % du parc de 2050. Ce chiffre se tasse à 73,7 % pour un taux d'accroissement annuel de 0,75 % et à 66,5 % pour un taux d'accroissement annuel de 1 %. Ces estimations intègrent le taux actuel de renouvellement du parc de bâtiments existants en appliquant une hypothèse identique au taux de renouvellement des logements, soit 0,12 %. On mesure ici nettement le poids considérable du parc existant même à une projection à horizon de quarante ans. Au-delà du développement de normes plus contraignantes en terme d'efficacité énergétique pour les nouvelles constructions et les nouvelles zones d'urbanisation, il convient donc de concentrer la réflexion et l'action sur les tissus urbanisés existants.

L'évolution de la superficie chauffée est également un indicateur important dans la modélisation des dynamiques du parc résidentiel. L'augmentation du nombre total de m<sup>2</sup> chauffés peut soit être due à une augmentation du nombre de ménages et donc du nombre de logements, soit à une augmentation de la surface moyenne par logement. La superficie chauffée influence fortement le bilan global de consommation d'énergie. Pour évaluer la superficie totale chauffée en Wallonie, nous avons croisé trois types de sources, afin de borner au mieux nos résultats : les informations cadastrales, les informations de l'ESE 2001 et les informations du PICC relatives au croisement entre emprise bâtie et nombre de niveaux pour chaque bâtiment.

Avec cette dernière méthode, la superficie capable totale du territoire wallon est estimée à 179.400.772 m<sup>2</sup> en 2008, pour un total de 986.235 bâtiments informés, soit une moyenne de 182 m<sup>2</sup> de plancher par bâtiment. Cette méthode offre des résultats nettement supérieurs aux estimations issues des deux premiers sets de données (environ 121 millions de m<sup>2</sup>): +48 % de surface calculée. Plusieurs explications peuvent être avancées. Premièrement, la surface utile estimée sur base du PICC peut être surestimée car elle inclut d'autres fonctions que le logement (commerce, bureaux), mais aussi une partie de la seconde résidence et le logement vacant. Elle est potentiellement surestimée notamment pour le parc ancien car l'hypothèse qui fixe les hauteurs de niveaux à 3m est sans doute une hypothèse pessimiste. La surface capable ainsi calculée est évidemment supérieure à l'estimation basée sur les données de l'ESE, estimation pour laquelle le calcul de la superficie habitable n'incluait (en principe) que les surfaces de vie. Il convient toutefois de noter que le calcul «ESE» devait être effectué par les enquêtés et pouvait donc comporter de nombreuses imprécisions. La confiance que l'on peut accorder à cette valeur est donc relative. Par ailleurs, elle néglige une partie du stock de logements (résidence des étudiants, immigrés et non-répondants à l'enquête). Cependant, la surface capable calculée donne des ordres de grandeur intéressants quant au nombre de m<sup>2</sup> potentiellement remobilisables dans le stock existant.

La superficie chauffée par secteur statistique<sup>1</sup> est introduite dans le calcul des besoins et des consommations énergétiques en vue de la réalisation d'un cadastre des émissions de GES à l'échelle du territoire wallon. Nous appliquerons la valeur de superficie totale chauffée issue du croisement entre nombre de logements répertoriés au cadastre et les répartitions de surfaces issues du SPF Economie - DGSIE, soit 121 millions de m<sup>2</sup>.

---

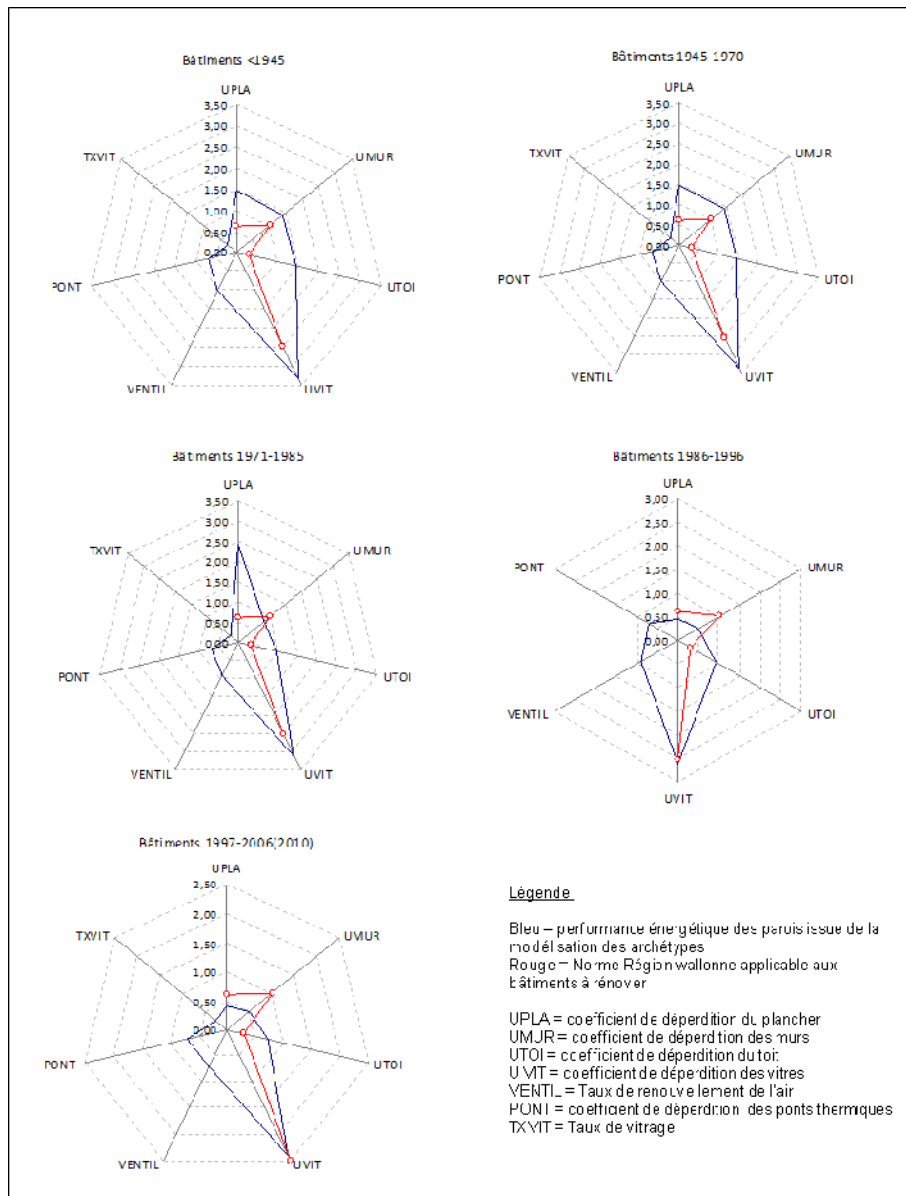
<sup>1</sup> Il s'agit de la plus petite entité administrative en Belgique. Un secteur statistique correspond à un quartier en milieu urbain et à un village ou hameau en milieu rural. La Wallonie en comporte 9876 répartis sur une superficie totale de 16.844 km<sup>2</sup>.

### **3.1.1.2 Modélisation physique du parc résidentiel en Wallonie**

Le parc de logements wallons (résidence principale) apparaît comme particulièrement ancien : plus de 50 % des logements datent d'avant 1945, 86,6 % des logements sont antérieurs à la mise en application de la première réglementation thermique (1985), 91,7 % à la seconde (1996). Deux facteurs concourent à expliquer cette situation : le développement du parc bâti au cours de la période industrielle combiné à l'extension périurbaine et au faible taux de renouvellement dans les années d'après-guerre (peu d'opérations de destruction-reconstruction à l'échelle de la Wallonie). Les secteurs statistiques présentant le plus fort taux de logements construits avant 1945 se situent de manière prépondérante dans l'ouest de la région (province du Hainaut). Ailleurs, les centres anciens des bourgs et des villes ressortent également. Ce parc ancien est constitué principalement de maisons unifamiliales, qui peuvent avoir été divisées dans les périodes postérieures. De façon générale, le parc résidentiel wallon est composé à plus de 80 % de maisons unifamiliales. Au vu des nombreuses situations contrastées présentes sur le territoire, une caractérisation fine des tissus urbanisés existants s'est donc révélée nécessaire en vue d'informer des possibles stratégies localisées voire différenciées de réduction des émissions de gaz à effet de serre.

Afin de mener à bien cette caractérisation énergétique, nous avons choisi de mener une analyse à l'échelle du bâti sur l'ensemble de la Wallonie. Un inventaire technique détaillé des constructions suivant leur date d'édification n'étant pas disponible en Belgique, nous avons pour ce faire dû élaborer des « archétypes constructifs théoriques » pour chacune des cinq classes d'âge précédemment énoncées. La caractérisation des archétypes est réalisée en fonction de quatre éléments structurels (murs extérieurs, vitrage, toiture, plancher). Deux paramètres supplémentaires sont intégrés : le taux de vitrage et le taux de renouvellement de l'air. Ces éléments interviennent classiquement dans l'évaluation de la performance énergétique des bâtiments (PEB). Notons qu'à l'intérieur de chaque classe d'âge, les bâtiments sont considérés comme homogènes. De plus, nous avons considéré dans un premier temps que les modes constructifs sont identiques pour les trois typologies d'habitat (unifamilial, multifamilial inférieur à cinq logements, multifamilial supérieur ou égal à cinq logements). Nous avons appliqué les caractéristiques des maisons unifamiliales à l'ensemble du stock bâti résidentiel étant donné que cette typologie représente plus de 80 % des logements wallons.

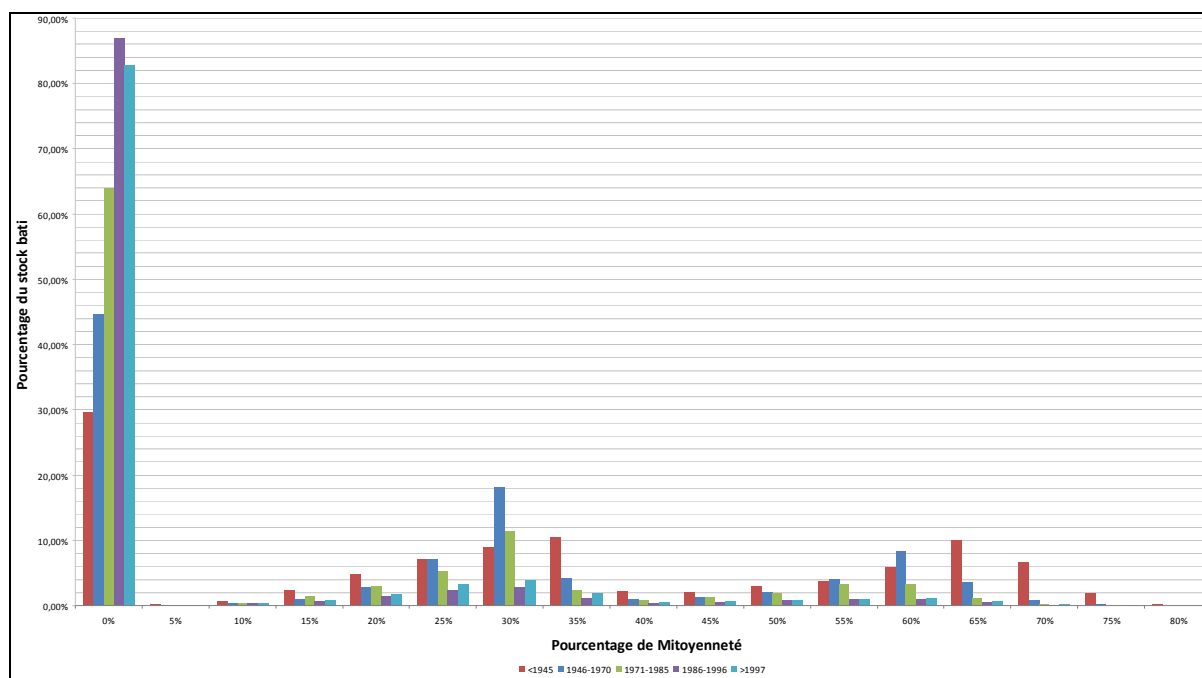
Sur base des typologies constructives, il est possible d'évaluer théoriquement les coefficients de déperdition (U) de chaque paroi constituant l'enveloppe des cinq archétypes. En termes méthodologiques, nous avons choisi de modéliser pour chacune des parois, une paroi composite théorique combinant les informations liées aux modes constructifs et matériaux originaux et celles relatives aux différents niveaux d'isolation. Ces dernières intègrent les dynamiques de rénovation. A chaque matériau correspond une performance de transmission énergétique par m<sup>2</sup> et pour chaque degré de différence entre la température extérieure et la température de consigne intérieure. Nous présentons ici d'une part les chiffres du coefficient de transmission thermique U, et d'autre part la position de ce coefficient par rapport aux exigences thermiques actuelles. La norme applicable aux bâtiments lors d'une rénovation est prise comme donnée de cadrage. En Belgique, depuis le 1er mai 2010, les valeurs U doivent être calculées selon l'annexe VII de l'Arrêté du Gouvernement Wallon du 17 avril 2008. Quand on compare les performances de déperdition de chaque paroi de chaque archétype avec les exigences de la norme actuellement en vigueur applicable aux bâtiments à rénover (travaux de rénovation simple, selon l'article 548, et changement d'affectation), les vulnérabilités spécifiques de chaque archétype apparaissent nettement.



**Figure 3. Performance énergétique des enveloppes suivant la période de construction des bâtiments. Source: Base de données de l'Enquête Qualité logement 2006**

Ce qui ressort de cette première analyse basée sur une modélisation de l'enveloppe de l'ensemble des bâtiments de la région, c'est la résistance du stock existant aux dynamiques de rénovation énergétique, dynamiques pourtant soutenues depuis une trentaine d'années par des politiques régionales subsidiées par des primes à l'isolation et de rénovation urbaine. Malgré la bonne pénétration de ces primes au niveau des vitrages, l'absence de résultats notables au niveau des murs, planchers et toitures interpelle quant à l'efficacité des outils mis à notre disposition en termes de politiques publiques d'amélioration des performances énergétiques.

Néanmoins, ces résultats doivent être pondérés par les apports de l'intégration des bâtiments au sein de tissus urbanisés différenciés. En effet, la morphologie, et notamment la compacité du tissu, influe positivement sur les performances énergétiques et donc sur les émissions de GES des bâtiments, notamment en réduisant la surface de déperdition entre le volume d'habitation et l'air extérieur. En Wallonie, plus de 40 % du stock est constitué de bâtiments 4 façades, près de 30 % du stock présente un pourcentage de mitoyenneté compris entre 20 et 35 %, ce qui peut correspondre à des bâtiments semi-mitoyens et enfin près de 25 % du stock présente un taux de mitoyenneté de plus de 50 % ce qui correspond à des bâtiments mitoyens de deux, voire trois, côtés. Ces résultats, pour être pertinents dans une analyse des émissions de GES telle qu'entreprise ici, doivent être mis en perspective avec les différentes classes d'âge de bâti (Figure 4).



**Figure 4. Mitoyenneté du bâti résidentiel wallon par classe d'âge : histogramme des fréquences.**  
Source : Cadmap 2009, SPF Economie - DGSIE.

L'analyse du taux de mitoyenneté par classe d'âge révèle une très forte représentation des bâtiments implantés de manière pavillonnaire durant les trois dernières périodes constructives: 64 % des bâtiments construits entre 1971 et 1985, 86 % pour la période 1986-1996 et 82 % après 1996. Avant 1850, c'est l'habitat mitoyen et semi-mitoyen qui domine. Ensuite, ceux-ci ont progressivement diminué jusqu'au début du 21<sup>e</sup> siècle en faveur du bâti 4 façades. Ce dernier est susceptible d'avoir de lourdes conséquences en termes de consommation énergétique sur les bâtiments peu performants thermiquement. C'est le cas des bâtiments construits avant la mise en œuvre de la réglementation thermique de 1985. Soulignons toutefois que l'implantation en ordre dispersé n'est pas une caractéristique récente en Wallonie, bien qu'elle semble s'être généralisée depuis 1986. On observe ainsi une représentation de près de 30 % des bâtiments construits avant 1945 dans le volume global des bâtiments implantés de manière pavillonnaire et de plus de 40 % pour les bâtiments construits avant 1971.

La carte ci-dessous souligne l'hétérogénéité des situations locales. Les noyaux urbains et les zones d'urbanisation héritées du 19<sup>e</sup> siècle sont très nettement visibles : ils présentent un taux de mitoyenneté plus élevé. Une grande partie des zones de suburbanisation sont caractérisées par un taux de mitoyenneté pratiquement nul.

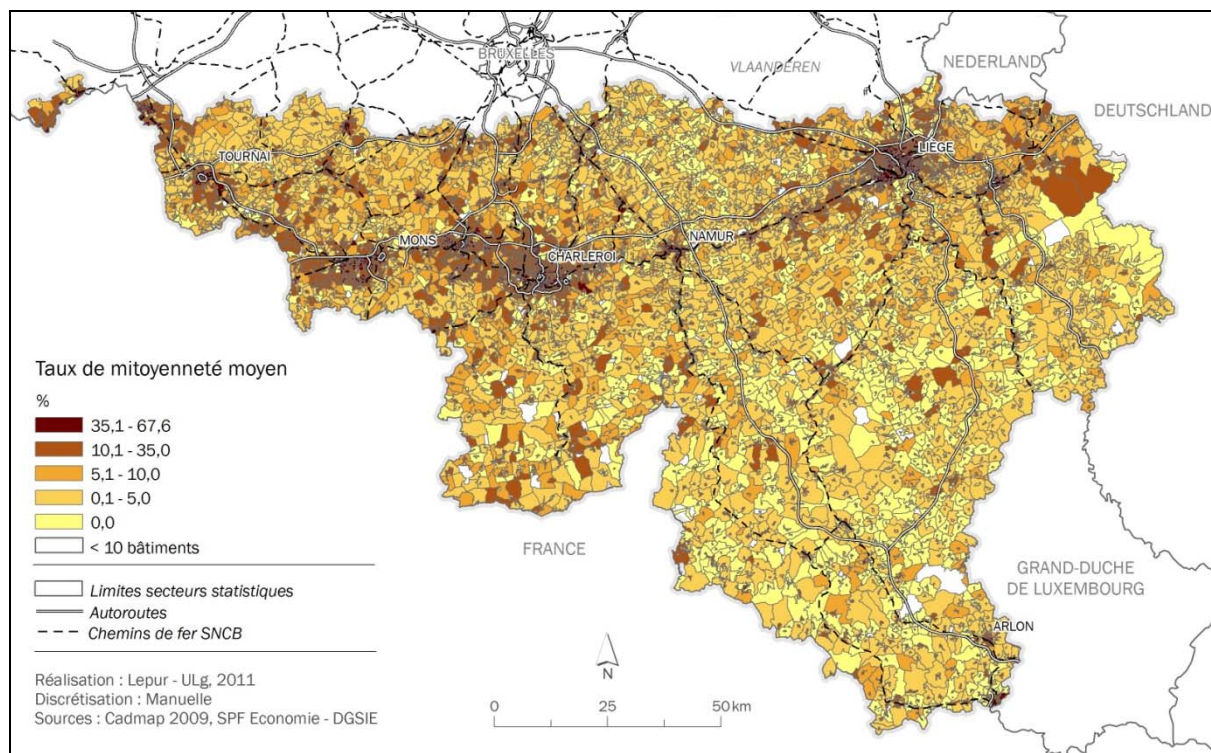


Figure 5. Taux de mitoyenneté moyen en Wallonie par secteur statistique. Source : Cadmap 2009, SPF Economie - DGSIE.

### 3.1.1.3 Analyse de la consommation énergétique du bâti résidentiel en Wallonie

Il n'est pas surprenant, au vu de ces caractéristiques, que les consommations énergétiques des bâtiments, ramenées au m<sup>2</sup> de plancher, soient relativement élevées en Wallonie. Sur base des données en notre possession aujourd'hui, on estime la consommation moyenne à 350 kWh/m<sup>2</sup>.an pour l'ensemble du parc bâti résidentiel. Cette valeur temporaire est nettement supérieure à la moyenne calculée sur base des chiffres de l'ICEDD (2008), soit 286 kWh/m<sup>2</sup>.an en 2008. La différence entre les deux valeurs est liée pour partie à des considérations méthodologiques. En outre, nous considérons de manière conventionnelle que l'ensemble du parc de logements est chauffé pendant toute la période de jour et pour toute la surface de plancher du logement (chambres et espaces secondaires compris). Cette hypothèse, bien que non réelle, est indispensable à une analyse des variables territoriales susceptibles d'influencer ces consommations car elle permet de comparer les bâtiments de manière standardisée. Enfin, l'écart entre les deux résultats peut aussi être lié aux phénomènes climatiques : les degrés jours pour 2008 étaient assez faibles par rapport aux degrés-jours normalisés (2084 DJ 15/15 à Uccle contre 1829 en 2008, soit un écart avoisinant les 10%).

Période de construction	de	Moyenne (kWh/m <sup>2</sup> )	Ecart type (kWh/m <sup>2</sup> )
<1945		407,8	163,4
1945-1970		343,7	81,9
1971-1985		328,5	90,7
1986-1996		203,8	35,8
>1996		172,3	40,2

**Tableau 2. Consommation énergétique moyenne du bâti résidentiel en Wallonie selon la période de construction.**

Lorsque l'on s'intéresse aux consommations unitaires par m<sup>2</sup> des bâtiments selon la période de construction (tableau 1), il apparaît que la moyenne des consommations croît naturellement avec l'âge, mais que cette croissance masque une forte variation, en particulier pour le stock avant 1945. L'écart type observé pour cette classe d'âge est le plus important: 163 kWh/m<sup>2</sup>. Cet écart type est lié aux différences de performance entre les bâtiments construits avant 1945 selon qu'ils soient mitoyens (en milieu urbain dense) ou non mitoyens (en milieu rural peu dense). La valeur moyenne pour l'ensemble du parc (365 kWh/m<sup>2</sup>) se rapproche de celle du parc d'avant 1945 en raison de la masse de bâtiments anciens qui composent le stock wallon (plus de 50 %).

### 3.1.1.4 Actualisation du modèle

Sur base des consommations énergétiques (en kWh par m<sup>2</sup> et par an) calculées lors de la subvention 2009-2010 pour les bâtiments résidentiels couverts par le PICC, une typologie des consommations énergétiques du bâti résidentiel a été réalisée afin de pouvoir estimer par extrapolation les consommations énergétiques du bâti résidentiel non repris par le PICC. Pour rappel, le PICC couvre 85% du stock bâti et il est la seule source d'information permettant d'estimer la hauteur des bâtiments, qui est nécessaire au calcul de la consommation énergétique du bâti.

Quinze types ont été définis en croisant deux variables :

- le taux de mitoyenneté (trois classes) : 0% pour le bâti 4 façades, entre 0 et 35% pour le bâti semi-mitoyen et supérieur à 35% pour le bâti mitoyen,
- l'âge du bâti (cinq classes) : antérieur à 1945, 1945-1969, 1970-1984, 1985-1996, postérieur à 1996.

Chacun des bâtiments résidentiels du PICC a alors été classifié selon cette typologie et la moyenne des consommations énergétiques de chaque type a alors été calculée (Tableau 3). Il ressort de ces résultats que les consommations moyennes évoluent conjointement à l'âge du bâti et inversement au taux de mitoyenneté: le type présentant les consommations moyennes les plus élevées correspond à la classe d'âge des bâtiments les plus anciens (d'avant 1945) et à la classe de taux de mitoyenneté la plus faible (4 façades). Le type le plus représenté en Wallonie (plus d'1/5 des bâtiments résidentiels du PICC) correspond aux bâtiments mitoyens d'avant 1945. C'est également ce type qui présente l'écart type le plus élevé pour la consommation moyenne, en raison de l'étendue de la période couverte et de l'absence de réglementations thermiques à l'époque considérée.

**Tableau 3. Typologie des consommations énergétiques des bâtiments résidentiels couverts par le PICC**

		Type	Nombre de Bâtiments	Pourcentage (%)	Consommation moyenne (kWh/m2.an)	Ecart type de la consommation moyenne (kWh/m2.an)
<b>Quatre façades</b>	< 1945	1	166.070	16,8	499,1	90,3
	>= 1945 et < 1970	2	76.848	7,8	397,3	64,5
	>=1970 et < 1985	3	92.750	9,4	359,6	88,9
	>=1985 et < 1997	4	53.283	5,4	210,5	30,7
	>=1997	5	20.037	2,0	179,3	37,6
<b>Semi-mitoyen</b>	< 1945	6	202.490	20,5	432,4	66,7
	>= 1945 et < 1970	7	60.891	6,2	335,3	48,6
	>=1970 et < 1985	8	35.652	3,6	296,5	60,5
	>=1985 et < 1997	9	5.682	0,6	172,8	33,2
	>=1997	10	2.845	0,3	149,7	31,8
<b>Mitoyen</b>	< 1945	11	208.470	21,1	311,3	215,6
	>= 1945 et < 1970	12	39.415	4,0	252,0	65,6
	>=1970 et < 1985	13	18.593	1,9	234,3	53,7
	>=1985 et < 1997	14	2.702	0,3	138,7	34,1
	>=1997	15	1.286	0,1	113,8	29,0

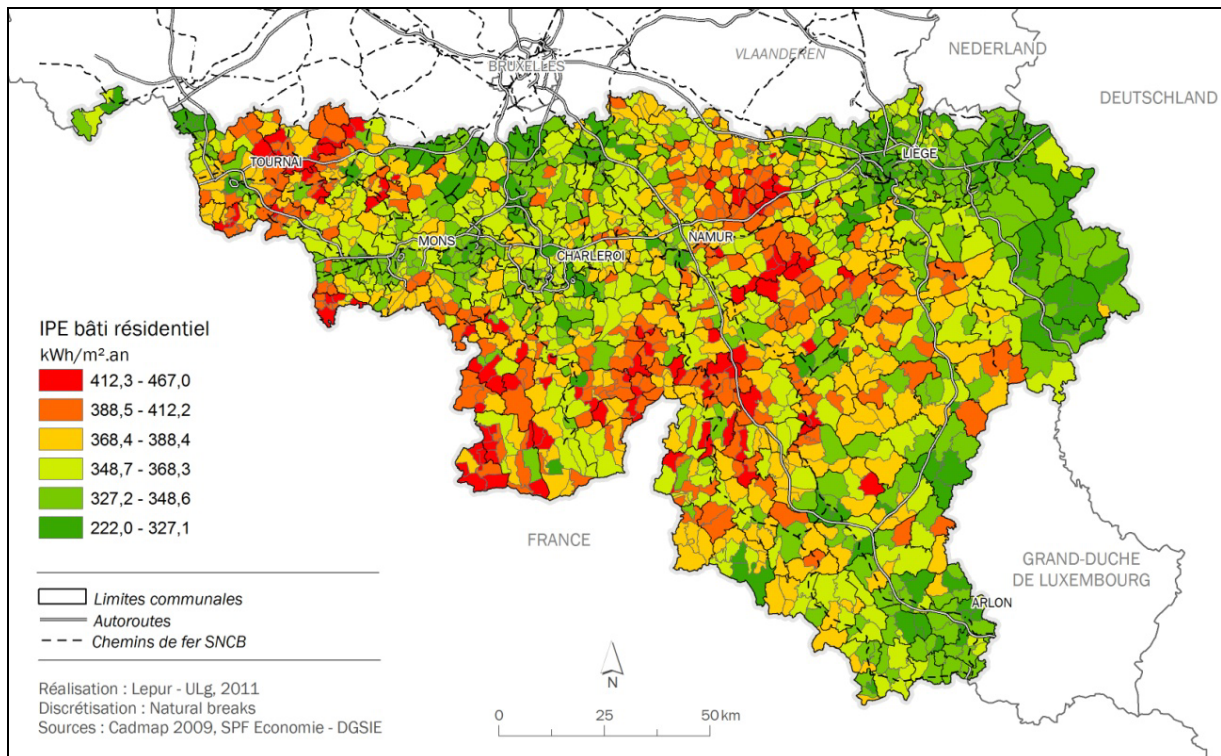
Sur cette base, les consommations énergétiques ont alors été estimées pour l'ensemble des bâtiments résidentiels du cadastre, pour l'année 2009. Le cadastre précise, pour chaque bâtiment, la date de construction. Quant au taux de mitoyenneté, il peut être calculé comme étant le rapport du périmètre commun avec un autre bâtiment au périmètre total (analyse spatiale effectuée dans ArcGIS). Il est donc possible de rattacher chaque bâtiment du cadastre à l'un des quinze types définis. Reste alors à calculer, pour chaque entité géographique  $i$  (secteur statistique, ancienne commune et commune), la proportion de bâtiments de chaque type et à estimer la consommation moyenne par entité selon la formule suivante :

$$\text{Consommation moyenne } (i) = \sum_{\text{type } x=1}^{15} (\text{pourcentage type } x (i) * \text{consommation moyenne type } x)$$

Les cartes suivantes (Figure 6 et Figure 7) illustrent les résultats obtenus à l'échelle des anciennes communes. Les résultats à l'échelle des communes et des secteurs statistiques sont repris en annexe.



## a) Indice de performance énergétique en kWh



**Figure 6. Indice de Performance Energétique du bâti résidentiel, en kWh par m<sup>2</sup> chauffé et par an, à l'échelle des anciennes communes (2009)**

Les cartes des besoins de chauffage par mètre carré par an en Wallonie auraient été strictement similaires aux cartes ci-dessus car un coefficient fixe de rendement des systèmes de chauffage a été appliqué, quel que soit l'âge du bâti ou le vecteur énergétique utilisé. Les résultats cartographiés ci-dessus sont donc uniquement influencés par les variables liées à la qualité de l'enveloppe des bâtiments, à la morphologie urbaine et à la localisation.

Ces résultats semblent similaires, dans les grandes tendances, aux résultats obtenus lors de la subvention 2009-2010, pour la couverture PICC. Une analyse de l'erreur a été réalisée afin de comparer les deux sets de résultats : le R<sup>2</sup> obtenu vaut 0,63 pour les secteurs statistiques, 0,69 pour les anciennes communes et 0,66 pour les communes. L'utilisation d'une valeur moyenne de consommation par type est sans doute à l'origine de ces variations entre valeurs calculées et estimées, puisque toutes les valeurs extrêmes sont gommées dans le calcul réalisé sur base de la typologie.

Une forte variation de l'indice de performance énergétique (IPE) du stock bâti est observée entre les différentes sous-régions de Wallonie. Les centres urbains ressortent avec un bon indice de performance énergétique (c'est-à-dire une valeur faible de l'indice) malgré l'ancienneté du stock (Liège, Namur, Mons, Tournai). Ces bons résultats peuvent être imputés à la grande compacité des bâtiments et au fort taux de mitoyenneté. À quelques exceptions près, les noyaux urbains historiques apparaissent donc clairement comme les plus performants énergétiquement en comparaison avec les espaces périurbains et les noyaux villageois. Seules quelques zones de développement récent, comme certaines communes du Brabant wallon (Louvain-la-Neuve par exemple, entre Namur et Bruxelles), attestent d'un IPE moyen aussi faible.

L'agglomération liégeoise est caractérisée par un IPE particulièrement bas, y compris pour les quartiers centraux à l'habitat fort ancien. Ceci s'explique par les facteurs précités ainsi que par les conditions climatiques de cette zone dans laquelle les degrés-jours normalisés sont significativement inférieurs à la moyenne régionale du fait de la présence d'un effet de chaleur urbaine et d'une altitude faible (2016 DJ 15/15 à Liège contre 2380 en moyenne régionale). Notons également que dans les Ardennes, à la frontière Allemande et dans la Région de Bastogne, le bâti présente également de bonnes performances énergétiques. Suite aux dégâts de la Bataille des Ardennes lors de la 2<sup>e</sup> guerre mondiale, cette région a dû faire face à d'importantes reconstructions et donc atteste aujourd'hui d'un stock bâti plus récent. La Lorraine belge (région d'Arlon) est également caractérisée par un bon indice en raison de la présence d'un important stock bâti de logements anciens mitoyens et semi-mitoyens, ainsi que de nombreux logements récents (post 1986) construits suite à l'attractivité du Luxembourg et à l'arrivée de nouveaux résidents dans cette région limitrophe.

A l'est de Namur et dans le Hainaut (partie ouest de la Wallonie), les performances sont moins bonnes. Ces résultats s'expliquent par les caractéristiques du parc bâti résidentiel de ces sous-région qui est composé en majorité d'habitation construites avant 1945 et implantées en ordre dispersé. Notons par ailleurs que, à morphologie urbaine semblable, le climat est un facteur impactant de manière significative les performances énergétiques du bâti résidentiel: dans le sud-est de la région, les températures extérieures sont en moyenne plus basses que dans le reste de la région ce qui induit des besoins en chauffage plus importants et donc de moins bonnes performances.

La cartographie des consommations finales totales pour l'ensemble des logements de chaque secteur statistique serait évidemment inversée: les fortes valeurs auraient tendance à se concentrer non plus en milieu rural, mais bien en milieu urbain, là où la concentration de logements et donc le volume total de surfaces à chauffer est élevée. Ainsi, plusieurs pôles situés dans la partie ouest du Brabant wallon (entre Bruxelles et Namur) et qui présentent un bon IPE (stock bâti récent, densification en cours), affichent des consommations finales globales élevées. Celles-ci sont principalement dues à la grande quantité de surfaces chauffées. Cette concentration et les bons indices dont ces zones bénéficient en font des sites potentiellement intéressants pour le développement de réseaux de chaleur.

#### *b) Indice de performance énergétique en Kg éq.CO<sub>2</sub>*

L'estimation des émissions de gaz à effet de serre par entité a pu être calculée au moyen de trois types d'information :

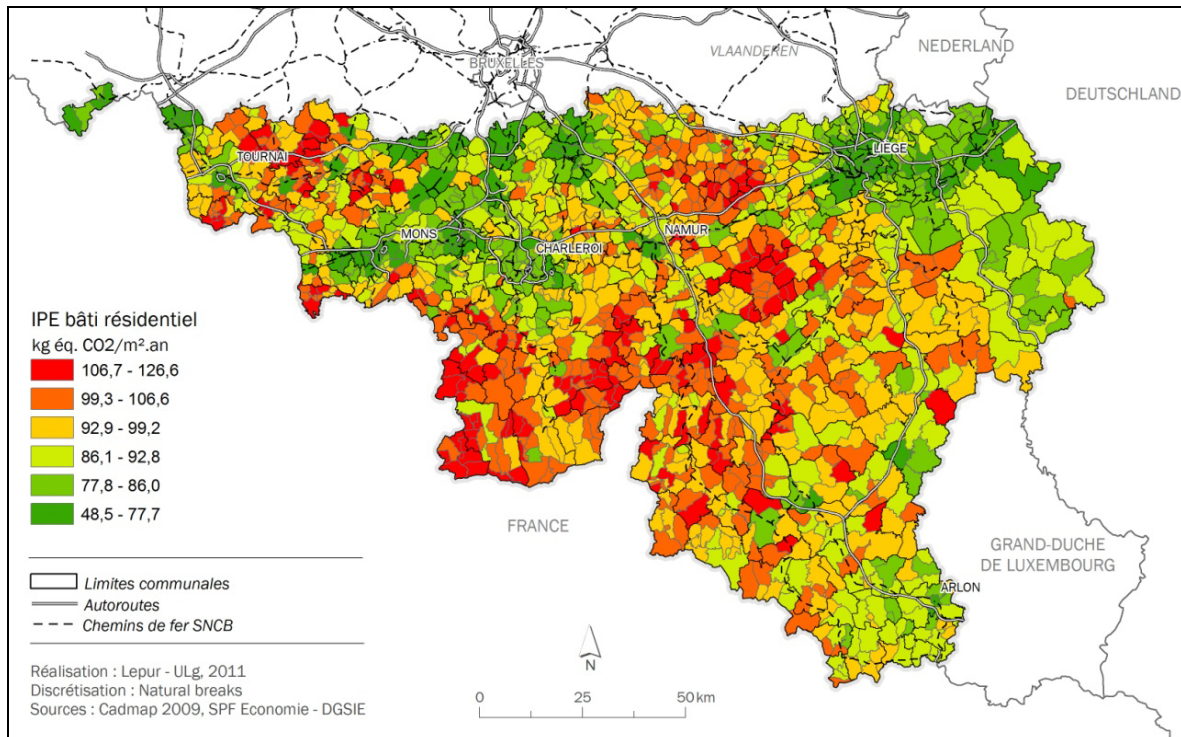
- les consommations estimées par entité, en kWh par m<sup>2</sup> et par an (cf. supra);
- la part des logements se chauffant respectivement au mazout, à l'électricité, au gaz naturel et au LPG, par entité ;
- les valeurs d'émissions spécifiques de ces différents combustibles.

La part des différents vecteurs énergétiques, combinée aux valeurs d'émissions spécifiques de ces vecteurs, a permis le calcul d'un facteur d'émission moyen par entité (en gramme d'équivalent CO<sub>2</sub> par kWh).

Le produit des consommations estimées de chaque entité par le facteur d'émission moyen correspondant permet d'estimer les émissions de CO<sub>2</sub> de chaque entité. Cette valeur est exprimée en kg d'équivalent CO<sub>2</sub> par m<sup>2</sup> et par an.

Lors de la subvention 2009-2010, les émissions de CO<sub>2</sub> liées au bâti résidentiel avaient été exprimées en valeurs totales (tonnes d'éq. CO<sub>2</sub> par an). Il n'était pas possible de reproduire ce calcul pour toute la couverture du stock bâti wallon sans disposer de la hauteur des bâtiments, car la hauteur du bâtiment intervient dans le calcul de la superficie totale, superficie sans laquelle il n'est pas possible de calculer les consommations totales ni a fortiori les émissions totales.

La carte suivante (Figure 7) illustre les résultats obtenus à l'échelle des anciennes communes, exprimés en kg d'équivalent CO<sub>2</sub> par m<sup>2</sup> et par an. Les cartographies de l'IPE à l'échelle des secteur statistiques et des communes est disponible en annexe.



**Figure 7. Indice de Performance Énergétique du bâti résidentiel, en kg d'éq. CO<sub>2</sub> par m<sup>2</sup> chauffé et par an, à l'échelle des anciennes communes (2009)**

Cette carte est très semblable à celle des consommations énergétiques présentée à la Figure 6, à la différence que la province de Namur et du Luxembourg y apparaissent moins performantes encore, tandis que la province de Liège conserve de bonnes performances. Cela peut s'expliquer en partie par la bonne desserte en gaz de ville (pour lequel les émissions spécifiques sont relativement faibles) en province de Liège et le long du sillon industriel de manière générale, et par son absence quasi généralisée dans le Sud de la Wallonie, là où les densités de population ne justifient pas son installation.

## 3.2 ACTUALISATION DU MODELE RELATIF A LA MOBILITE DOMICILE-TRAVAIL

### 3.2.1 Rappel synthétique de la méthodologie utilisée

Afin de dresser un diagnostic de l'impact environnemental des travailleurs wallons, nous avons cherché à dresser un cadastre des émissions de GES liées à leurs déplacements. Ce dernier a pour but de mettre en évidence les zones dans lesquelles des comportements de mobilité fortement émetteur de GES sont observés, et inversement. Pour ce faire, nous nous sommes basés sur l'indice de performance énergétique des déplacements domicile-travail (*commute-energy performance index*) introduit par K. Boussauw et F. Witlox (2001). Elaboré à l'échelle des secteurs statistiques et testé sur la Flandres, il met en relation la consommation énergétique des navetteurs avec la structure du territoire. Il permet de rendre compte de l'impact énergétique du système de transport, et indirectement son impact environnemental, en relation avec sa structure spatiale. Nous l'appellerons « indice de performance environnementale » (IPE) pour évoquer à la fois les consommations énergétiques et les émissions de GES.

#### 3.2.1.1 Indice de performance environnementale des déplacements domicile-travail

L'indice est calculé en divisant la quantité totale d'énergie consommée ou de GES émise par l'ensemble des navetteurs d'une entité donnée, par la population active totale de cette entité. L'énergie consommée et les GES émis dépendent à la fois des distances parcourues et du facteur de consommation ou d'émissions spécifique au mode de transport utilisé par le navetteur. Au plus l'indice est élevé, au plus les déplacements des travailleurs ont un impact environnemental élevé. Les bases de données utilisées sont le recensement de 1991 et l'enquête socio-économique de 2001. Disposant des données désagrégées, nous avons simplifié et réécrit l'indice K. Boussauw et F. Witlox (2001) comme suit :

$$IPE_s = \frac{\sum \bar{D}_{m,s} * \bar{E}_{m,s}}{N_s}$$

Où :

$IPE_s$  = Indice de Performance Environnementale des déplacements domicile-travail pour l'entité «s»

$D_s$  = moyenne des distances parcourues en mode de transport «m» dans l'entité «s»

$\bar{E}_m$  = consommation énergétique moyenne/émissions d'équivalent CO<sub>2</sub> moyennes par passager pour le mode de transport «m»

$N_s$  = total de répondants

Le dénominateur de l'équation reprend le nombre total de répondants et non pas la population (active) totale par entité. Les répondants ayant un lieu de travail variable et ceux travaillant à domicile ne sont donc pas pris en compte dans le calcul de l'indice. Le terme navetteur désigne, dans notre cas, les travailleurs qui se déplacent *et* qui ont un lieu de travail fixe.

La consommation énergétique moyenne et les émissions d'équivalent CO<sub>2</sub> moyennes par passager par mode de transport sont adaptés au contexte propre de la Région (Tableau 4). Ceux-ci sont basés sur les consommations de carburants en 2007 fournis par l'AWAC (voiture particulière et motos), l'ICEDD (trains éclectiques, trains diesel-gasoil et Métro Léger de Charleroi) et la SRWT (bus), converties en émissions via les facteurs de conversion de l'AWAC pour la contenance en GES des carburants et les rapports environnementaux d'Electrabel (2008) pour la contenance en GES du mixte de production énergétique belge. D'autre part, les données de mobilité du SPF Mobilité (2008) et de l'IWEPS (2007) sont également mobilisées pour ramener les émissions par individu et par kilomètre parcouru.

**Tableau 4. Consommations énergétiques et émissions de CO<sub>2</sub> moyennes pour le transport terrestre de voyageurs en Wallonie en 2007**

Mode	kWh/pkm	geq. CO <sub>2</sub> /pkm
Voiture	0,45	118,3
Moto, scooter	0,41	105,0
Bus <sup>2</sup> , tram, métro	0,35	79,5
Train	0,15	35,7
Vélo	-	-
Marche à pied	-	-

### 3.2.1.2 Traitement des données du recensement de 1991 et de l'enquête socio-économique de 2001

Pour le recensement de 1991, nos traitements ont abouti à un fichier comportant 797.733 répondants répartis dans 9.725 secteurs statistiques. En 2001, 966.247 répondants répartis dans 9.164 secteurs statistiques ont été pris en compte. Pour ce faire, divers filtres ont dû être opérés sur les sets de données originaux (10.296.350 entrées dans la base de données de 2001 par exemple), de telle sorte à garder uniquement les travailleurs wallons qui ont répondu correctement aux questions relatives à la mobilité.

Le mode de transport principal est identifié sur base d'une analyse combinatoire. Pour chaque répondant, les différents modes de transports utilisés sont comptabilisés. Ensuite, le mode principal est défini comme étant le plus rapide selon la hiérarchie suivante : train -> voiture -> bus -> vélo -> à pied. Notons ici que les modes « voiture en tant que conducteur » et « voiture en tant que passager » ont été agrégés.

Le mode « transport organisé par l'employeur » n'est pas pris en compte. Ce dernier est jugé comme étant à traiter au cas par cas en fonction du type d'entreprise et du plan de transport éventuellement mis en place. De plus, la répartition spatiale des actifs qui utilisent ce moyen de transport ne présente aucune caractéristique distincte pouvant être influencée par la structuration du territoire.

Etant donné que dans le fichier de base de 1991, seules des classes de distances sont connues, nous avons procédé à une estimation de la distance parcourue pour chacune des classes de distance de l'enquête socio-économique de 1991 :

<sup>2</sup> Chiffres pour 2008

**Tableau 5. Classes de distances et distances estimées utilisées pour le traitement des données du Recensement de 1991.**

Classe Recensement 1991	Distance estimée
0-3 km	1,5 km
3-4 km	4,0 km
5-9 km	7,5 km
10-19 km	15 km
20-29 km	25 km
30-49 km	40 km
50-69 km	60 km
> 70 km	80 km

Finalement, Un seuil de 10 répondants est fixé afin d'augmenter la probabilité d'avoir un résultat statistiquement significatif, et donc d'éviter des erreurs d'interprétation liées au faible taux de réponses dans certains secteurs.

### 3.2.2 Cadastre des émissions de GES des déplacements domicile-travail

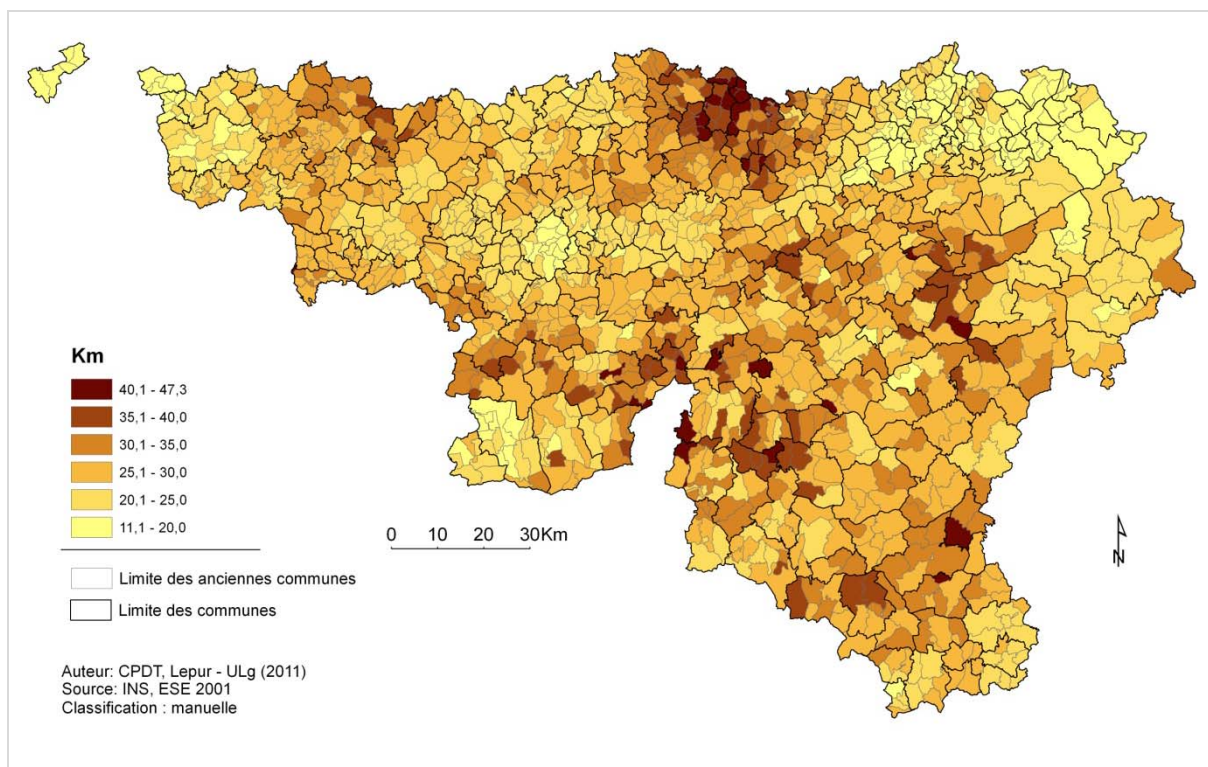
#### 3.2.2.1 Actualisation du modèle

Les calculs relatifs aux consommations énergétiques et aux émissions de CO<sub>2</sub> liées aux déplacements domicile-travail avaient été réalisés dans Excel au cours de la subvention 2009-2010. De manière à pouvoir intégrer les modèles « bâti » et « mobilité » au sein d'un même code pour faciliter ensuite le travail de construction et d'analyse des scénarii, les IPE ont été recalculés au moyen du logiciel Matlab pour 2001, et ce aux trois échelles de travail (communes, anciennes communes et secteurs statistiques). L'évolution de 1991 à 2001 des distances parcourues au motif domicile-travail a également été recalculée dans Matlab.

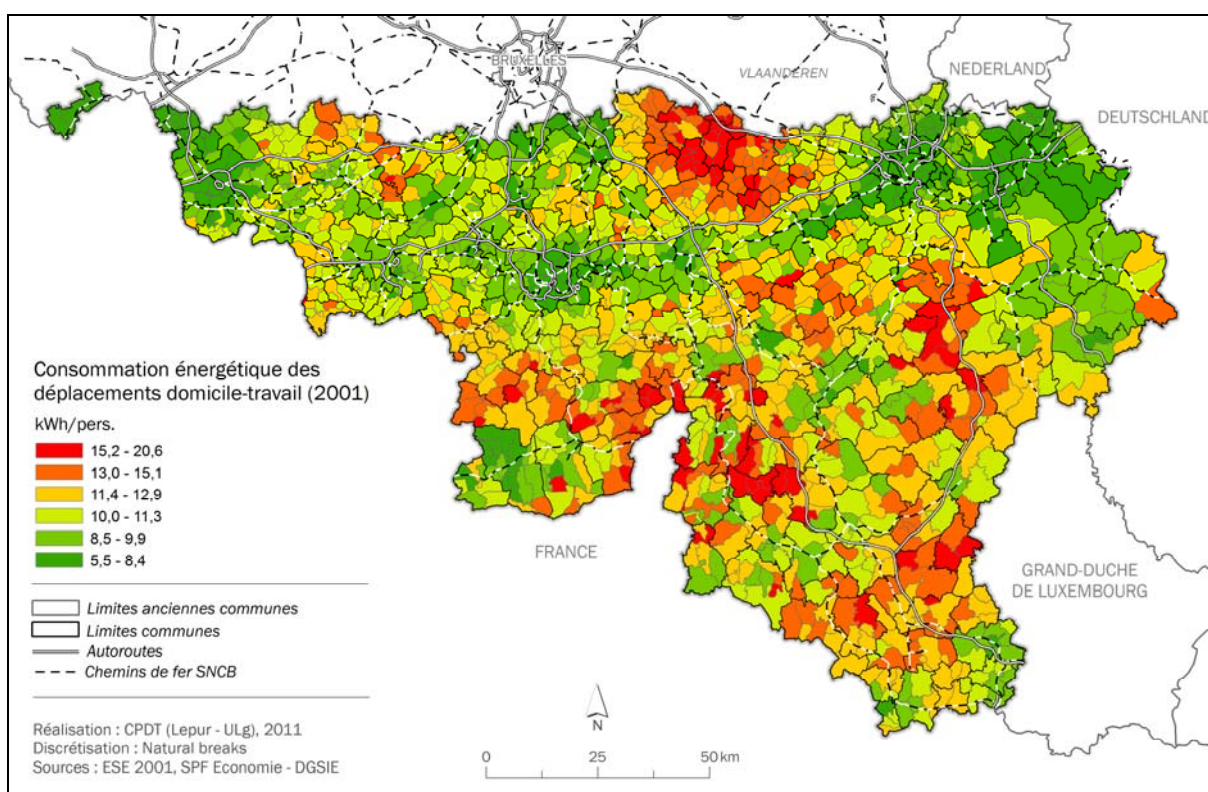
Pour le calcul d'IPE « kWh » et « CO<sub>2</sub> », les distances réelles déclarées par les répondants dans l'enquête socio-économique de 2001 (trajet aller domicile-travail) ont été utilisées. Lors de la subvention 2009-2010, des classes de distance avaient été définies (sur base des classes de distances utilisées lors de l'enquête socio-économique de 1991, cf. Tableau 5) et une distance estimée avait été attribuée à chaque répondant en fonction de la classe dans laquelle il se trouvait. Les calculs de l'IPE avaient ensuite été réalisés sur cette base.

Le regroupement en classes de distances avait été effectué par souci de cohérence avec l'enquête socio-économique de 1991 et permettait une comparaison aisée entre les deux enquêtes. Cependant, cette méthodologie entraînait une perte de précision et un plafonnement des distances maximales à 80km. Les valeurs d'IPE obtenues sur base des distances réelles déclarées sont plus représentatives de la réalité puisque les distances n'y ont pas été plafonnées (hormis par élimination des valeurs aberrantes ainsi que lors de la subvention 2009-2010).

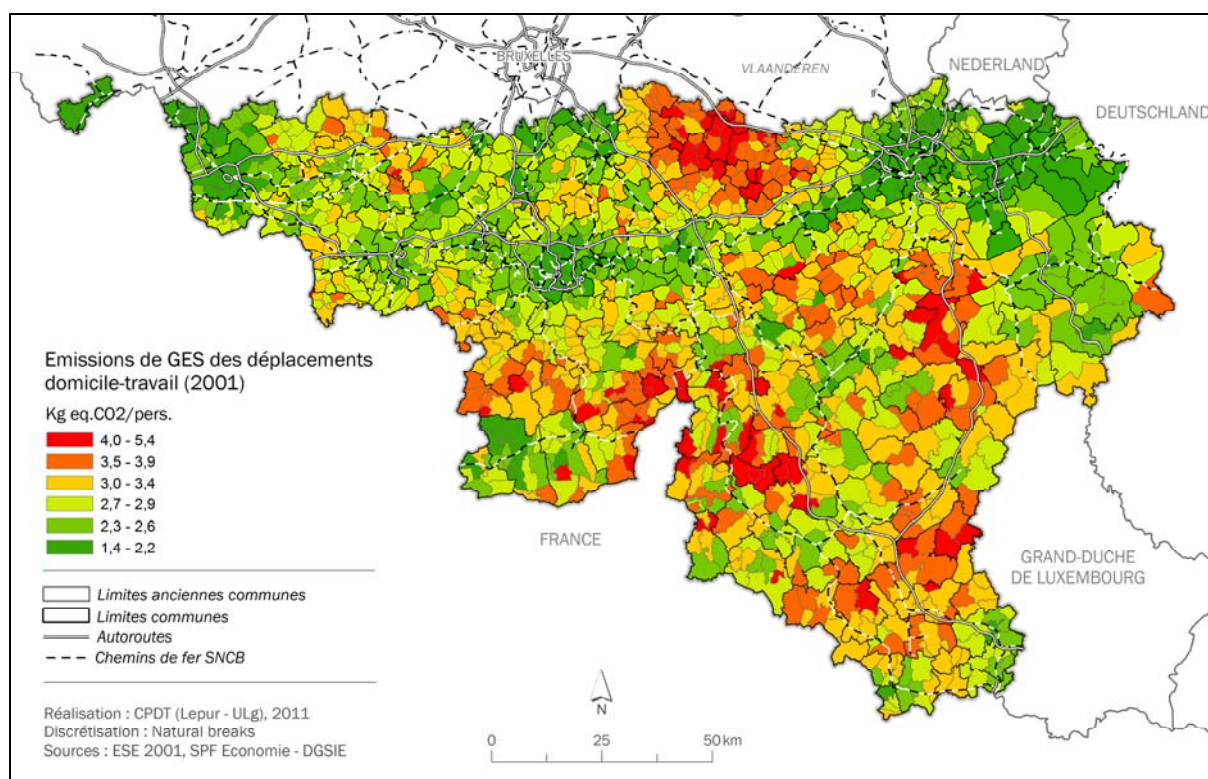
Les cartes de distance moyenne des déplacements domicile-travail, mais aussi de consommation énergétique moyenne ("IPE\_kWh") et d'émissions moyennes de gaz à effet de serre (IPE\_CO<sub>2</sub>) liées aux déplacements domicile-travail ont dès lors été actualisées. Les Figure 8, Figure 9 et Figure 10 présentent les résultats obtenus à l'échelle des anciennes communes. Les cartes de distances moyennes et d'IPE à l'échelle des secteurs statistiques et des communes sont présentées en annexe.



**Figure 8. Distances moyennes des déplacements domicile-travail en Wallonie, à l'échelle des anciennes communes (2001)**



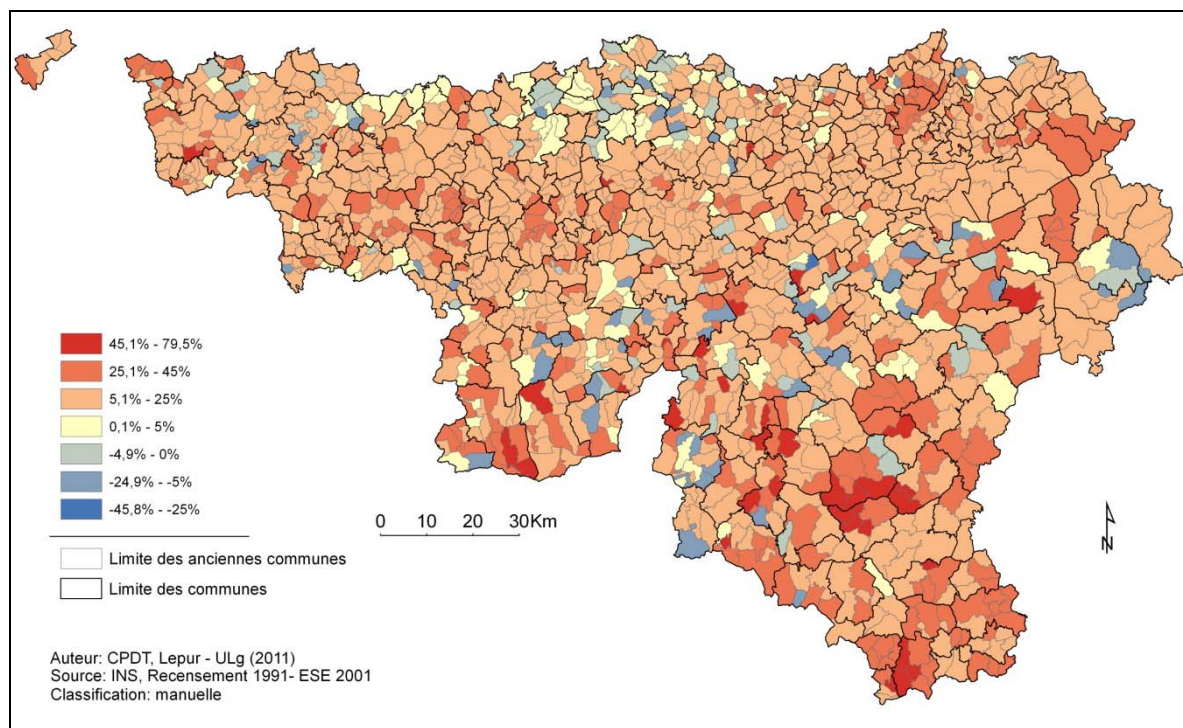
**Figure 9. Indice de performance énergétique des déplacements domicile-travail en Wallonie (IPE kWh), à l'échelle des anciennes communes**



**Figure 10. Indice de performance énergétique des déplacements domicile-travail en Wallonie (IPE eq. CO<sub>2</sub>), à l'échelle des anciennes communes**

L'évolution de 1991 à 2001 des distances parcourues au motif domicile-travail a également été recalculée dans Matlab, et ce de la même manière que lors de la subvention 2009-2010, c'est-à-dire avec un regroupement des données de 2001 en classes de distance et l'attribution d'une distance estimée en fonction de la classe, de manière à pouvoir effectuer la comparaison avec les données de 1991. En effet, la connaissance de l'évolution des distances moyennes entre 1991 et 2001 était nécessaire à l'implémentation des scénarii. La Figure 11 représente l'évolution des distances moyennes domicile-travail entre 1991 et 2001, par ancienne commune (l'évolution 1991-2001 des distances moyennes domicile-travail exprimée en pourcentage par ancienne commune, ainsi que l'évolution des distances moyennes domicile-travail entre 1991 et 2001 par commune – km et % - est présentée en annexe.





**Figure 11. Evolution 1991-2001 des distances moyennes parcourues pour les déplacements domicile-travail en Wallonie par ancienne commune**

### 3.2.3 Minimum commuting distance et excess commuting

#### 3.2.3.1 Minimum commuting distance

Par « minimum commuting distance » (MCD), on entend la distance minimale théorique - telle que suggérée par la structure spatiale du lieu considéré - qu'un travailleur pourrait parcourir pour se rendre à son travail s'il acceptait d'occuper le travail le plus proche de son domicile, et cela indépendamment de son niveau de qualification. Les MCD sont un indicateur de la séparation/du déséquilibre entre la fonction résidentielle, considérée comme l'origine des déplacements, et les autres fonctions (travail, école, commerces, loisirs), considérées comme des destinations.

Calculées à l'origine, les MCD expriment l'éloignement de l'entité considérée par rapport aux centres d'emploi.

Calculées à la destination, elles expriment la distance à laquelle les employés doivent être recrutés pour les emplois disponibles dans l'entité considérée et indiquent donc en quelque sorte le niveau de qualification requis pour ces emplois.

Les MCD pour la Wallonie ont été calculées selon la méthodologie développée par K. Boussauw (Boussauw *et al.* 2011). La méthodologie repose sur le postulat suivant : dans l'algorithme, chaque départ observé est associé à la plus proche arrivée observée et le nombre de départs par entité et le nombre d'arrivées par entité reste le même, mais la connexion qui existe dans les faits (ESE 2001) entre origines et destinations n'est pas conservée, de manière à pouvoir minimiser les distances.

Le calcul se base sur deux matrices:

- une matrice origine-destination (matrice OD) du nombre de déplacements domicile-travail entre chaque paire d'entités (i, j), construite à partir des données de l'enquête socio-économique (ESE) de 2001,

- une matrice des distances entre chaque paire d'entités (i, j). Dans le cadre de cette recherche, la matrice des distances a été construite en calculant dans ArcGIS la distance centroïde à centroïde entre toutes les paires d'entités, il s'agit donc de distances à vol d'oiseau. La distance intrazonale, quant à elle, a été approchée par la moyenne des distances déclarées par les répondants à l'ESE dont les déplacements domicile-travail s'effectuent en interne<sup>3</sup>. Pour les entités pour lesquelles il n'y avait pas de répondants en intrazonal (c'était le cas pour environ 120 anciennes communes), la distance intrazonale a été estimée par la moitié de la distance au centroïde le plus proche. NB : A titre d'information, Boussauw a utilisé les distances physiques mesurées dans Streetnet entre les centroïdes de chaque entité et il a utilisé la moitié de la distance au centroïde le plus proche pour les distances intrazonales. Après comparaison, il ressort que les résultats obtenus pour la Wallonie sont plus cohérents lorsque les distances intrazonales sont calculées sur base des informations de l'ESE 2001 et non pas calculées comme étant égales à la moitié de la distance au centroïde le plus proche.

#### a) Calcul des distances réelles parcourues

La multiplication de la matrice des OD des déplacements par la matrice des distances donne une matrice des distances totales parcourues entre chaque paire d'entités (i, j). Le nombre total initial de départs et d'arrivées pour chaque entité est calculé en sommant respectivement les colonnes et les lignes de la matrice OD initiale. Le nombre total initial de kilomètres parcourus au départ et à destination de chaque entité est calculé en sommant respectivement les colonnes et les lignes de la matrice des distances totales. Ensuite, le nombre total de kilomètres est divisé par le nombre total de déplacements pour obtenir la distance moyenne initiale parcourue au départ/à destination de l'entité.

#### b) Calcul des distances minimum théoriques (MCD)

La **première étape** de l'algorithme développé par K. Boussauw pour le calcul des MCD est de **maximiser le nombre de déplacements internes**, c'est-à-dire les déplacements dont l'origine et la destination se trouvent au sein d'une même entité.

Deux cas de figure sont possibles :

- Soit le nombre de déplacements au départ de l'entité (départs) est inférieur au nombre de déplacements à destination de l'entité (arrivées). L'entité peut être considérée comme un centre d'emplois : il y a plus de travailleurs qui viennent y travailler en provenance d'une autre entité que de travailleurs qui quittent l'entité pour trouver de l'emploi ailleurs. Dans ce cas, le nombre de déplacements en interne est égalé au nombre initial de départs et le nombre de départs est égalé à zéro, tandis que le nombre d'arrivées est égalé à la différence entre le nombre initial d'arrivées et le nombre de déplacements en interne. Cela revient à dire que tous les emplois disponibles dans l'entité sont désormais occupés par des travailleurs de l'entité, il y a donc moins de travailleurs qui doivent être recrutés à l'extérieur pour occuper les emplois disponibles dans l'entité :

si nombre de départs < nombre d'arrivées :

déplacements internes = nombre de départs initial

ET nombre de départs = 0

ET nombre d'arrivées = nombre initial d'arrivées - déplacements internes

---

<sup>3</sup> Avant de calculer la moyenne, les distances aberrantes ont toutefois été éliminées. Ont été considérées comme aberrantes les distances supérieures à trois fois la moitié de la distance au centroïde le plus proche (c'est-à-dire la distance intrazonale vol d'oiseau).

- Soit le nombre de déplacements à destination de l'entité (arrivées) est inférieur au nombre de déplacements au départ de l'entité (départs). L'entité a plutôt un profil résidentiel : il y a plus de travailleurs qui quittent l'entité pour trouver de l'emploi ailleurs que de travailleurs qui viennent y travailler en provenance d'une autre entité. Dans ce cas, le nombre de déplacements en interne est égalé au nombre initial d'arrivées et le nombre d'arrivées est égalé à zéro, tandis que le nombre de départs est égalé à la différence entre le nombre initial de départs et le nombre de déplacements en interne. Cela revient à dire que tous les emplois disponibles dans l'entité sont désormais occupés par des travailleurs de l'entité, il y a donc moins de travailleurs qui doivent aller chercher de l'emploi en dehors de l'entité :

si nombre d'arrivées < nombre de départs :  
déplacements internes = nombre d'arrivées initial  
ET nombre d'arrivées = 0

ET nombre de départs = nombre initial de départs - déplacements internes

Le nombre de déplacements internes après maximisation équivaut donc toujours au minimum du nombre initial de départs et d'arrivées, le nombre de déplacements dans une direction (soit au départ de l'entité, soit à destination de l'entité) est égal à zéro et le solde des départs et des arrivées reste le même qu'initialement (voir schéma en Figure 12).

A la fin de cette première étape, le nombre de déplacements internes obtenus pour chaque entité est utilisé pour remplir la diagonale d'une nouvelle matrice OD des déplacements : la matrice OD des déplacements qui correspond aux MCD.

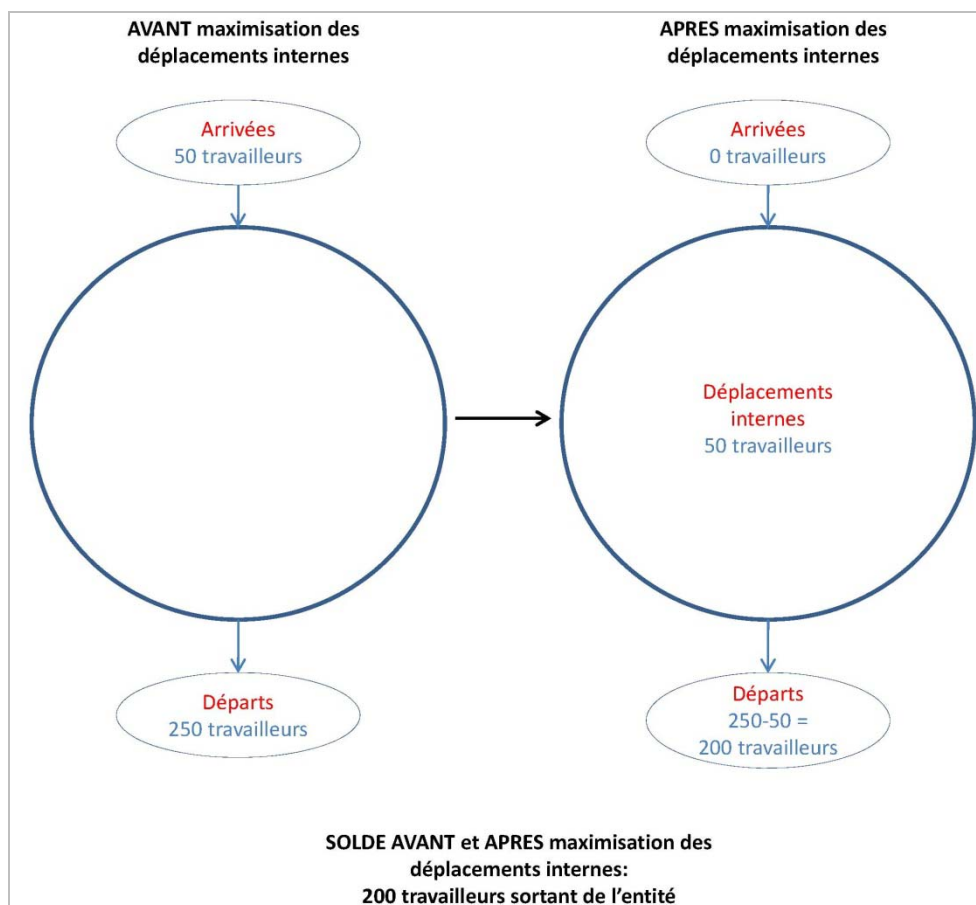


Figure 12. Principe de maximisation des déplacements intrazonaux

La **seconde étape** consiste en la **minimisation des distances pour les déplacements entre entités**. Après maximisation du nombre de déplacements en interne, il reste un surplus (pour les entités où il y avait initialement plus d'arrivées que de départs) ou un déficit (pour les entités où il y avait initialement plus de départs que d'arrivées, par exemple comme dans la Figure 12). L'objectif est alors de faire correspondre chaque surplus à un déficit (et inversement) de manière à minimiser les déplacements.

Pour cela, chaque entité  $i$  est considérée tour à tour :

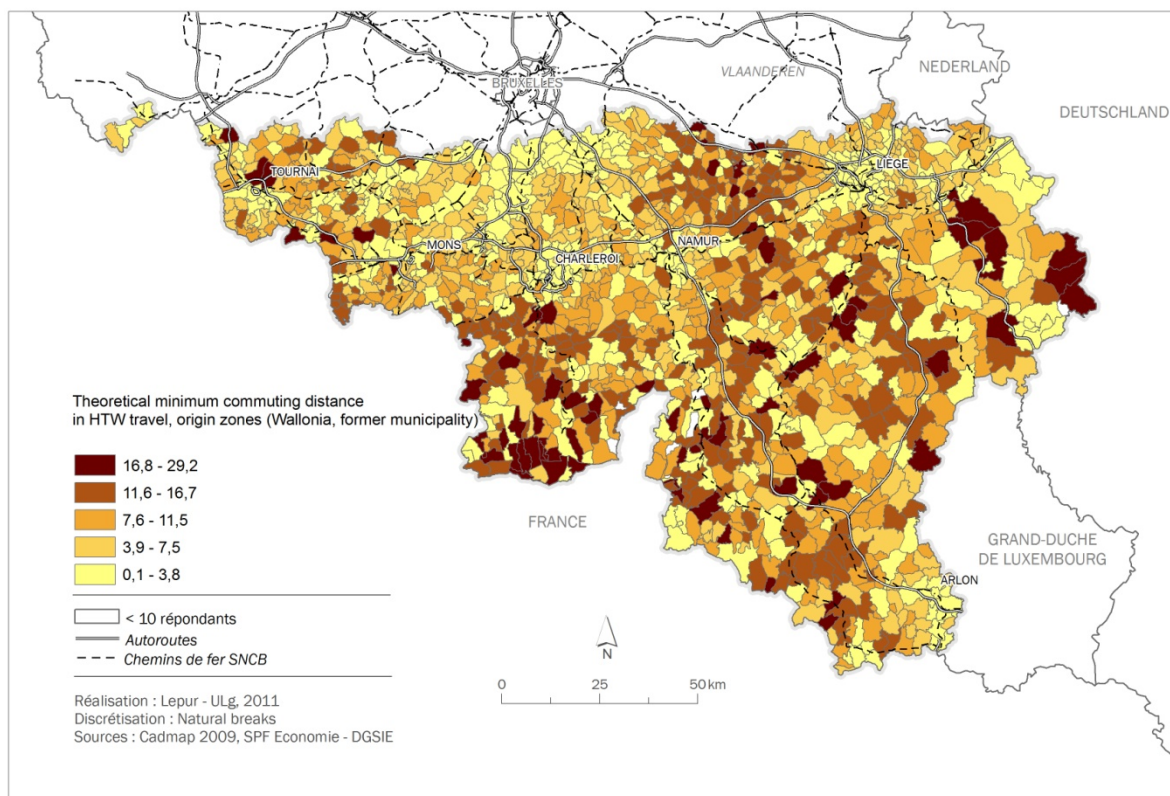
Si l'entité  $i$  présente un surplus, il faut trouver l'entité  $j$  la plus proche parmi les entités présentant un déficit. Un trajet du surplus de  $i$  est alors utilisé pour « recevoir » une partie du déficit de  $j$  : cela équivaut à dire qu'un emploi de  $i$  est occupé par un travailleur de  $j$ . La case  $(j,i)$  de la matrice OD des déplacements « MCD » est alors augmentée d'une unité.

Si au contraire l'entité  $i$  présente un déficit, il faut trouver l'entité  $j$  la plus proche parmi les entités présentant un surplus. Un trajet du déficit de  $i$  est alors utilisé pour « remplir » une partie du surplus de  $j$ . La case  $(i,j)$  de la matrice OD des déplacements « MCD » est alors augmentée d'une unité.

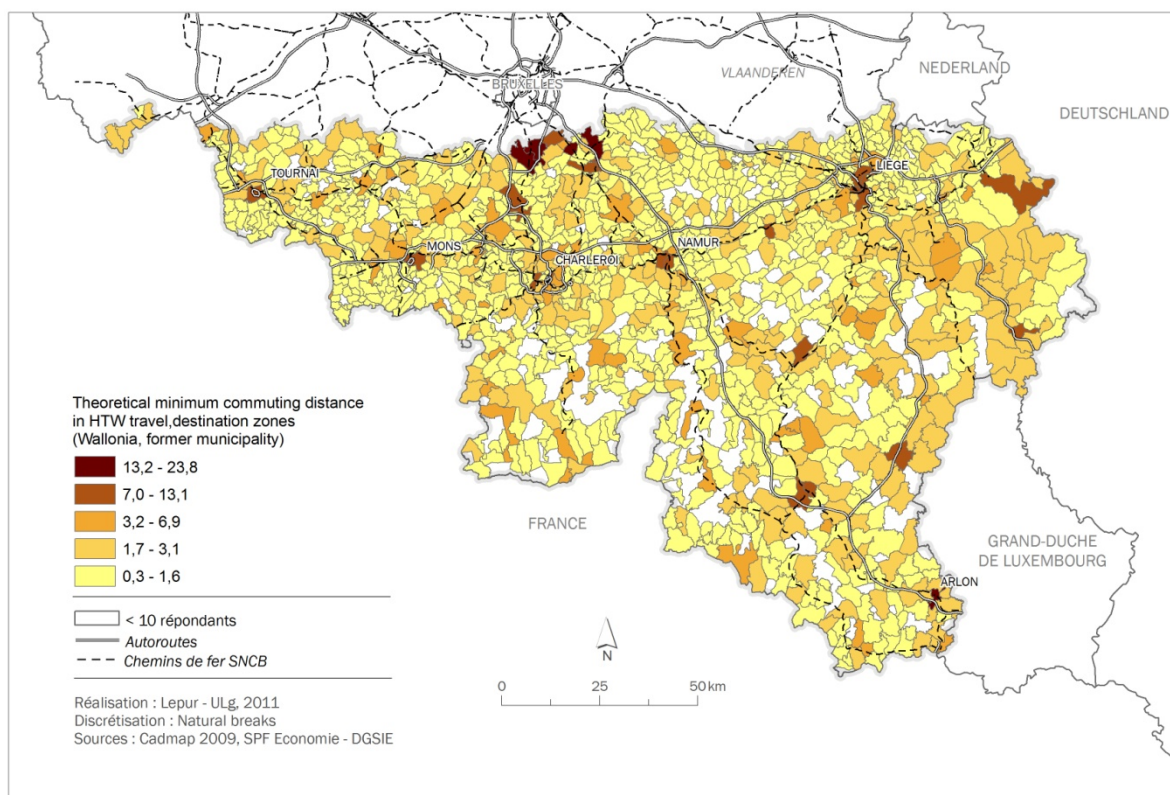
Une fois qu'un trajet de l'entité  $i$  a ainsi été utilisé, l'algorithme passe à l'entité suivante et procède de la même façon pour en utiliser un trajet, et ainsi de suite. Une fois que toutes les entités ont été passées en revue, le cycle est répété jusqu'à ce que tous les surplus et les déficits aient été mis en correspondance.

La matrice OD des déplacements MCD est alors complète et sa multiplication par la matrice des distances donne une matrice des distances totales parcourues entre chaque paire d'entités  $(i, j)$  si chaque travailleur effectuait la distance minimale théorique. Le nombre total de départs et d'arrivées pour chaque entité est calculé en sommant respectivement les colonnes et les lignes de la matrice OD des déplacements MCD. Le nombre total de kilomètres parcourus au départ et à destination de chaque entité est calculé en sommant respectivement les colonnes et les lignes de la matrice des distances totales. Ensuite, le nombre total de kilomètres est divisé par le nombre total de déplacements pour obtenir la distance moyenne parcourue au départ/à destination de l'entité si chaque travailleur effectuait la distance minimale théorique.

Ce sont ces distances moyennes « MCD » qui sont représentées en Figure 13 et Figure 14. Ces cartes reprennent les résultats à l'origine puis à la destination, à l'échelle des anciennes communes. Le traitement n'a pas été réalisé à l'échelle des secteurs statistiques car la plupart des secteurs statistiques ne présentaient pas suffisamment de répondants que pour donner des résultats statistiquement corrects. C'était le cas également pour certaines anciennes communes : nous avons choisi de ne pas représenter les anciennes communes pour lesquelles il y avait moins de 10 répondants à l'ESE de 2001, que ce soit à l'origine, ou à la destination.



**Figure 13. Distances minimales moyennes théoriques pour un déplacement domicile-travail au départ des anciennes communes (2001)**



**Figure 14. Distances minimales moyennes théoriques pour un déplacement domicile-travail à destination des anciennes communes (2001)**

Ces cartes montrent des variations importantes des MCD, tant à l'origine qu'à la destination.

A l'origine (Figure 13), les anciennes communes présentant des valeurs faibles (moins de 8km) se situent globalement dans les grandes villes du sillon industriel et la périphérie sud de Bruxelles. Les faibles valeurs indiquent une grande proximité entre domiciles et emplois, soulignant de meilleures opportunités de parcourir de courtes distances pour les déplacements domicile-travail. A l'inverse, les distances à parcourir seront nécessairement importantes dans les entités où les valeurs de MCD à l'origine sont élevées : cela exprime l'éloignement de ces zones par rapport à l'emploi.

A la destination (Figure 14), les anciennes communes présentant des valeurs élevées (plus de 7 km) constituent les pôles d'emplois principaux de la région wallonne. Les valeurs élevées mettent en évidence une distance importante entre les travailleurs et leur lieu de travail. Au vue du nombre d'emplois élevé à pourvoir dans ces entités, il est nécessaire d'attirer des travailleurs provenant d'entités extérieures plus éloignées.

### 3.2.3.2 *Excess commuting*

L'« *excess commuting* » (ou « *wasteful commuting* » ou encore « *excess rate* ») est défini comme le rapport entre les distances domicile-travail effectivement parcourues et les distances minimales théoriques calculées (Boussauw, Neutens et Witlox 2011). Il peut être considéré comme un indicateur du potentiel de la zone considérée à pouvoir « absorber » une diminution du volume de trafic sans subir de sévères dommages économiques.

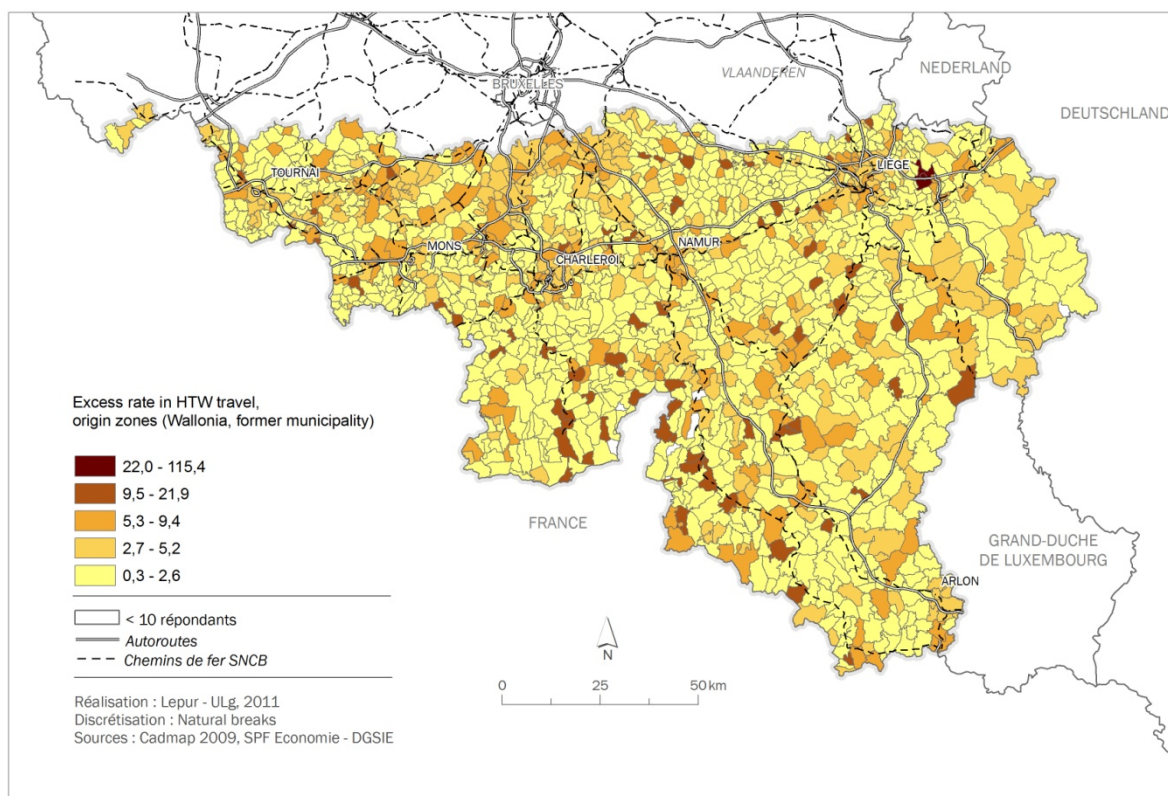
L'*excess rate* permet d'identifier les zones où des opportunités existent de réduire les distances domicile-travail parcourues. Ces distances seraient susceptibles d'être réduites sous l'influence de plusieurs facteurs : augmentation des prix du pétrole, urbanisation plus compacte, congestion, politiques dissuasives de mobilité.

L'*excess rate* est donc calculé comme suit :

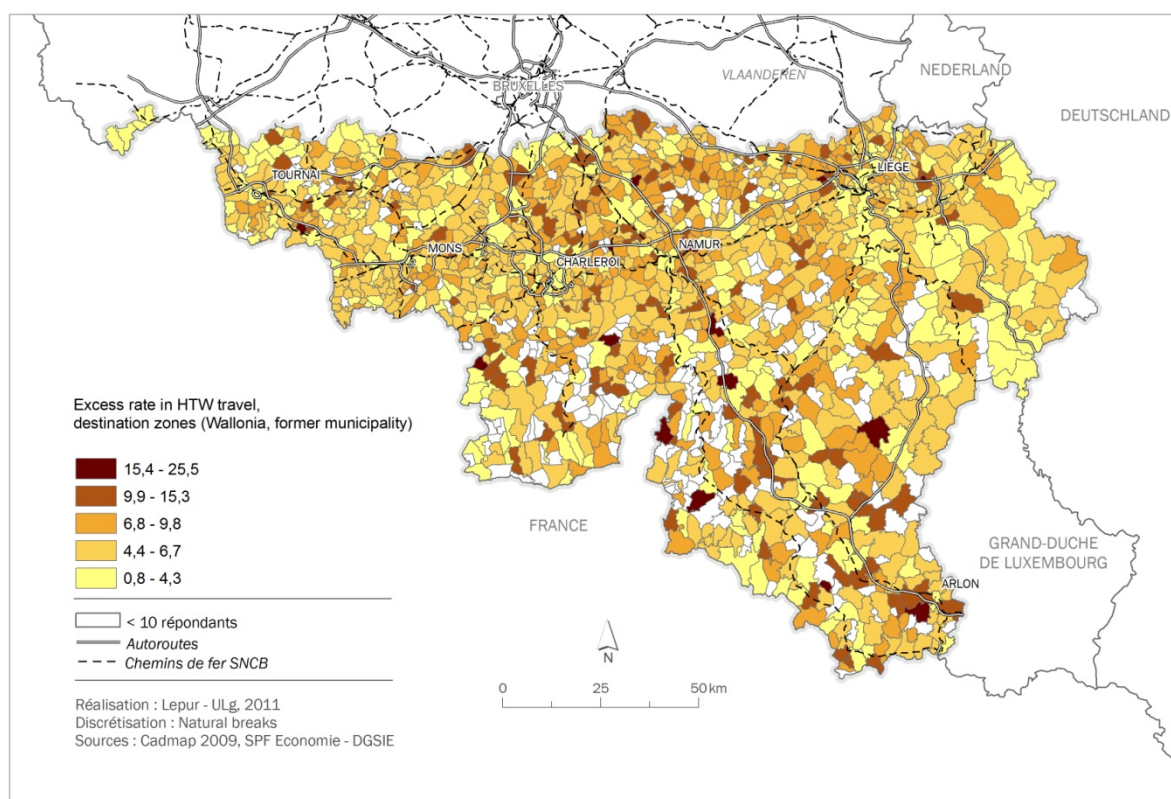
$$\frac{\text{distance moyenne initiale parcourue au départ/à destination de l'entité}}{\text{distance moyenne parcourue au départ/à destination de l'entité si chaque travailleur effectuait la distance minimale théorique}}$$

Les cartes des Figure 15 et Figure 16 présentent ces résultats. A l'origine, on remarque des anciennes communes où les travailleurs effectuent plus de kilomètre que nécessaire à la fois dans les pôles d'emplois principaux et dans les zones rurales plus reculées du territoire. Deux facteurs explicatifs peuvent être mis en cause. Tout d'abord, la facilité à se déplacer vers d'autres pôles d'emplois en dehors de l'entité de résidence. On remarque par exemple des scores élevés le long des axes ferroviaires reliant Mons, La Louvière et Namur à Bruxelles. Ensuite, l'inadéquation entre le profil des travailleurs et les opportunités d'emplois au domicile peut expliquer de tels comportements.

L'ensemble des cartes présentées dans cette section a pour principal objectif d'illustrer les concepts de MCD et d'*excess rate*, en prenant l'exemple de la situation en 2001. En effet, ces concepts seront utilisés dans les scénarii prospectifs : après implémentation des scénarii, les MCD et l'*excess rate* seront calculés afin de caractériser chaque scénario, mais aussi de permettre une comparaison des scénarii entre eux. L'analyse des MCD et *excess rates* n'est donc pas à considérer comme une fin en soi, mais plutôt comme un outil permettant de comparer les scénarii.



**Figure 15. Excess rate des déplacements domicile-travail au départ des anciennes communes (2001)**



**Figure 16. Excess rate des déplacements domicile-travail à destination des anciennes communes (2001)**

## 4. ANALYSES STATISTIQUES POUR L'IDENTIFICATION DE VARIABLES TERRITORIALES STRUCTURANTES PERMETTANT D'EXPLIQUER LES ÉMISSIONS DE GES

Comme mis en évidence dans le rapport final de la subvention 2009-2010, il est difficile d'expliquer les variations des émissions de GES par la variation d'une seule autre variable territoriale ou socio-économique. De plus, il est nécessaire de vérifier qu'il n'existe pas d'autre interprétation possible, qui passerait par exemple par un tiers facteur s'interposant entre les deux variables étudiées. Les analyses de régression linéaire multiple et les modèles d'équations structurelles (MES) permettent d'offrir des solutions à cet égard.

### 4.1 ANALYSES DE RÉGRESSION LINÉAIRE MULTIPLE

La régression linéaire multiple consiste à expliquer un phénomène Y par la conjonction des variations de plusieurs phénomènes X<sub>1</sub>, X<sub>2</sub>, ...X<sub>n</sub>. En d'autres mots, cette construction consiste à rechercher une contrepartie empirique à une relation théorique. La contrepartie empirique prend la forme d'un modèle probabiliste paramétré, cela en regardant les données comme une réalisation particulière de la variable dépendante (Halleux 2005). Formellement:

$$Y = \beta_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \dots + \beta_k X_k + \varepsilon$$

Avec:

**Y** = la variable à expliquer ou variable dépendante. Elle reprend les valeurs observées qui sont fonction de la taille de l'échantillon.

**X<sub>1</sub>, X<sub>2</sub>, ..., X<sub>k</sub>** = les variables explicatives ou variables indépendantes.

**β<sub>1</sub>, β<sub>2</sub>, ..., β<sub>k</sub>** = les paramètres à estimer (les inconnues) ou coefficients de régression. Ceux-ci sont généralement estimés par la méthode des moindres carrés ordinaires (MCO).

**ε** = le terme d'erreur aléatoire ou résidus. Il représente la déviation de la valeur observée par rapport à celle attendue par le modèle. Idéalement, ce terme doit avoir une distribution normale.

Au-delà de l'équation formelle, les paramètres suivants permettent d'analyser les résultats de la régression:

**R<sup>2</sup>**: mesure la force explicative d'un modèle. Multiplié par 100, cet indicateur renseigne le pourcentage de la variance expliquée par le modèle. Un *R<sup>2</sup> ajusté* signifie que la robustesse du modèle a été évaluée en prenant en compte la taille de l'échantillon ainsi que le nombre de variables.

**Coefficient de régression (Beta)**: mesure le changement de la variable dépendante (en unité d'écart type) lorsque la variable explicative augmente d'un écart type. Il permet la comparaison des effets de l'insertion de chacune des variables dans le modèle. Il constitue en quelque sorte une mesure de la contribution de chaque variable au modèle.

**F-test** = test de la significativité du modèle. Il teste la probabilité qu'aucune des variables explicatives X ne soit liée à la variable à expliquer Y (hypothèse nulle telle que R<sup>2</sup>=0). Généralement, on considère que le modèle est significatif lorsque **p** est



inférieur à 0,05. C'est-à-dire qu'il y a moins de 5% de chances que le modèle n'explique pas la variable observée Y.

Dans notre cas, la variable dépendante Y équivaut aux émissions de GES par travailleur et par trajet (IPE\_CO2). La consommation énergétique par travailleur et par trajet (IPE\_kWh), la part modale de la voiture (PART\_V) et les distances moyennes parcourues tous modes de transport confondus (DIST\_MOY\_TOT) n'ont été évalués qu'à titre indicatif et ne sont pas présentés dans cette section. Nous disposons des émissions de GES liées aux déplacements domicile-travail à trois niveaux d'échelle spatiale (secteur statistique, ancienne commune, commune). Cependant, nous avons choisi de concentrer nos analyses uniquement sur les anciennes communes car ce découpage constitue un compromis idéal entre l'échelle communale, présentant des données trop agrégées, et l'échelle des secteurs statistiques, présentant de trop fortes variabilités et un échantillon parfois trop petit.

#### 4.1.1 Préparation des données

L'élaboration d'un modèle de régression multiple nécessite une préparation minutieuse des données pour réduire au minimum les risques d'erreurs et, *in fine*, améliorer la force du modèle.

Après avoir effectué un tri sur les données dans Excel (suppression des entités ayant moins de 10 répondants), nous avons ensuite chargé les données dans **SPSS** (version d'essai), un logiciel de traitements de données statistiques. Nous avons réalisé une série de **statistiques descriptives** afin d'évaluer la normalité de nos données (cf. Tableau 6).

Variable	Unité	Minimum	Maximum	Moyenne	Écart type
IPE_CO2	kg.équ.CO2/pers.-trajet	1,4	5,4	2,8	0,6
Part_VP	%	50,3	100,0	84,7	6,215
MOY_KM	km	13,8	47,1	26,8	5,574
AGE_MOY	année	35,4	43,4	39,7	1,147
VP_LGMT	VP/lgmt	0,5	1,6	1,1	0,2
COUPLE_ENF	% couples avec 1/+ enf.	18,2	69,6	46,9	6,508
TM_MOY	pers./ménage	1,6	3,2	2,5	0,2
NIV_EDU	% diplôme ens. sup.	6,9	74,0	34,3	8,856
REV_MOY	€/an	13791	45140	23577	3982,94
DENS_POP	hab./ha	0,1	55,4	3,0	5,553
DAHN	hab.+empl./ha urbanisé	6,1	214,5	23,6	13,672
EMPL_10KM	emplois	596	176782	30522	36026
MIXITE_URBA	Indice composite	4,4	35,4	14,4	4,471
ACCESS_BUS	Indice composite	0,0	659,5	24,3	40,856
ACCESS_TRAIN	Indice composite	0,0	0,9	0,1	0,1
DENS_ROUTES	km/ha	0,1	3,8	0,6	0,5

**Tableau 6. Statistiques descriptives**

Bien que la plupart de nos variables respectent une courbe de type "Gaussienne" centrée sur leur moyenne, nous avons également remarqué que beaucoup d'entre elles présentaient une asymétrie positive importante, ainsi qu'un indice de Kurtosis (coefficient d'aplatissement) élevé. C'est pourquoi nous avons choisi d'améliorer leur normalité en effectuant une transformation sur les valeurs (généralement un logarithme en base 10). Le test de normalité de Kolomogrov-Smirnov a été effectué sur chaque variable avant et après transformation pour évaluer la pertinence de la correction (cf. Annexe – Résultats des tests de Kolmogorov-Smirnov). Ce sont ces **variables transformées** qui ont servi de variables dépendantes et indépendantes dans notre modèle. Nous devons donc être vigilants sur cet aspect lors de l'interprétation des résultats car les unités des valeurs que nous manipulons désormais ne représentent plus la réalité de manière directe.

#### 4.1.2 Choix et modalités d'utilisation des variables

Le choix des variables permettant d'expliquer les émissions de GES est effectué sur base des indicateurs construits lors de la première année de recherche (cf. Annexe - Liste des variables intervenant dans les modèle). Cependant, l'utilisation de ces variables dans un modèle de régression multiple génère des problèmes qui doivent être traités préalablement. Ceux-ci sont dus soit aux données (la multicollinéarité), soit à leur interprétation (la causalité ; (Pouyanne 2004).

Le problème de **multicollinéarité** est davantage de nature technique. Il apparaît lorsque plusieurs facteurs varient ensemble (covarient) de telle manière qu'une relation parfaite ou presque parfaite existe entre deux ou plusieurs variables explicatives du modèle. Cependant, dans cette situation il n'est pas possible de mesurer l'impact individuel de chaque variable sur la variable à expliquer, ce qui compromet l'efficacité des régressions par les moindres carrés ordinaires. Le problème de multicollinéarité peut être résolu en spécifiant un modèle à partir des variables qui ne sont pas corrélées entre elles. Les variables de notre modèle ont donc été choisies sur base du coefficient de corrélation de Pearson présenté dans le précédent rapport. Dans la mesure du possible, seules les variables ayant une significativité au-delà de 5% (c'est à dire les variables faiblement corrélées l'une à l'autre) ont été regroupées dans le même modèle.

Le problème de **causalité** est davantage lié à l'interprétation. Généralement, en raison de l'interaction forte entre la forme urbaine et les caractéristiques socio-démographiques, il est difficile (voir impossible dans certains cas) de dégager des liens de cause à effet à partir des corrélations statistiques constatées (Pouyanne 2004). Afin de pallier cette difficulté, il est nécessaire de séparer les types de variables. C'est pourquoi nous avons choisi, dans un premier temps, de créer **deux modèles**, l'un regroupant l'ensemble des variables territoriales, l'autre l'ensemble des variables socio-économiques. Par ailleurs, nous tenions également à estimer l'importance relative des variables socio-économiques par rapport aux variables socio-économiques dans l'explication des émissions de GES liées aux déplacements domicile-travail. Dès lors, dans un deuxième temps, nous avons également créé un **troisième modèle** regroupant les variables territoriales et les variables socio-économiques.

L'insertion des variables explicatives dans ces trois modèles peut se faire de différentes manières (*Enter, Forward, Backward, Remove, Stepwise*). Nous avons choisi la méthode « **stepwise** » pour les deux premiers car il s'agit de la plus sophistiquée. Les variables sont entrées une à une dans le modèle et leurs valeurs sont évaluées. Si la variable ajoutée contribue au modèle, alors elle est conservée, mais toutes les autres variables du modèle sont ensuite testées à nouveau afin de voir si elles contribuent toujours toutes au succès du modèle. Si ce n'est pas le cas, alors la variable en question est enlevée. Cette méthode permet de s'assurer que seul le plus petit nombre possible de variables sera retenu. Pour le troisième modèle, les variables ont été intégrées selon la méthode « **enter** ». C'est-à-dire que les deux groupes de variables sont insérés de manière homogène dans le modèle (fonction "**block**"), de telle manière à évaluer l'apport du deuxième groupe de variables (les variables socio-économiques) sur le modèle initial ne comportant que le premier groupe de variables (les variables territoriales).

Finalement, il est important de trouver le juste milieu entre, d'une part, spécifier largement le modèle au risque de rencontrer des problèmes de multicolinéarité et, d'autre part, spécifier étroitement le modèle où l'on court le risque d'omettre des variables pertinentes (Pouyanne 2004). Conscients de ces deux limitations, nous avons tenté de résoudre ce dilemme par des tests successifs.

### 4.1.3 Résultats et interprétation

#### Modèle 1: Émissions de GES et variables territoriales

Parmi les variables territoriales présentées dans le précédent rapport, 6 d'entre elles sont apparues comme significatives pour expliquer la variation des émissions de GES liées aux déplacements domicile-travail en Wallonie

Le Tableau 7 informe sur la proportion de la variance prédite par notre modèle (Beta), ainsi que sur la significativité de chacune des variables indépendantes ( $p$ ). L'ordre dans lequel les variables apparaissent dans le tableau est important car il traduit l'évolution de l'erreur des estimateurs (*Standard Error of the Estimates*) au sein du modèle à chaque nouvel ajout. Finalement, la dernière colonne met en évidence la force du modèle ( $R^2$ ) et sa significativité globale (F et  $p$ ).

<b>Variabes explicatives</b>	<b>Beta</b>	<b><math>p</math></b>	<b>Résumé</b>
DENS_POP	-0,277	<0,005	$R^2$ ajusté = 0,476 F (6,1427) = 218,0 $p = < 0.005$ (méthode <i>stepwise</i> ) N = 1434
EMPL_10KM	-0,480	<0,005	
MIXITE_URBA	-0,228	<0,005	
ACCESS_TRAIN	0,196	<0,005	
ACCESS_BUS	-0,074	<0,005	
DENS_ROUTES	-0,078	<0,035	

Tableau 7. Modèle 1: Émissions de GES et variables territoriales

De manière globale, notre modèle permet d'expliquer 47,6% de la variance. C'est-à-dire que près de la moitié des émissions liées aux déplacements domicile-travail s'explique par des variables territoriales, précisément (1) le nombre d'emplois à 10 kilomètres (EMPL\_10KM), (2) la densité de population brute (DENS\_POP), (3) la mixité des fonctions au sein des zones urbanisées (MIXITE\_URBA), (4) l'accessibilité en train (ACCESS\_TRAIN), (5) l'accessibilité en bus (ACCESS\_BUS) et (6) la densité du réseau routier (DENS\_ROUTES). L'ordre dans lequel les variables apparaissent dans le tableau montre que la densité constitue la variable indépendante principale du modèle. À l'opposé, la densité du réseau apparaît comme une variable moins fondamentale: son ajout n'apporte plus grand-chose au modèle.

Le nombre d'emplois à 10 kilomètres constitue une variable explicative forte comparée aux 5 autres variables mobilisées (Beta = -0,480). Ensuite viennent la densité de population brute et la mixité fonctionnelle. Ces deux variables contribuent de manière conséquente au modèle et dans des proportions similaires (Beta = -0,277 et -0,228 respectivement). À l'opposé, la densité du réseau routier permet également d'expliquer les émissions de GES, mais dans une faible mesure (Beta = -0,078). De plus, il y a 3,5% de chance que cette variable ne permette pas d'expliquer la variable dépendante (les émissions de GES). C'est donc la combinaison de la densité avec la mixité fonctionnelle et la proximité à l'emploi qui permet d'augmenter de manière la plus significative la force explicative de notre modèle. Ces observations corroborent l'affirmation de Ewing & Cervero (2001, p.100): "beaucoup d'études se focalisent sur la densité, mais est-ce la densité qui importe? Non, probablement pas. Ce qui importe est probablement ce qui accompagne la densité". La densité, la mixité fonctionnelle et la proximité à l'emploi constituent donc des facteurs essentiels permettant d'expliquer la bonne performance énergétique des déplacements domicile-travail.

Par ailleurs, l'accessibilité aux transports en communs n'apparaît pas comme un facteur explicatif fondamental dans l'explication des émissions de GES. L'accessibilité en bus ne permet d'expliquer qu'une part très faible de la variabilité (Beta = -0,074). Le train permet d'en expliquer davantage, mais il contribue de manière positive aux émissions (+0,196), ce qui veut dire que la bonne accessibilité aux gares aurait tendance à faire augmenter les émissions de GES liées au déplacement domicile-travail. A priori, ces résultats infirment l'hypothèse que l'accès aux transports en commun permet de diminuer de manière significative les émissions de GES à l'échelle régionale. Ils corroborent l'observation de Boussauw et Witlox (2009) faite en Flandre: "le choix modal apparaît avoir un faible impact sur la performance énergétique des déplacements domicile-travail à l'échelle de la région" (p.1). C'est pourquoi, contrairement à ce qui est généralement supposé, le choix du mode de transport permet peu d'expliquer les émissions de GES. Cela s'explique, d'une part, par le fait que les déplacements en train représentent généralement des distances bien plus longues (50,7 km en moyenne en 2001) que celles effectuées en voiture (23,3 km en moyenne en 2001), ce qui implique que les gains d'émissions par l'utilisation d'un mode de transport peu émetteur de GES sont contrebalancés par l'importance des distances parcourues. De plus, les déplacements doux (à vélo ou à pied) ne représentent qu'une faible proportion de la distance totale parcourue par les travailleurs. En bref, ce qui permet d'expliquer la performance énergétique des déplacements domicile-travail est principalement le nombre de kilomètres parcourus et non le mode de transport utilisé.

## **Modèle 2: Émissions de GES et variables socio-économiques**

Parmi les variables socio-économiques présentées dans le précédent rapport, 6 d'entre elles ont été retenues pour expliquer la variation des émissions de GES liées aux déplacements domicile-travail en Wallonie (cf. Tableau 8).

<b>Variables explicatives</b>	<b>Beta</b>	<b>p</b>	<b>Résumé</b>
VP/LGMT	0.693	<0,005	R <sup>2</sup> ajusté = 0,239 F (5,1465) = 93.450 p = < 0.005 (méthode <i>stepwise</i> ) N = 1471
REV_MOY	-0.405	<0,005	
COUPLE_ENF	-0.205	<0,005	
NIV_EDU	0.144	<0,005	
AGE_MOY	-0.107	<0,005	
TM_MOY est une variable indépendante non significative dans ce modèle			

**Tableau 8. Modèle 2: Émissions de GES et variables socio-économiques**

Ce deuxième modèle regroupant les variables socio-économiques permet d'expliquer 23,9% de la variance. C'est-à-dire que près d'un quart des émissions liées aux déplacements domicile-travail s'explique par (1) le nombre de voitures par logement (VP/LGMT), (2) le revenu moyen de la population (REV\_MOY), (3) la part de couples avec un ou plusieurs enfants (COUPLE\_ENF), (4) la part de la population ayant complété le niveau d'enseignement supérieur (NIV\_EDU), et (5) l'âge moyen de la population (AGE\_MOY). Dans notre cas, le nombre de voitures par logement constitue la variable indépendante principale du modèle. À l'opposé, l'âge moyen apparaît comme une variable moins fondamentale: son ajout n'apporte plus grand-chose au modèle.

Le nombre de voitures par logement constitue une variable explicative forte comparé aux 5 autres variables mobilisées (Beta = 0,693). Ensuite viennent le revenu moyen (Beta = -0,405) et la part de couples avec un ou plusieurs enfants (-0,205). Le niveau d'éducation permet également d'expliquer les émissions de GES, bien qu'il contribue au modèle dans une moindre mesure (Beta = 0,144). Par contre, l'âge moyen de la population ne constitue pas une variable explicative forte (Beta = -0,107). Ces résultats suggèrent que la possession d'une voiture personnelle et le niveau d'éducation sont des facteurs importants pour expliquer les fortes émissions de GES liées aux déplacements domicile-travail. Par ailleurs, dans ce modèle, le niveau de revenus et le nombre de couples avec enfants semblent expliquer les faibles émissions.

Comparativement à la littérature existante sur le lien entre mobilité et forme urbaine, nos résultats soulignent d'avantages l'importance des variables territoriales dans l'explication des émissions de GES. En effet, Stead (2001) par exemple met en évidence que 27% de la variation des distances parcourues s'explique par des caractéristiques de l'occupation du sol, et 43% s'explique par des caractéristiques socio-économiques (p.12). Parmi les raisons permettant d'expliquer une telle différence de résultats figurent la différence entre les bases de données utilisées (année, taille de l'échantillon, échelle d'analyse), mais également la qualité des indicateurs mobilisés dans les analyses de régressions. Comparativement à Stead (2001) toujours, la précision relativement élevée de nos variables territoriales a l'avantage de décrire de manière fine l'occupation du sol, ce qui permet d'expliquer un grande part de la variations des émissions de GES.

### **Modèle 3: Émissions de GES, variables territoriales et variables socio-économiques**

Parmi les variables territoriales et les variables socio-économiques présentées dans le précédent rapport, 10 d'entre elles sont apparues comme étant des variables explicatives significatives.

Le Tableau 9 informe sur la proportion de la variance prédite par notre modèle (Beta), ainsi que sur la significativité de chacune des variables indépendantes et du modèle dans sa globalité ( $p$ ). L'ordre dans lequel les variables apparaissent dans le tableau n'a plus d'importance dans ce cas étant donné que les valeurs sont introduites de manière groupée (méthode *enter* et *block*). Les variables ont donc été triées par type et en fonction du coefficient Beta. Finalement, la dernière colonne met en évidence la force du modèle ( $R^2$ ) et sa significativité globale (F et  $p$ ).

<b>Variables explicatives</b>	<b>Beta</b>	<b><math>p</math></b>	<b>Résumé</b>
EMPL_10KM	-0,507	<0,005	$R^2$ ajusté = 0,528 F (10,1423) = 161,589 $p = < 0.005$ (méthode <i>enter</i> et <i>block</i> ) N = 1434
DENS_POP	-0,210	<0,005	
MIXITE_URBA	-0,141	<0,005	
ACCESS_TRAIN	0,118	<0,005	
ACCESS_BUS	-0,047	0,087	
COUPLE_ENF	-0,174	<0,005	
VP/LGMT	0,174	<0,005	
NIV_EDU	0,172	<0,005	
AGE_MOY	-0,055	<0,005	
REV_MOY	0,033	0,429	

**Tableau 9. Modèle 3: Émissions de GES, variables territoriales et variables socio-économiques**

Le troisième modèle met en évidence que 52,8% de la variance des émissions de GES liés aux déplacements domicile-travail s'expliquent par la combinaison de variables territoriales et de variables socio-économiques. La partie de la variance non expliquée (47,2%) doit être attribuée, d'une part, à l'imprécision de nos indicateurs : ceux-ci parfois ne décrivent pas la réalité de manière assez précise que pour pouvoir expliquer d'avantage la variation des émissions de GES (c'est le cas de la variable d'accessibilité en train par exemple qui n'intègre pas toute la complexité de la mobilité et des déplacements). D'autre part, le reste de la variance doit également être imputé à des facteurs comportementaux non pris en compte par nos indicateurs. Par exemple, les comportements résultant des arbitrages des ménages sont absents de nos modèles qui se focalisent d'avantage sur la modélisation de la structure du territoire et non sur la modélisation des comportements des ménages. Ceci étant dit, ces résultats permettent tout de même de mettre en évidence la contribution relative de chaque type de variables dans l'explication des émissions de GES générées par les déplacements domicile-travail. Contrairement à nos attentes, l'ajout des variables socio-économiques dans notre modèle ne permet d'augmenter sa force que de 5% (évolution du  $R^2$  ajusté de 0,475 à 0,528 avec l'ajout des variables socio-économiques dans le modèle initial ne comportant que les variables territoriales). Ceci est principalement lié au fait que la multicollinéarité augmente au fur et à mesure que le nombre de variables insérées dans le modèle augmente (un plus grand nombre de variables sont autocorrélées malgré les précautions d'usages qui ont été prises).

Le détail des résultats montre que (1) l'emploi à 10 kilomètres (EMPL\_10KM), (2) la densité de population (DENS\_POP), (3) la mixité fonctionnelle (MIXITE\_URBA), ainsi que (4) la part de couples avec un ou plusieurs enfants (COUPLE\_ENF), le nombre de voitures par logement VP/LGMT), et le niveau d'éducation (NIV\_EDU) constituent des variables explicatives fortes. À l'opposé, l'accessibilité en bus, l'âge et le revenu moyen de la population ne permettent pas d'expliquer de manière significative les émissions de GES dans ce modèle. Ceci corrobore certains résultats obtenus dans les deux précédents modèles et permet notamment de réaffirmer l'importance des variables explicatives "fortes" telles que l'emploi à 10 kilomètres ou la part de couples avec un ou plusieurs enfants. À l'opposé, certains doutes peuvent apparaître par rapport à des variables moins "robustes" telles que le revenu moyen. En effet, cette variable s'avère avoir une significativité très faible dans notre troisième modèle ( $p=0,429$ ), ce qui remet en question sa pertinence. Le niveau d'éducation quant à lui apparaît être plus stable car il apparaît comme une variable explicative forte à la fois dans les deuxième et troisième modèles. Étant donné que le niveau d'éducation (ici la part de la population ayant complété le niveau d'enseignement supérieur) est souvent considéré comme un *proxy* du revenu, ce dernier sera privilégié dans nos investigations futures.

#### 4.1.4 Limitations

En effectuant les analyses de régressions linéaires multiples, nous avons remarqué que l'autocorrélation entre les variables était forte. Bien que certains la jugeraient acceptable, cela constitue un biais non négligeable. Dans le troisième modèle par exemple, lorsque le groupe de variables socio-économiques est inséré en premier, le groupe de variables territoriales inséré ensuite ne permet alors d'améliorer la force du modèle que de quelques pourcents. Ceci prouve que la multicolinéarité est forte entre nos variables: plusieurs d'entre elles varient ensemble (covarient) alors qu'elles devraient idéalement être relativement indépendantes l'une de l'autre. C'est pourquoi nous mettrons davantage en avant les résultats obtenus dans les deux premiers modèles étant donné que nous les jugeons plus fiables (ils comportent moins de variables ce qui réduit les risques d'erreur d'interprétation). Par ailleurs, les modèles d'équations structurelles présentés au point suivant permettent d'apporter une solution à ce problème.

#### 4.1.5 Conclusions

Les analyses de régression présentées ci-dessus nous ont permis d'identifier les principaux facteurs liés à la structure du territoire et à ses caractéristiques socio-économiques permettant d'expliquer les émissions liées aux déplacements domicile-travail. Nous en retiendrons les enseignements suivants:

- Une part importante (47,6%) des émissions de GES liées aux déplacements domicile-travail s'explique par des variables territoriales. Précisément, il s'agit essentiellement de la proximité à l'emploi, de la densité de population et de la mixité fonctionnelle.
- Le choix du mode de transport permet peu d'expliquer les émissions de GES. Ce qui importe davantage sont les distances parcourues.
- Près d'un tiers (23,9%) des émissions de GES liées aux déplacements domicile-travail s'explique par des variables socio-économiques. Le niveau d'éducation, considéré comme un *proxy* du revenu, le nombre de véhicules personnels par logement et le nombre de couples avec un ou plusieurs enfants apparaissent comme des variables explicatives fortes des émissions de GES.
- Combinées, les variables territoriales et les variables socio-économiques permettent d'expliquer plus de la moitié (52,8%) des émissions liées aux déplacements domicile-travail. Le reste de la variabilité que nous n'avons pas pu expliquer est attribuable notamment à des variables comportementales résultant des arbitrages des ménages ou individuels.

- Finalement, ce qui importe pour réduire les émissions de GES liées aux déplacements domicile-travail n'est pas tant la densité en tant que telle, mais bien ce qui l'accompagne. Dans cette étude, il s'agit de la mixité fonctionnelle et de la proximité à l'emploi. Dès lors, densifier en suivant le principe d'intensité d'utilisation du sol apparaît comme étant un levier majeur de la structure du territoire et permettant de réduire de manière significative les émissions de GES liées aux déplacements domicile-travail.

## 4.2 MODELES D'EQUATIONS STRUCTURELLES (MES)

Les modèles d'équations structurelles (MES) sont des modèles linéaires qui englobent et généralisent les méthodes linéaires classiques, dont les régressions linéaires multiples présentées ci-dessus. Une des particularités des MES est qu'ils permettent de traiter simultanément plusieurs variables observées ou latentes (non directement observables), explicatives ou à expliquer. De plus, en modélisant des variables intermédiaires, ils permettent également de faire la distinction entre les effets totaux, directs et indirects. Ils s'inscrivent dans une démarche confirmatoire: on pose d'abord des hypothèses sur les relations entre variables et on regarde ensuite si elles sont infirmées ou confirmées par le modèle. Apparue dans les années 1970, cette méthode d'analyse est généralement utilisée en sciences humaines et sociales, notamment pour l'étude de concepts théoriques inobservables (anxiété, satisfaction concernant l'emploi, motivation au travail, etc.). Récemment, elle a été utilisée dans le domaine de l'aménagement du territoire dans le but d'identifier l'impact de l'occupation du sol sur les comportements de mobilité. Van Acker (2010) par exemple a utilisé cette technique pour incorporer le style de vie et les attitudes dans l'étude de l'interaction entre les comportements de mobilité et l'occupation du sol. C'est sur ces travaux que se basent les analyses qui suivent.

La Figure 1 ci-dessous illustre la manière dont nous avons construit notre modèle d'équation structurelle dans le but d'évaluer l'impact des variables territoriales et des variables socio-économiques sur les émissions de GES. Le modèle consiste en un set d'équations simultanées:

1. Deux sous-modèles de mesure pour les variables explicatives (endogènes)
2. Un indicateur constituant la variable à expliquer (exogène)
3. Un sous-modèle structurel reliant les variables latentes (X1, X2) à la variable à expliquer (Y)

Les variables latentes ou facteurs sont des construits qui sont non directement observables. Ils doivent donc être définis sur base d'autres variables sous-jacentes qui sont considérées comme représentatives de la variable latente. Ces dernières sont appelées variables observées ou indicateurs. Le sous-modèle de mesure définit donc la relation entre la variable explicative et ses indicateurs. Le modèle structurel lui spécifie la relation entre les variables explicatives et les variables à expliquer.

Dans notre cas, les variables explicatives sont composées de deux variables latentes: le statut socio-économique (X1) et l'occupation du sol (X2). La première est définie par les indicateurs (1) "nombre de voitures par logement", (2) "part de couples avec un ou plusieurs enfants", (3) "âge moyen", (4) "niveau d'éducation" et (5) "revenu moyen". La deuxième est définie par les indicateurs (1) "emplois à 10 km", (2) "densité de population", (3) "mixité urbanisée", (4) "accessibilité en bus" et (5) "accessibilité en train". La variable à expliquer, les émissions de GES (IPE\_C02), est l'indice de performance énergétique de Boussauw et Witlox (2009) évaluant les émissions de GES moyennes pour les déplacements domicile-travail en tenant compte de la moyenne des kilomètres parcourus par les travailleurs, du mode de transport utilisé et des facteurs d'émission spécifique de chacun de ces modes (cf. rapport de la subvention 2009-2010).



La force explicative du modèle d'équation structurelle s'évalue sur base des indices suivants (pour plus de détails, voir Van Acker et Witlox 2010):

**RMSEA:** *Root mean square error of approximation.* Mesure le degré d'erreur d'approximation par degré de liberté du modèle, tout en contrôlant la taille de l'échantillon. Des petites valeurs indiquent une meilleure adéquation du modèle.

**CFI:** *Comparative fit index.* Évalue l'amélioration du modèle hypothétique comparé au modèle indépendant comportant des variables non liées.

**TLI:** *Tucker-Lewis index.* Évalue l'amélioration du modèle hypothétique comparé au modèle indépendant comportant des variables non liées

L'intensité et la nature de la relation entre les variables sont évaluées par les coefficients de régressions standardisés (*standardized regressions weights ou standardized estimates*) qui permettent de comparer la contribution de chaque variable indépendamment de leur étendue et de leur unité de mesure. Plus la valeur est élevée, plus la relation entre deux variables est forte. Le signe renseigne sur l'influence positive ou négative d'une variable sur une autre.

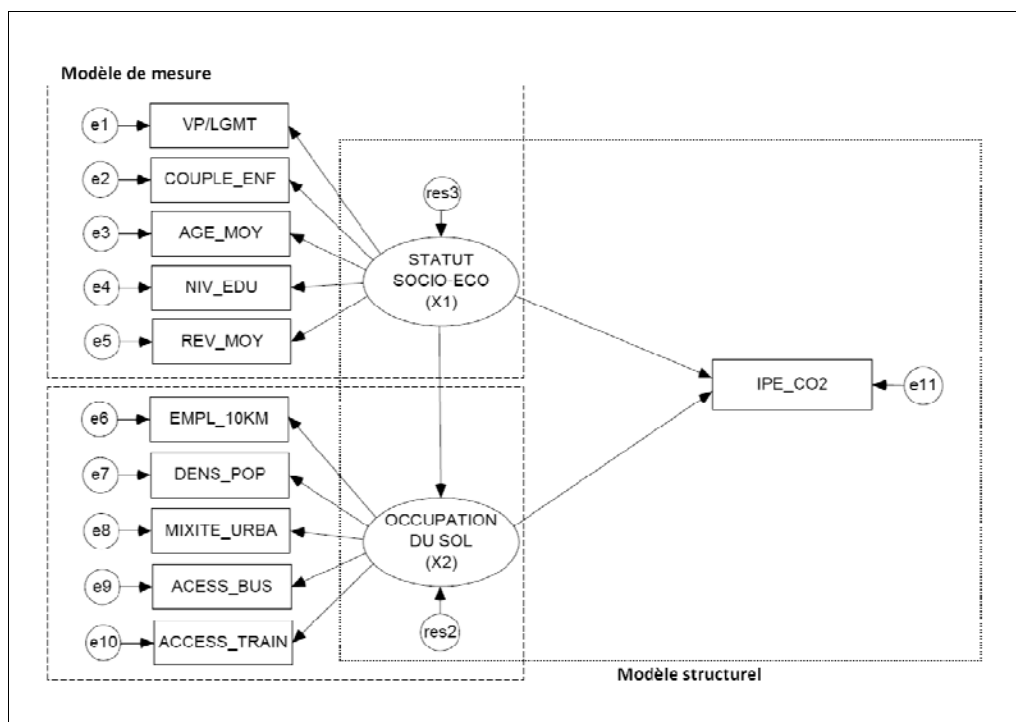


Figure 1. Exemple de modèle d'équation structurelle avec des variables latentes

#### 4.2.1 Préparation des données

La préparation des données est la même que celle effectuée pour les analyses de régression linéaire multiple (cf.4.1.1), de manière à manipuler exactement les mêmes données dans les deux analyses. Le logiciel utilisé ensuite pour effectuer les MES est une extension de SPSS: AMOS (version d'essai).

## 4.2.2 Choix et modalités d'utilisation des variables

Le choix des variables permettant d'expliquer les émissions de GES est effectué sur base des analyses de régression linéaire multiple effectuées au point 4.1.. Un premier modèle est construit en reprenant les variables territoriales et socio-économiques retenues par les modèles de régression (cf. Figure 2), c'est à dire les 3 variables explicatives les plus significatives au sein de chacune des deux catégories de variables (variables territoriales et socio-économiques). Ensuite, ce premier modèle est réévalué selon trois classes de densité d'activité humaine nette (DAH) afin d'analyser le changement des relations entre les variables en fonction de l'intensité de l'occupation du sol. "Contrôler" la densité permet ainsi de différencier les dynamiques existantes dans les grandes villes, de celles des petites villes et du milieu rural, et donc d'affiner notre interprétation.

Alors que les MES permettent de traiter l'influence de la relation entre deux variables dans plusieurs directions (de X1 vers X2, mais aussi de X2 vers X1 par exemple), nous avons choisi de contraindre la relation entre les variables latentes (X1 et X2) de manière unidirectionnelle. C'est-à-dire que nous ne nous intéressons qu'à l'influence du statut socio-économique sur l'occupation du sol. En effet, la littérature met en évidence que l'influence du statut socio-économique sur l'occupation du sol supplante l'influence de l'occupation du sol sur le statut socio-économique. De plus, l'objectif de cette analyse est d'évaluer à quel degré le statut socio-économique "interfère" dans l'évaluation de l'influence de la structure du territoire sur les émissions de GES. C'est pourquoi nous posons cette hypothèse qui sera infirmée ou confirmée par nos modèles.

## 4.2.3 Résultats et interprétation

### Modèle 1:

Le premier modèle d'équation structurelle confirme l'existence de relations entre le statut socio-économique, l'occupation du sol et les émissions de GES. La force explicative du modèle est raisonnablement bonne (RMSEA = 0,246 ; CFI= 0,798 ; TLI= 0,647), même si celle-ci pourrait très certainement être améliorée. Les flèches de la Figure 2 indiquent que les émissions de GES (IPE\_CO2) sont principalement influencées par l'occupation du sol (coefficient de régressions standardisé = -0,65): plus l'occupation du sol est intense, plus les émissions de GES pour les déplacements domicile-travail diminuent. Le statut socio-économique influence également les émissions de GES (0,06), mais positivement cette fois: plus le statut socio-économique est élevé, plus les émissions sont importantes. Cependant, le statut socio-économique influence les émissions de GES de manière très faible, voire quasi nulle, comparé à l'occupation du sol.

Des effets indirects existent également entre les construits permettant d'expliquer les émissions: le statut socio-économique influence fortement l'occupation du sol (-0,32). Le signe négatif du coefficient indique que plus le statut-socio économique est élevé, plus l'occupation du sol est faible. Ceci s'explique, entre autres, par l'analyse détaillée des indicateurs qui constituent la variable latente "statut socio-économique". En effet, les indicateurs servant à construire cette dernière (le nombre de voitures par logement, la part de couples avec un ou plusieurs enfants, le niveau d'éducation) caractérisent d'avantage les travailleurs des zones périurbaines, voire rurales, là où la densité de population et la mixité, par exemple, sont moins élevées que dans les zones urbaines. Après plusieurs tests successifs, on remarque que cette différence est essentiellement attribuable à la variable "revenus". Etant donné que, à l'échelle de la Wallonie, les travailleurs ayant des revenus élevés ont tendance à se concentrer dans les zones à forte intensité d'occupation du sol, cela explique pourquoi la relation entre le statut socio-économique et l'occupation du sol devient positive lorsque le revenu est pris en compte dans les modèles.

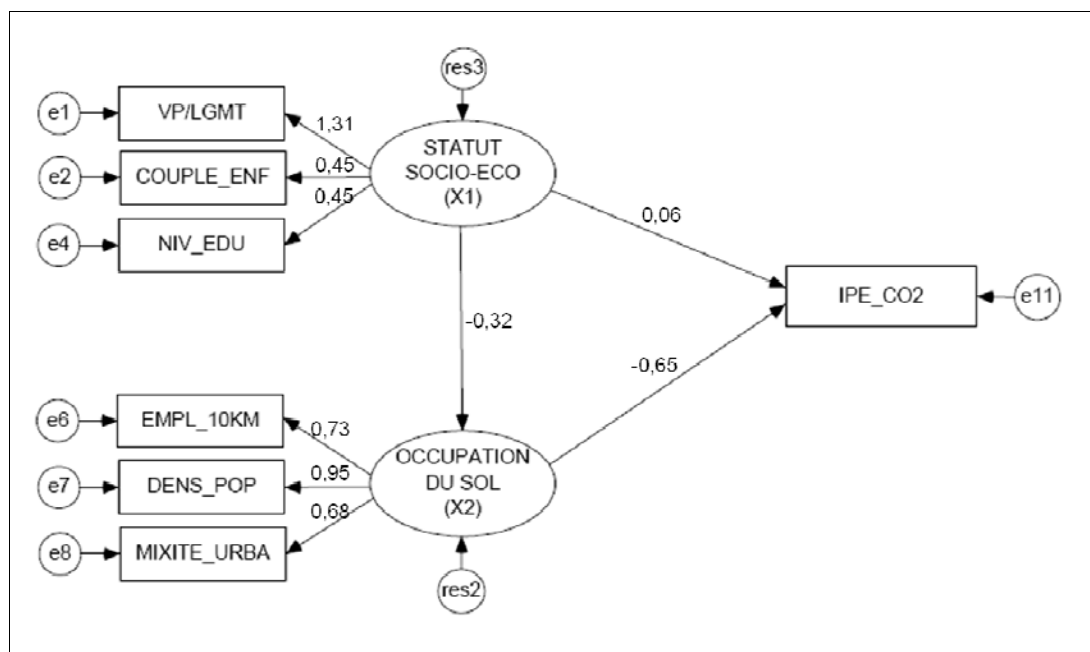


Figure 2. Estimateurs standards du modèle 1

Étant donné que le statut socio-économique influence l'occupation du sol, il influence également de manière indirecte les émissions de GES (cf. Tableau 10). L'influence indirecte du statut socio-économique est significative ( $-0,32 * -0,65 = 0,209$ ). Les deux relations qui entrent en jeu ont des signes négatifs, ce qui implique que le statut socio-économique a une influence positive sur les émissions de GES : plus le statut socio-économique augmente, plus les émissions sont élevées. Ces effets indirects du statut socio-économique sur les émissions de GES ( $0,209$ ) sont largement supérieurs aux effets directs ( $0,058$ ), ce qui mène à une interprétation différente des effets totaux. L'influence du statut socio-économique est près de deux fois et demi moins importante que celle de l'occupation du sol ( $0,651 / 0,268 = 2,44$ ).

Nous retiendrons de ce modèle que les émissions de GES sont en grande partie influencées par l'occupation du sol ( $-0,651$ ) : plus l'occupation du sol est intense (beaucoup d'emplois dans un rayon de 10 km, forte densité de population, bonne mixité des fonctions), plus les émissions pour les déplacements domicile-travail sont faibles. Le statut socio-économique a également une influence sur les émissions de GES ( $0,268$ ) : plus le statut socio-économique est élevé (un nombre important de voitures par logement, une part importante de couples avec un ou plusieurs enfants, un niveau d'éducation élevé), plus les émissions de GES pour les déplacements domicile-travail sont importantes. Notons cependant que cette influence est 2,5 fois moindre par rapport à l'occupation du sol. Le statut socio-économique a d'avantage un impact indirect sur les émissions de GES : plus le statut socio-économique est élevé, moins l'occupation du sol est intense et plus les émissions de GES pour les déplacements domicile-travail sont élevées.

	Émissions de GES		
	Effets direct	Effets indirect	Effets totaux
Statut socio-éco.	0,058	0,209	0,268
Occupation du sol	-0,651	-	-0,651

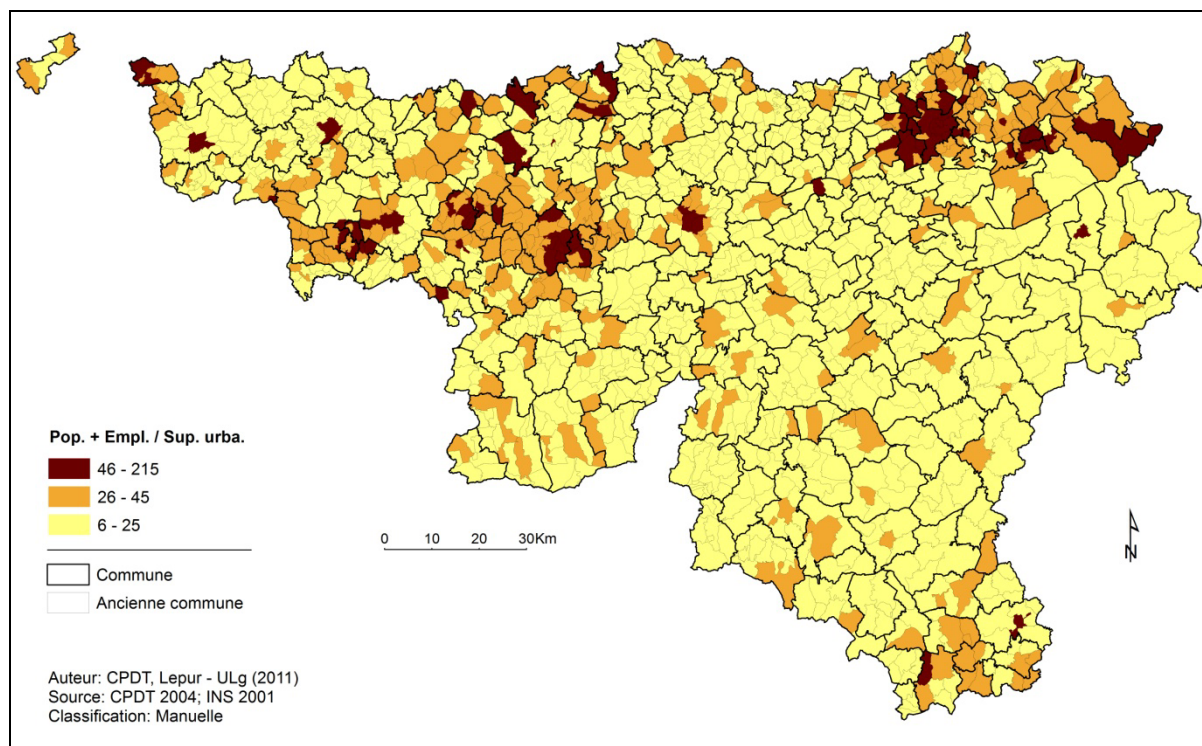
Tableau 10. Effets totaux standardisés (Modèle 1)

Les deux modèles présentés ci-dessus mettent en évidence des relations entre variables territoriales, variables économiques et leur impact sur les émissions de GES à l'échelle de la Wallonie. Ils ne permettent cependant pas de spécifier les relations à l'échelle sous régionale, en tenant compte par exemple du caractère urbain ou rural des anciennes communes étudiées. Le modèle qui suit permet d'affiner nos investigations sous l'angle de la densité.

#### **Comparaison par classe de densité:**

Dans cette section, les relations entre le statut socio-économique, l'occupation du sol et les émissions de GES sont comparées selon trois classes de densité d'activité humaine nette (DAHN). La DAHN a pour avantages de mesure l'intensité d'occupation du sol car elle prend en compte à la fois la population et l'emploi, ramenés à la superficie urbanisée de l'ancienne commune. Elle constitue donc un indicateur synthétique des variables territoriales prises en compte dans le modèle 2 présenté ci-dessus (emploi à 10 km, densité de population et mixité fonctionnelle ramenée à la superficie urbanisée), ce qui ajoute de la cohérence à notre démarche.

Les classes sont définies sur base de notre connaissance du territoire (cf. Figure 3), de manière à délimiter 3 types de zones avec des intensités d'occupation sol se démarquant les unes des autres. La première classe met en évidence les zones à caractère très urbain. Elle reprend les anciennes communes centres des agglomérations principales de la Wallonie (Tournai, Mons, Charleroi, Namur, Liège, Verviers), ainsi que d'autres polarités qui concentrent la population et l'emploi telles que Mouscron, Braine-L'Alleud, Wavre, Huy, Eupen, Malmedy et Arlon. La deuxième classe regroupe des anciennes communes où l'intensité de l'occupation du sol est moyennement forte (26 à 45 emplois + habitants / ha urbanisé). Lorsque ces dernières sont proches des agglomérations, il s'agit généralement de zones à caractère périurbain telles que Herstal, Bonnelles, Wépion, Fontaine-L'Évêque et Manage. Lorsqu'elles sont éloignées des grands centres urbains, elles représentent des villes moyennes et des petites bourgades telles que Leuze, Chimay, Hannut, Ciney, Saint-Vith et Libramont. La troisième classe constitue les zones où l'intensité d'occupation du sol est la moins forte (moins de 26 emplois + habitants / ha urbanisé). Elle comprend une part importante des anciennes communes (1059 sur 1971 anciennes communes). Elle est constituée de zones à caractère rural situées à la fois dans la grande périphérie des agglomérations (Grez-Doiceau, Éghezée, Neupré par exemple), mais également fortement à l'écart de celles-ci (Lessines, Mettet, Vresse-sur-Semois, Amblève, etc.).



**Figure 3. Densité d'activité humaine nette en 2001 selon les anciennes communes (3 catégories)**

La comparaison des résultats des trois modèles d'équations structurelles met en évidence des effets différenciés entre le statut socio-économique, l'occupation du sol et les émissions de GES selon la catégorie de densité d'activité humaine nette prise en compte.

#### *Effets directs*

Premièrement, la comparaison des effets directs du statut socio-économique sur les émissions de GES selon les trois classes de densité montre que les effets directs du statut socio-économique sur les émissions de GES ne sont pas systématiquement positifs. En effet, en milieu urbain, périurbain et dans les villes moyennes (DAHN supérieure à 45 hab. + empl. / Ha urba.), le nombre de voitures par ménage, la part de couples avec un ou plusieurs enfants et le niveau d'éducation élevés sont négativement corrélés aux émissions de GES (-0,403 et -0,009): plus le statut socio-économique est élevé, plus les émissions de GES sont faibles. À l'opposé, les résultats obtenus pour les zones accusant une densité d'activité humaine nette faible (DAHN inférieure à 45 hab. + empl. / Ha urba.) corroborent ceux obtenus à l'échelle régionale (0,259): plus le statut socio-économique est élevé, plus les émissions de GES sont importantes (cf. Tableau 11).

Les éléments permettant d'expliquer ces effets directs différenciés sont liés au fait que, au sein des zones à forte densité d'activité humaine nette, les travailleurs avec un statut socio-économique élevé ont tendance à résider à proximité de leur travail et donc parcourent un nombre de kilomètres moins important et/ou utilisent d'avantages les transports en communs. Par contre, au sein des zones de faible densité d'activité humaine nette, les travailleurs avec un statut socio-économique élevé ne travaillent pas localement et donc parcourent de grandes distances pour se rendre sur leur lieu de travail comparé aux travailleurs ayant un statut socio-économique faible. De telles relations sont à l'origine de la nature des effets indirects du statut socio-économique sur les émissions de GES (voir ci-dessous).

Deuxièmement, les effets directs de l'occupation du sol sur les émissions de GES sont univoques: plus l'occupation du sol est élevée, plus les émissions de GES sont faibles (0,083, 0,113 et 0,044), peu importe la densité d'activité humaine nette considérée (faible, moyenne ou forte). Ceci démontre que le critère d'intensité de l'occupation du sol est applicable sur l'entièreté du territoire wallon et, jusqu'à preuve du contraire, entraîne systématiquement une réduction des émissions GES, ce qui n'est pas le cas pour le statut socio-économique (dont le niveau élevé n'est pas systématiquement associé à de faibles émissions de GES).

Troisièmement, les effets directs du statut socio-économique sur l'occupation du sol sont de même nature que les effets directs du statut socio-économique sur les émissions: un statut socio-économique élevé est associé à une occupation du sol intense dans les anciennes communes qui présentent une DAHN moyenne et forte (-0,240 et -0,810), alors que dans les anciennes communes ayant une DAHN faible, un statut socio-économique élevé correspond à une occupation du sol intense (0,290).

#### *Effets indirects*

La comparaison des effets indirects du statut socio-économique sur les émissions de GES selon les trois classes de densité met en évidence que, au sein des anciennes communes de moyenne et de forte DAHN, un statut socio-économique élevé est associé à d'avantages d'émissions de GES (0,122 et 0,448). Dans ces zones, plus le statut socio-économique est élevé, plus l'intensité d'occupation du sol a tendance à être faible, et plus les émissions de GES sont élevées. À l'opposé, dans les zones de faible DAHN, un statut socio-économique élevé est généralement associé à une occupation du sol intense, ainsi qu'à des émissions de GES faibles (-0,176).

Ces résultats suggèrent donc que, dans les zones dont la DAHN est élevée, les faibles émissions de GES s'expliquent par la forte occupation du sol (c'est-à-dire un nombre important d'emplois dans un rayon de 10 km, une forte densité de population et une bonne mixité des fonctions), qui elle-même résulte d'un statut socio-économique faible (nombre limité de voitures par ménage, faible part de couples avec un ou plusieurs enfants, niveau d'éducation peu élevé). Par contre, dans les zones présentant une DAHN faible, bien que les faibles émissions de GES s'expliquent également par une occupation du sol intense, cette dernière résulte cette fois d'un statut socio-économique élevé. Ceci s'explique entre autres par le fait que, dans les zones à caractère urbain, les travailleurs ayant un statut social élevé ont tendance à s'installer dans des zones à caractère moins urbain, donc moins dense. Alors que dans les zones à caractère plus rural, ces mêmes travailleurs ont tendance à habiter dans des environnements plus urbains, et donc plus dense.

#### *Effets totaux*

La comparaison des effets totaux du statut socio-économique et de l'occupation du sol sur les émissions de GES selon les trois classes de densité permet de synthétiser les effets directs et indirects présentés ci-dessus. Pour les trois classes de densités, c'est l'occupation du sol qui influence le plus fortement les émissions de GES (-0,598, -0,505, et -0,550). Le statut socio-économique influence dans une moindre mesure les émissions (respectivement de 7,5, 4,5 à 12,5 fois moins pour la classe de densité faible, moyenne ou forte). Plus ce dernier est élevé, plus les émissions de GES pour les déplacements domicile-travail sont élevées, bien qu'il engendre des effets indirects négatifs sur les émissions dans les anciennes communes ayant une densité d'activité humaine nette faible.

		Émissions de GES			
		Effets directs	Effets indirects	Effets totaux	
Région wallonne	Statut socio-éco.	0,058	0,209	0,268	
	Occupation du sol	-0,651	-	-0,651	
DAHN (pop. + empl. / ha. urba.)	Forte (46 - 215)	Statut socio-éco.	-0,403	0,448	0,044
		Occupation du sol	-0,550	-	-0,550
	Moyenne (26 - 45)	Statut socio-éco.	-0,009	0,122	0,113
		Occupation du sol	-0,505	-	-0,505
	Faible (06 - 25)	Statut socio-éco.	0,259	-0,176	0,083
		Occupation du sol	-0,598	-	-0,598

**Tableau 11. Comparaison des effets totaux standardisés par classe de densité**

#### 4.2.4 Limitations

En présence de données spatialisées, il est nécessaire de prendre en compte l'autocorrélation spatiale. Celle-ci exprime l'absence d'indépendance entre observations géographiques: les variables de deux zones liées spatialement (par exemple, contigües) ne sont pas indépendantes (Le Gallo 2002). Étant donné le nombre important d'observations de notre set de données, une piste permettant d'améliorer nos analyses serait de prendre en compte cette autocorrélation spatiale à travers des régressions géographiquement pondérées (*geographically weighed regression*).

#### 4.2.5 Conclusions

Les modèles d'équations structurelles présentés ci-dessus ont mis en lumière la nature des relations qui existent entre les variables territoriales et les variables socio-économiques, et leurs effets sur les émissions de GES liées aux déplacements domicile-travail. Nous retiendrons de ces analyses les enseignements suivants:

L'occupation du sol joue un rôle majeur dans l'explication des émissions de GES liées aux domicile-travail: plus l'occupation du sol est intense (beaucoup d'emplois dans un rayon de 10 km, forte densité de population, bonne mixité des fonctions), plus les émissions sont faibles.

Le statut socio-économique constitue également un facteur important dans l'évaluation des émissions de GES. Globalement, plus le statut socio-économique est élevé (un nombre important de voitures par logement, une part importante de couples avec un ou plusieurs enfants, un niveau d'éducation élevé), plus les émissions de GES pour les déplacements domicile-travail sont importantes.

L'influence directe de ce dernier facteur sur les émissions de GES est généralement faible comparée à celle de l'occupation du sol. Le statut socio-économique a d'avantage un impact indirect sur les émissions de GES. A l'échelle de la Wallonie, un statut socio-économique élevé est associé à une faible intensité d'occupation du sol, ce qui a pour effet de contribuer aux émissions de GES. Des nuances doivent néanmoins être apportées à ce constat selon le type de région concernée.

Dans les zones où la densité d'activité humaine nette est forte (DAHN supérieure à 45 habitants et emplois par hectare urbanisé), le statut socio-économique contribue de manière indirecte aux émissions de GES: plus le statut socio-économique est élevé, plus l'intensité d'occupation du sol a tendance à être faible, et plus les émissions de GES sont élevées. En termes de politique d'aménagement du territoire, cette observation met en évidence qu'une intervention visant à augmenter la densité dans ces zones pourrait entraîner une migration des travailleurs vers des zones moins denses.

Dans les zones où la densité d'activité humaine nette est faible (DAHN inférieure à 45 habitants et emplois par hectare urbanisé), un statut socio-économique élevé a tendance à être associé à une forte intensité d'occupation du sol, ce qui a pour conséquence de diminuer les émissions de GES. Dans ce cas, augmenter la densité de ces zones permettrait d'attirer d'avantage de travailleurs et donc de réduire les émissions de GES.

Ces observations suggèrent donc qu'un seuil de densité existe au delà duquel l'intensité de l'occupation du sol devient moins attrayante pour les populations ayant un statut socio-économique élevé. Toutes choses étant égales par ailleurs, augmenter la densité au delà du seuil de 45 habitants et emplois par hectare urbanisé peut avoir un effet contre productif sur la diminution des émissions de GES des déplacements domicile-travail.

Finalement, ces résultats démontrent que le critère d'intensité de l'occupation du sol est applicable sur l'entièreté du territoire wallon et, jusqu'à preuve du contraire, entraîne systématiquement une réduction globale des émissions GES. Ceci n'est pas le cas pour le statut socio-économique dont le niveau élevé ne correspond pas systématiquement à de faibles émissions de GES.



### 4.3 TYPOLOGIE DE LA FORME URBAINE SUR BASE DE TROIS VARIABLES STRUCTURANTES

Suite aux analyses de régression développées au point 4.1 et 4.2, une typologie de la forme urbaine est élaborée. L'objectif est de regrouper les anciennes communes en plusieurs sous-ensembles homogènes. Ceux-ci permettront d'effectuer des analyses plus détaillées au point 5 sur l'évolution de la structure du territoire et des performances environnementales.

La typologie consiste en une synthèse des caractéristiques de la forme urbaine des anciennes communes. Le choix des variables permettant de décrire cette forme urbaine se base sur les variables territoriales retenues par les modèles de régression effectués au point 4.1 et 4.2, c'est à dire les 3 variables les plus significatives permettant d'expliquer les émissions de GES liées aux déplacements domicile-travail.

La technique retenue est la méthode de regroupement de données hiérarchique ou *hierarchical data clustering* en anglais. Cette méthode d'analyse statistique vise à diviser des données en différents sous-ensembles homogènes qui partagent des caractéristiques communes. Ces dernières correspondent généralement à des critères de proximité qui sont définis en introduisant des mesures et des classes de distance entre objets.

Le regroupement hiérarchique signifie que chaque cas traité (ancienne commune) est considéré comme un groupement (*cluster*) en tant que tel. Les groupements sont ensuite agrégés sur base des critères de proximité choisis. On débute donc avec autant de groupements que de cas et on aboutit à un seul groupement qui reprend tous les cas traités. En inspectant la progression de l'agrégation des groupes (généralement à l'aide d'un dendrogramme), on peut isoler des groupements ayant un haut degré de similitude.

Le critère de proximité choisi est la méthode de Ward (*Ward's method*). Son objectif est de joindre les cas ensemble tel que la variance au sein de chaque groupement est minimisée. Deux groupements sont fusionnés uniquement lorsque le résultat aboutit à une augmentation de la somme des erreurs au carré minimum. L'homogénéité des groupements est donc réévaluée à chaque étape.

Les trois variables mobilisées sont la densité brute de population, l'emploi à 10 kilomètres et la mixité des fonctions. Au vu des résultats de l'analyse, 9 clusters sont retenus (cf. Figure 4). Ce seuil apparaît comme un bon compromis entre des résultats statistiques fiables et un regroupement suffisamment détaillé permettant de décrire de manière nuancées les caractéristiques de la forme urbaine sur le territoire wallon.

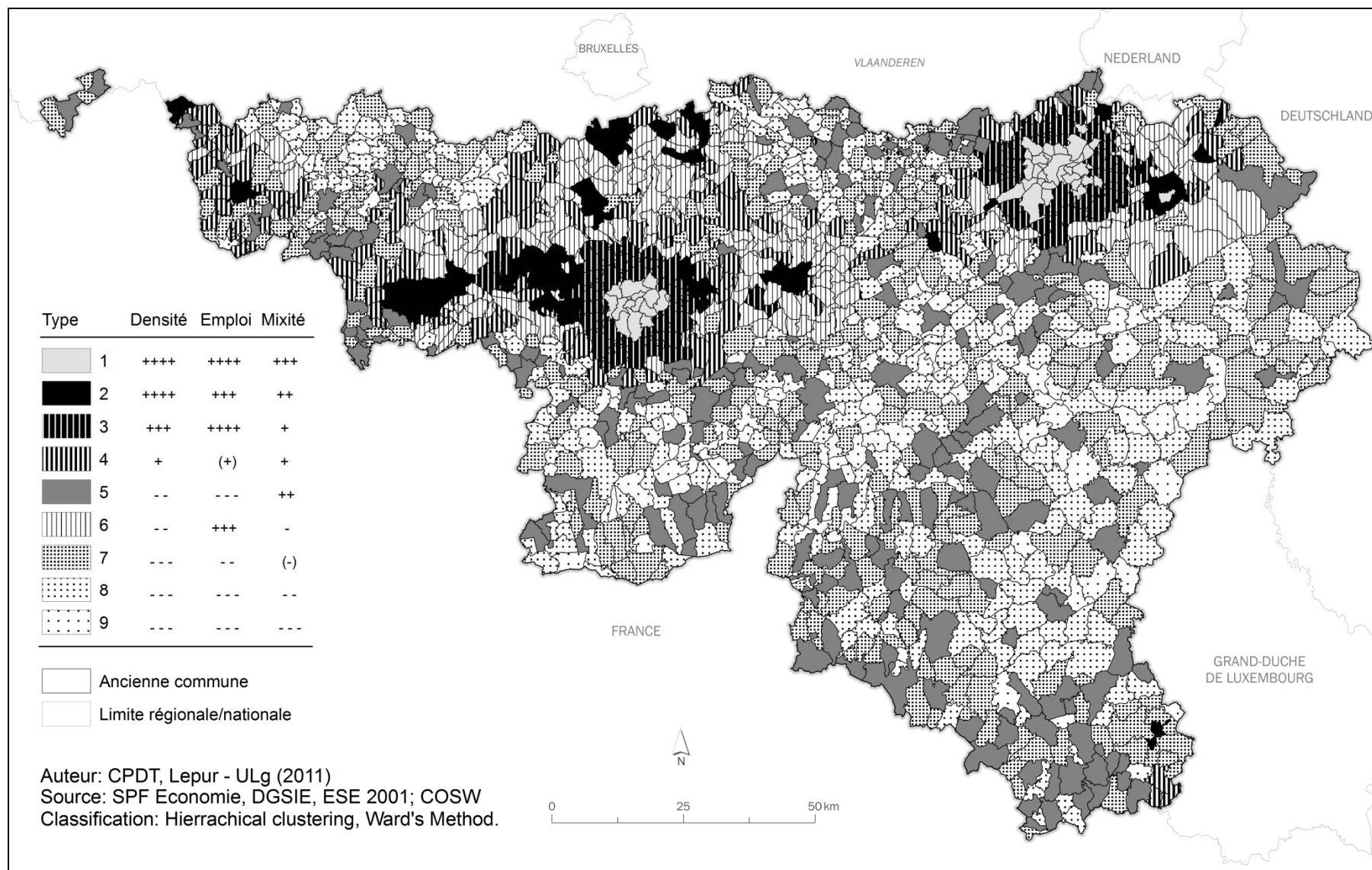


Figure 4. Typologie de la forme urbaine en Wallonie sur base de trois variables structurantes (par ancienne commune)

La première classe comprend les anciennes communes dont la densité, la mixité et l'emploi à 10 km sont nettement supérieurs à la moyenne régionale (cf. Tableau 12). Il s'agit en réalité de Liège, de Charleroi et de Verviers. Nous les appellerons ville régionale. La deuxième classe comporte les anciennes communes dont la densité et la mixité sont sensiblement inférieures à celles des villes régionales. Il s'agit par exemple de Tournai, Mons, Namur, Wavres, Ottignies et Arlon. La plupart d'entre elles sont en réalité les grandes villes identifiées par Van Hecke (1998). La catégorie 1 et 2 peuvent être associées aux "pôles primaires" du territoire.

La troisième catégorie se différencie des deux premières par son degré de mixité nettement plus faible. Il s'agit d'une catégorie regroupant les périphéries proches des villes régionales de Liège et de Charleroi. Ces zones sont caractérisées par une densité de population supérieure à la moyenne régionale ainsi que par une bonne proximité aux pôles d'emploi majeurs. Elles ont cependant tendance à être monofonctionnelles car elles accueillent essentiellement de l'habitat résidentiel.

La quatrième catégorie comprend les anciennes communes dont les caractéristiques de la forme urbaine analysées sont similaires à la moyenne régionale. Il s'agit par exemple de Spa, Huy, Gembloux et Braine-le-Comte. On appellera pôles secondaires les anciennes communes reprises dans cette catégorie. La cinquième catégorie reprend les entités dont la densité de population et l'emploi à 10 km sont inférieurs à la moyenne régionale, mais dont la mixité reste tout de même significativement élevée. Généralement situées au sud du sillon Sambre et Meuse, nous dénommerons ces anciennes communes "pôles secondaires ruraux".

La sixième catégorie comprend les zones périurbaines des pôles secondaires et des grandes villes (catégories 2 et 4). Caractérisées par une bonne proximité à l'emploi, leur mixité peu élevée et leur faible densité de population constitue un regroupement d'anciennes communes bien différencié. Finalement, les classes 7, 8 et 9 reprennent des anciennes communes pour lesquelles les trois variables structurantes diminuent graduellement. La catégorie 9 reprend donc les anciennes communes figurant parmi les moins denses, les plus éloignées de l'emploi et les plus monofonctionnelles du territoire.

Type	Nombre d'anciennes communes	Moyenne			Ecart type		
		Densité (hab/ha)	Emploi (nombre)	Mixité (indice)	Densité (hab/ha)	Emploi (nombre)	Mixité (indice)
1. Ville régionale (pôle I)	47	24,1	137.161	24,5	12,0	34.395	3,7
2. Grande ville (pôle I)	74	13,4	51.040	21,6	5,6	11.645	3,4
3. Périphérie des pôles I	97	4,9	113.277	16,4	3,1	24.171	2,8
4. Pôles II	147	3,5	32.852	16,6	2,4	14.517	1,9
5. Pôles II ruraux	204	1,8	9.483	18,9	1,9	7.039	2,5
6. Périurbain	179	2,1	51.176	12,2	1,5	10.879	2,2
7. Zone rurale I	353	1,0	12.919	13,5	0,7	9.140	1,2
8. Zone rurale II	240	0,7	8.838	10,8	0,5	5.323	0,8
9. Zone rurale III	130	0,4	8.318	7,8	0,3	6.632	1,3
Région wallonne	1471	3,0	30522	14,4	5,6	36026	4,5

**Tableau 12. Statistiques relatives à la typologie de la forme urbaine sur base des anciennes communes**

## 5. ELABORATION DE SCENARII PROSPECTIFS DE STRUCTURATION DU TERRITOIRE A L'HORIZON 2040

### 5.1 SYNTHÈSE DES METHODOLOGIES ANALYSEES

Pour cette tâche de construction de scénarii, l'équipe de recherche s'est dans un premier temps basée sur l'analyse de quelques documents portant sur l'analyse quantitative prospective en matière d'aménagement du territoire, afin d'aboutir à une première proposition de modèle :

- le rapport 2010 du thème 2A de la CPDT (effets du « pic pétrolier » sur le territoire) ;
- le rapport 2010 de l'Expertise veille – Etat du territoire wallon de la CPDT (méthodologie pour un Plan de Secteur durable) ;
- l'étude Maizia de 2008, « Les gisements du développement urbain : Analyse quantitative à l'horizon 2050 des consommations énergétiques et des émissions de CO<sub>2</sub> des tissus urbains ».

Une synthèse schématique a été réalisée pour chacune des méthodologies exposées dans les documents cités ci-dessus, afin d'illustrer les variables sur lesquelles ces méthodologies jouent en entrée (pour déterminer les différents scénarii) ainsi que les variables de sortie du modèle (Figure 5 à Figure 8). L'utilisation d'une telle représentation schématique permet une comparaison plus aisée des méthodologies utilisées. En outre, les points forts et points faibles de chaque méthodologie ont été relevés.

#### 5.1.1 Etude CPDT 2010 « effets du pic pétrolier sur le territoire »

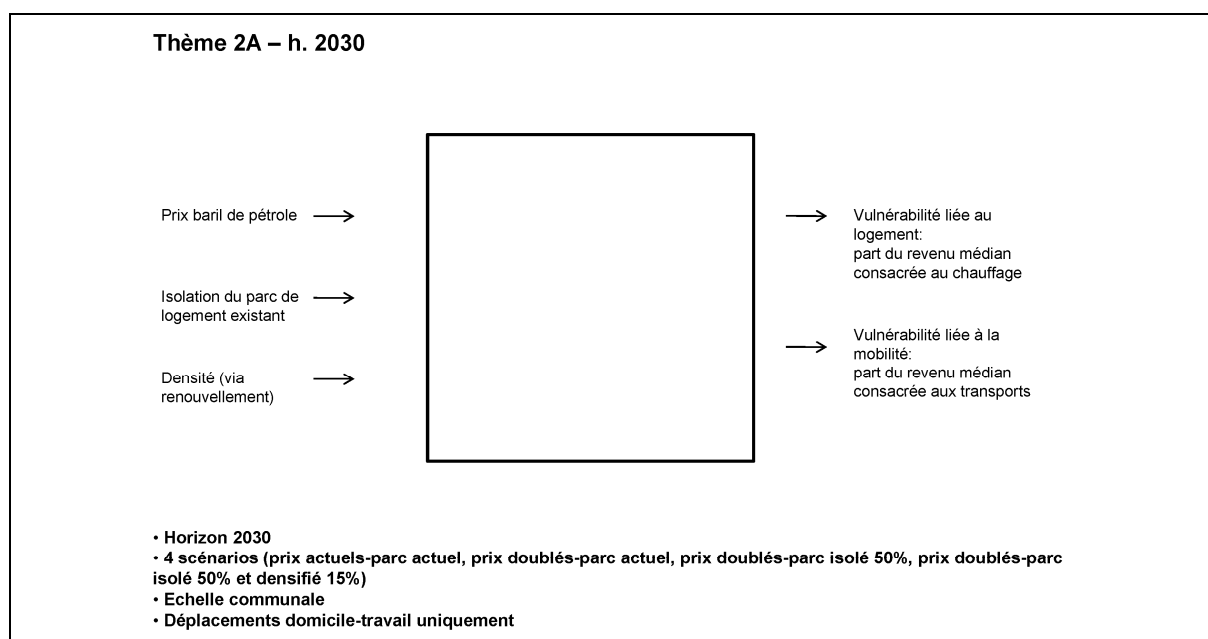


Figure 5. Représentation schématique de la méthodologie utilisée par le thème 2A à l'horizon 2030

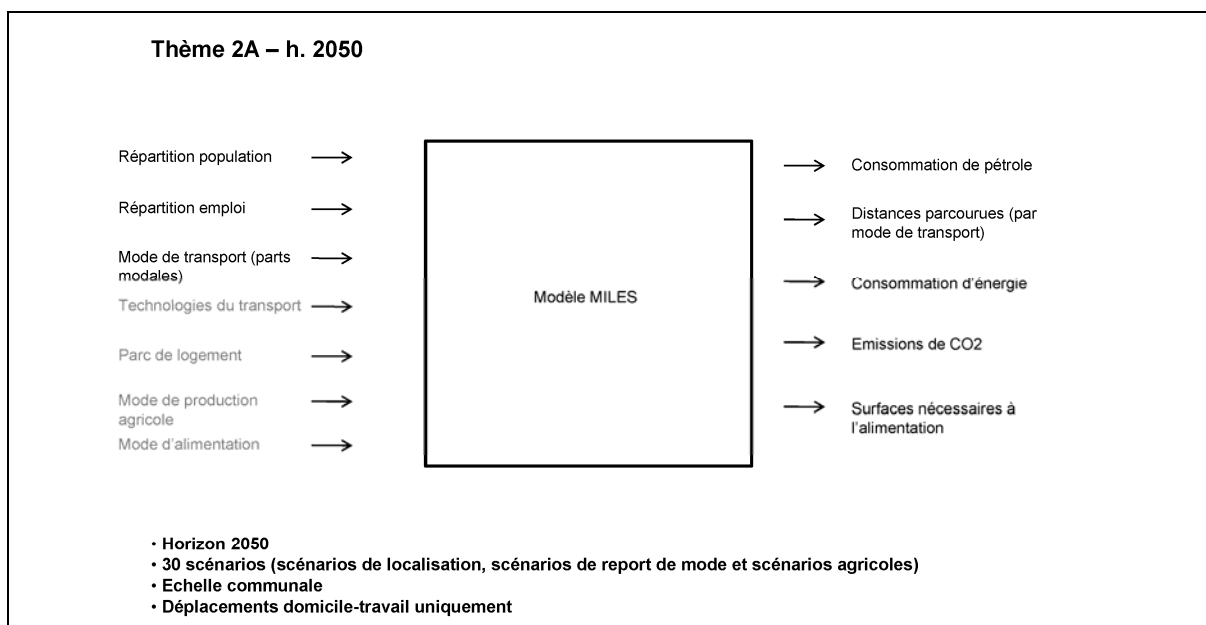
Pour l'horizon 2030, le thème 2A a construit ses scénarii en faisant varier trois paramètres :

- le prix du baril de pétrole (prix actuels ou prix doublés),
- l'isolation du parc de logement existant (situation 2001 ou isolation de 50% du parc de 2001),
- la densité (situation 2001 ou remplacement de 15% des logements à 3 ou 4 façades par des appartements ou des logements 2 façades).

Le point fort de cette méthodologie est qu'elle est basée sur une caractérisation détaillée de la consommation de chauffage pour chaque habitation, prenant en compte le type (4 possibilités), l'isolation (8), le vecteur énergétique (4), la région climatique (6), l'environnement (2), la taille (2), soit au total plus de 3000 types, permettant d'obtenir une estimation précise des consommations communales pour le chauffage.

Par contre, elle présente les points faibles suivants :

- peu de scénarii sont analysés,
- le modèle ne fait pas intervenir le transport en variable d'entrée (parts modales, distances parcourues, etc.),
- il n'y a pas de lien direct avec les émissions de GES, puisque c'est uniquement la vulnérabilité qui est calculée,
- le taux de renouvellement utilisé est de 1-2% par an (selon nos calculs, ce taux de renouvellement serait de 0,12% par an),
- il existe un biais pour les communes frontalières (non prise en compte des actifs occupés à l'étranger).



**Figure 6. Représentation schématique de la méthodologie utilisée par le thème 2A à l'horizon 2050**

Pour l'horizon 2050, le thème 2A a construit ses scénarii en faisant varier trois paramètres principaux et 4 paramètres complémentaires :

- la répartition de la population (situation 2001, 20/100% permutations lieu de résidence – lieu de travail, réallocation dans ou hors des pôles du SDER),
- la répartition de l'emploi (situation 2001, 10/25% de rapprochement des lieux de résidence),

- le mode de transport (situation 2001, diminution de 40% de la part de la voiture),
- les technologies du transport (situation 2001, 75% déplacements voiture restants - après diminution de 40% de la part modale voiture - en voiture électrique),
- le parc de logement (situation actuelle, 100% du parc isolé aux normes actuelles),
- le mode de production agricole (actuel/conventionnel, 100% biologique),
- le mode d'alimentation (situation actuelle, 25% d'alimentation biologique et diminution de 25% de la consommation de viande, végétarisme).

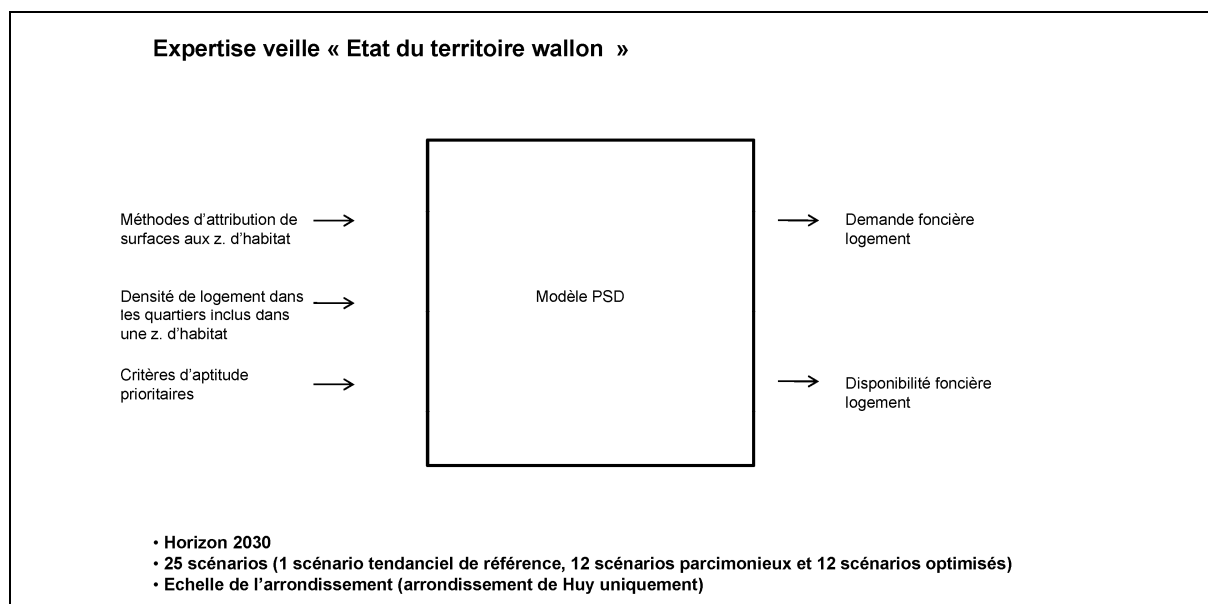
Les points forts de cette méthodologie sont les suivants :

- le modèle fait intervenir à la fois les aspects bâti et transport, en faisant varier ces deux aspects en entrée,
- nombre relativement élevé de scénarii,
- le modèle assure une cohérence interne pour tout scénario (pour toute hypothèse, il examine les implications sur les autres dimensions, en termes de déplacements),
- nombreuses informations en sortie à l'échelle communale (chiffres détaillés sur la mobilité, le logement et l'impact des scénarii),
- le modèle fait intervenir les modes de production agricole et les modes d'alimentation.

Cependant, la méthodologie comporte aussi quelques points faibles :

- les parts modales sont décidées arbitrairement en variable d'entrée, et non pas déterminées spatialement en fonction de l'offre en infrastructures de transport,
- les modes de production agricole et d'alimentation ne sont pas caractérisés en termes d'impacts sur les émissions de GES, mais uniquement en termes de consommation d'espace,
- non prise en compte des déplacements intra-communaux et transfrontaliers,
- non prise en compte des pôles d'appui transfrontaliers définis par le SDER,
- réallocation de l'emploi et/ou de la population de manière forfaitaire dans les autres communes (même nombre dans chaque commune d'accueil).

### 5.1.2 Etude CPDT 2010 « méthodologie pour un Plan de Secteur durable »



**Figure 7. Représentation schématique de la méthodologie utilisée par l'expertise « Etat du territoire wallon » pour la méthodologie « Plan de secteur durable »**

L'équipe de l'expertise veille « Etat du territoire wallon » a établi ses différents scénarii pour un Plan de secteur durable en faisant varier trois paramètres :

- la méthode d'attribution de surfaces aux zones d'habitat (zones d'habitat du PdS actuel et ZACC uniquement, ZH et ZACC + zones les plus aptes hors ZH et ZACC, ZH et ZACC + zones les plus aptes hors ZH et ZACC – zones les moins aptes en ZH et ZACC, ZH et ZACC– zones les moins aptes en ZH et ZACC),
- la densité de logement dans les quartiers inclus dans une zone d'habitat (densité observée, densité du COSW, densité haute),
- des critères d'aptitude prioritaires (dix critères d'aptitude, pondérés selon 4 options : selon la moyenne arithmétique, en privilégiant la cohérence avec le SDER, en privilégiant la limitation des émissions de carbone dues au trafic, selon l'avis d'experts).

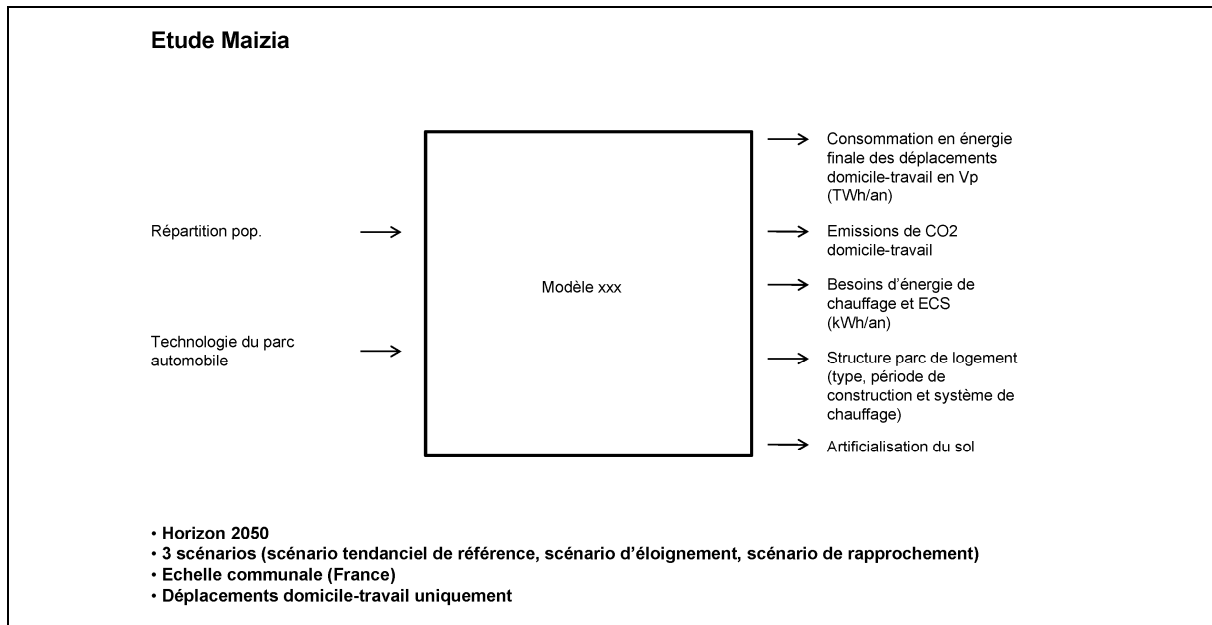
Les points forts de cette méthodologie sont les suivants :

- nombre relativement élevé de scénarii,
- prise en compte de nombreux critères pour la détermination des zones les plus appropriées à l'habitat, dont l'accessibilité aux principales fonctions, l'accessibilité aux transports en commun et la densité de population,
- analyse spatiale fine, permettant d'éviter la définition de nouvelles zones d'habitat linéaires.

Nous avons cependant relevé quelques points faibles:

- pas d'action sur le stock bâti, la méthodologie considère uniquement les nouvelles constructions,
- pas de lien direct avec les émissions de GES,
- le modèle a été développé sur l'arrondissement de Huy, or cette méthodologie semble difficilement applicable à l'ensemble du territoire wallon (disponibilité des données nécessaires à la spatialisation des critères d'aptitude et facteur temps),
- le modèle est basé sur des critères d'aptitude statiques, or ceux-ci sont susceptibles d'évoluer avec le temps.

### 5.1.3 Etude PUCA-PREBAT



**Figure 8. Représentation schématique de la méthodologie utilisée dans l'étude PUCA-PREBAT**

L'étude PUCA-PREBAT de Maizia *et al.* (2008) construit des scénarii en faisant varier deux paramètres en entrée :

- la répartition de la population (selon la tendance actuelle - renforcement des communes les plus attractives et délaissement des autres -, migration des ménages vers des communes dont les migrations alternantes se réalisent à des distances moyennes de l'emploi supérieure à 10 km, migration des ménages vers des communes dont les migrations alternantes se réalisent à des distances moyennes de l'emploi inférieure à 10 km),
- la technologie du parc automobile (parc actuel : émissions moyennes de 175g CO<sub>2</sub>/km, 120g CO<sub>2</sub>/km, 105g CO<sub>2</sub>/km, 70g CO<sub>2</sub>/km, facteur 4).

Le principal point fort de ce modèle est qu'il isole l'impact de la forme urbaine sur les consommations énergétiques et les émissions de CO<sub>2</sub> du bâti et des transports (via une non prise en compte des actions techniques possibles telles l'isolation du logement, etc.).

En revanche, il présente les points faibles suivants :

- peu de scénarii sont analysés,
- le modèle ne fait pas intervenir la répartition de l'emploi ni l'offre en infrastructures de transport en variables d'entrée,
- le modèle ne remet pas en question les flux de déplacements lors de la répartition de la population (valorisation de la matrice OD),
- la typologie des formes urbaines est basée sur l'Ile-de-France et pas sur tout le territoire français.



## 5.2 CONSTRUCTION DE SCENARI PROSPECTIFS EN MATIERE DE STRUCTURATION DU TERRITOIRE EN WALLONIE

L'objectif principal de cet exercice est d'envisager les futurs possibles en termes de structuration du territoire et leur impact sur les émissions de gaz à effet de serre. Sur base de la revue de la littérature, dont les travaux présentés au point précédent (cf. 5.1), nous cherchons à élaborer une méthodologie permettant de réaliser une analyse prospective à l'horizon 2040 et à établir des bilans énergétiques et CO<sub>2</sub> intégrant la structure du territoire, et plus particulièrement l'habitat résidentiel et les déplacements domicile-travail.

Deux approches ont été retenues : la construction de scénarii contrastés en première approche afin de borner l'étendue des variations possibles, et la construction de scénarii plus détaillés ensuite.

### 5.2.1 Approche contrastée

Cette première approche met en avant une évolution contrastée de la situation entre 2001 (date à laquelle la plupart des variables ont été mesurées) et 2040 (horizon sur lequel se calque l'actualisation du diagnostic du SDER). L'objectif est de borner l'étendue du bilan énergétique et des émissions de GES entre une configuration territoriale la plus favorable et celle-là plus défavorable.

#### 5.2.1.1 Scénario de référence

Dans ce premier scénario, à travers une projection tendancielle, on considère que les ménages gardent les mêmes choix de localisation résidentielle. Les entités les plus attractives continuent à attirer de la population alors que les entités les moins attractives poursuivent leur déclin. Ce premier scénario sert de base de comparaison pour les deux autres scénarii contrastés.

Ainsi, les valeurs suivantes ont été estimées à l'horizon 2040 :

Premièrement, les *distances moyennes domicile-travail* ont été estimées en se basant sur l'évolution observée pour ces valeurs de 1991 à 2001 et en poursuivant cette tendance de manière linéaire selon l'équation :

$$\text{DistMoy2040} = \text{DistMoy2001} + [(\text{DistMoy2001} - \text{DistMoy1991}) / (2001 - 1991)] * (2040 - 2001)$$

La distance moyenne domicile-travail à l'horizon 2040 a été estimée aussi bien tous modes de déplacement confondus que par mode principal (VcVp : voiture, M : moto, BTM : bus-tram-méto, T : train, V : vélo, AP : à pied), et cela à l'échelle des anciennes communes et des communes (les données disponibles à l'échelle des secteurs statistiques ne permettaient pas de calculer l'évolution 1991-2001).

La *population en 2040* a été estimée sur base des prévisions du Bureau Fédéral du Plan. Ces prévisions étant établies à l'échelle des arrondissements, il a été nécessaire de ventiler l'accroissement de population de chaque arrondissement selon les différentes entités (secteurs statistiques, anciennes communes et communes) qui le constituent. Les données de l'ESE 2001 ont permis de calculer la contribution de la population de chaque entité à la population totale de l'arrondissement, et c'est ce pourcentage qui a été utilisé pour ventiler l'accroissement de population entre les différentes entités constitutives de chaque arrondissement.

Une valeur d'*IPE kWh* et d'*IPE CO2* a été ensuite calculée pour le scénario de référence à l'horizon 2040, sur base des distances moyennes et des prévisions de population ainsi estimées, à l'échelle des anciennes communes et des communes :

$$\text{IPE\_kWh} = \text{distancemoyenne} * ((\text{CsVcVp} * \text{CmsVcVp}) + (\text{CsM} * \text{CmsM}) + (\text{CsBTM} * \text{CmsBTM}) + (\text{CsT} * \text{CmsT}) + (\text{CsV} * \text{CmsV}) + (\text{CsAP} * \text{CmsAP}))$$

$$\text{IPE}_{\text{eqCO}_2} = (\text{distance moyenne} \cdot ((\text{EsVcVp} \cdot \text{CmsVcVp}) + (\text{EsM} \cdot \text{CmsM}) + (\text{EsBTM} \cdot \text{CmsBTM}) + (\text{EsT} \cdot \text{CmsT}) + (\text{EsV} \cdot \text{CmsV}) + (\text{EsAP} \cdot \text{CmsAP}))) / 1000$$

Où :

distance moyenne est la distance moyenne des déplacements domicile-travail par entité, tous modes confondus,

Cs est le facteur de consommation, propre à chaque mode de déplacement

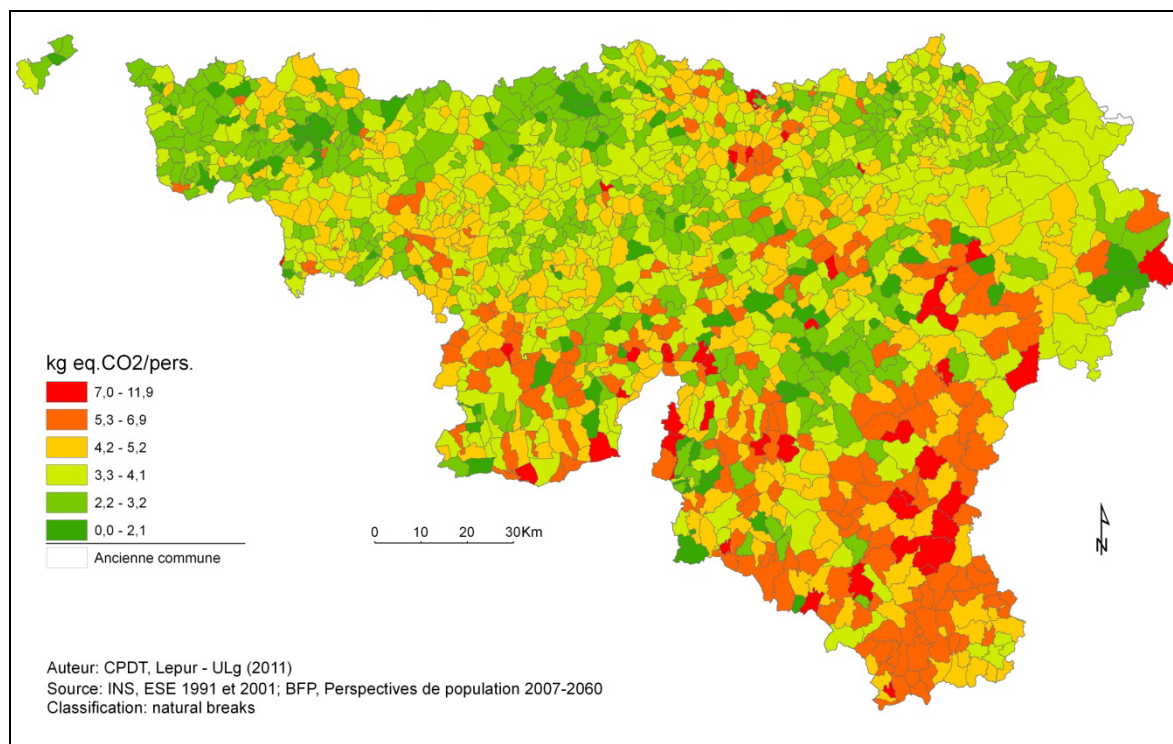
Es est le facteur d'émission, propre à chaque mode de déplacement

Cms est un facteur correctif, propre à chaque mode de déplacement, et calculé sur base de la part modale et de la distance moyenne domicile-travail relative à chaque mode, au sein de chaque entité

Ces valeurs d'IPE constituent une première approche, basée sur les hypothèses suivantes :

- Hypothèse 1 : Les facteurs de consommation et d'émission utilisés sont les mêmes que ceux utilisés pour calculer l'IPE en 2001. Ils doivent être réestimés pour 2040 de manière à tenir compte des avancées technologiques prévisibles à cette échéance ;
- Hypothèse 2 : Les parts modales utilisées sont également les parts modales de 2001. Dans un scénario tendanciel, nous considérons cette approximation acceptable. Cependant, des hypothèses devront être formulées sur l'évolution des parts modales à l'échelle des (anciennes) communes en adéquation avec les scénarii détaillés ;
- Hypothèse 3 : La formule de calcul de l'IPE faisant normalement intervenir la distance totale parcourue par entité (tous modes confondus) au numérateur et le nombre de travailleurs par entité au dénominateur (cf. rapport de la subvention 2009-2010), nous avons approché ce rapport par la valeur de la distance moyenne par entité tous modes confondus. Faisant cela, et tenant compte des deux hypothèses exposées ci-dessus, cela revient à considérer que la valeur de l'IPE ne fait à aucun moment intervenir la population estimée en 2040. Afin d'affiner notre formule, il sera nécessaire d'estimer 1) la distance totale parcourue par entité suivant une évolution linéaire basée sur l'évolution 91-2001 et tenant compte de l'évolution de sa population, et 2) le nombre de travailleurs par entité comme étant le produit de la population estimée en 2040 par la part représentée par la population active occupée qui se déplace vers un lieu de travail fixe en 2040 (chiffres non encore à notre disposition).
- Hypothèse 4 : La formule utilisée pour l'estimation de la distance moyenne domicile-travail en 2040 pouvant aboutir à des distances négatives (uniquement à l'échelle des anciennes communes : 5 AC sur 1471), nous avons posé l'hypothèse que pour ces anciennes communes, les distances estimées négatives sont ramenées au niveau de la plus petite distance positive.

Sur base de ces hypothèses, les valeurs d'IPE ont été estimées à l'échelle des anciennes communes et des communes à l'horizon 2040. La Figure 9 présente les valeurs obtenues pour l'IPE CO<sub>2</sub> à l'échelle des anciennes communes.



**Figure 9. IPE CO<sub>2</sub> estimé à l'horizon 2040 à l'échelle des anciennes communes**

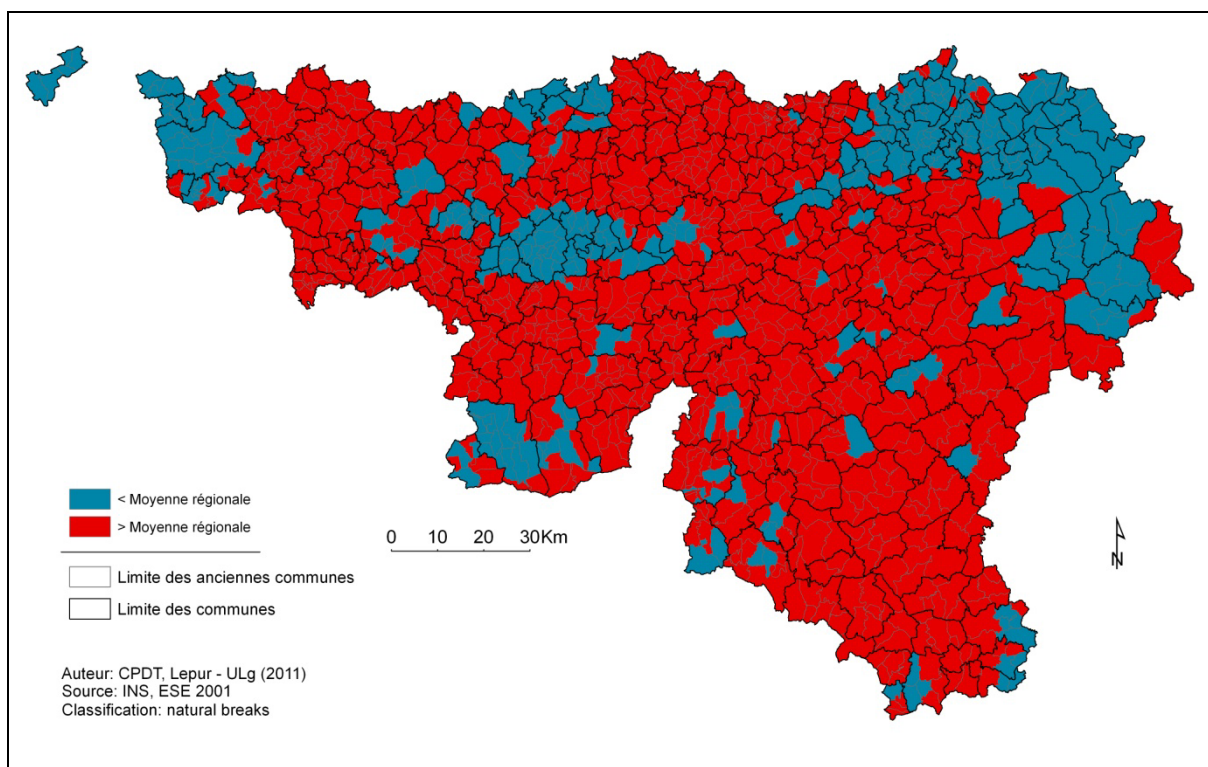
Cette carte démontre de fortes disparités et discontinuités spatiales, ainsi que des valeurs sensiblement plus élevées en Province du Luxembourg.

### **5.2.1.2 Scénario "concentration"**

Le deuxième scénario envisage la concentration de l'accroissement de population dans les entités caractérisées par des déplacements domicile-travail inférieurs à la moyenne régionale (cfr. Maizia *et al.*, 2008). La concentration de la population dans les entités présentant de bonnes performances en termes de distances parcourues pour les déplacements domicile-travail (distance moyenne inférieure à la moyenne régionale) constitue une première approche de concentration dans les entités géographiques présentant de bonnes performances en termes d'émissions de GES. Ainsi qu'illustré par la Figure 10, ces zones présentent généralement un caractère urbain. Les distances parcourues étant un facteur prépondérant dans l'explication des émissions de GES, ce scénario laisse présager des gains énergétiques importants.

### **5.2.1.3 Scénario "dispersion"**

À l'opposé, le troisième scénario considère une concentration de l'accroissement de population dans les entités caractérisées par des déplacements domicile-travail supérieurs à la moyenne régionale. Ces entités se situent généralement dans des zones à caractère non urbain (voir Figure 10). Un tel scénario met davantage en évidence une diminution globale des performances énergétiques.



**Figure 10. Comparaison des distances moyennes des déplacements domicile-travail à la moyenne régionale (2001, échelle des anciennes communes)**

Sur base des hypothèses adoptées jusqu'à présent, les valeurs d'IPE pour les scénarii « concentration » et « dispersion » sont identiques à celles du scénario de référence. En effet, l'utilisation de la distance moyenne estimée par entité en lieu et place du rapport distance totale/nombre de travailleurs (cf. Hypothèse 3) n'induit pas de modification de la valeur d'IPE pour une modification de la population estimée. Les différences entre ces scénarii et le scénario de référence se marqueront plutôt au niveau des valeurs de distance moyenne régionale, de parts modales régionales, de consommation totale et d'émissions de GES totales estimées à l'horizon 2040.

Ces "scénarii contrastés" constituent une première approche en matière de structuration du territoire visant à concentrer la population dans les entités géographiques présentant de bonnes (ou de mauvaises) performances en termes d'émissions de GES liées aux déplacements domicile-travail. Cependant, les scénarii contrastés présentés ci-dessus se basent sur une vision dichotomique de la réalité qui ne prend pas en compte les variations infrarégionales. Les modèles d'équations structurels présentés au point 4.2 ont démontré qu'une augmentation de l'intensité de l'occupation du sol pouvait induire dans certaines parties du territoire des comportements allant à l'encontre d'une réduction des émissions de GES. Dès lors, il est important d'envisager des scénarii de densification du territoire détaillés, c'est-à-dire différenciés selon les caractéristiques propres aux entités considérées.

## 5.2.2 Approche détaillée

L'approche détaillée se base sur la typologie des anciennes communes qui caractérise la forme urbaine en Wallonie selon 9 types (cf. 0). À partir de cette classification, différents scénarii sont élaborés en formulant des hypothèses sur l'évolution de l'occupation du sol au sein des typologies. Comparé à l'approche contrastée présentée précédemment, des hypothèses relatives à la délocalisation de l'emploi viennent s'ajouter à celles concernant la délocalisation de l'habitat. Les comportements de mobilité et l'impact CO<sub>2</sub> global sont ensuite réévalués sur base de la relation statistique établie entre émissions, densité de population, proximité de l'emploi et mixité des fonctions. Quatre modèles généraux de structure du territoire sont envisagés à ce jour.

### 5.2.2.1 Modèles de structure du territoire et description des scénarii

#### a) Ville métropole

Scénario 1: Ville Métropole			
Argument maximisé / Points forts		Efficacité économique. Intégration dans le système des villes mondial/européen. Région urbaine monocentrique	
Argument insuffisamment considéré / Points faibles		Coûts environnementaux de la désurbanisation. Coûts individuels en termes de transport	
Impacts	<i>Occupation du sol</i>		
	<i>Mobilité</i>	<i>Flux</i>	Déplacements domicile-travail de la périphérie vers le centre-ville des pôles principaux
		<i>Modes de transports</i>	Utilisation prépondérante de la voiture particulière, nombre limité de lignes de TC structurantes
	<i>Habitat</i>	<i>Existant</i>	Sous-occupation et diminution de la taille des logements (via divisions d'immeubles) en centre-ville
		<i>Nouveau</i>	Habitat globalement diffus. Faible densité de logements en milieu rural et périurbain (8 lgmts/ha). Faible offre en appartements neufs en centre-ville. Habitat essentiellement 4 façades voire semi-mitoyen en périphérie

#### b) Ville diffuse

Scénario 2: Ville diffuse	
Argument maximisé / Points forts	Maximisation des opportunités individuelles. Accès à la propriété bon marché. NIMBY. Augmentation de la résilience du système urbain
Argument insuffisamment considéré / Points faibles	Coûts collectifs d'infrastructures

Impacts	<i>Occupation du sol</i>		Séparation des fonctions. Nouveaux aménagements en périphérie au sein des greenfields. Clustering des services/entreprises. Ajout de ZH au PdS dans les zones à forte pression résidentielle. Nombre d'emplois par habitant supérieur à la moyenne régionale dans les pôles
	<i>Mobilité</i>	<i>Flux</i>	Déplacements domicile-travail du centre vers la périphérie, et de périphérie à périphérie
		<i>Modes de transports</i>	Utilisation prépondérante de la voiture particulière, faible offre en TC
	<i>Habitat</i>	<i>Existant</i>	Diminution du nombre et de la taille des logements en centre-ville
<i>Nouveau</i>		Habitat globalement diffus. Faible densité de logements en milieu rural et périurbain (8 lgmts/ha). Faible offre en appartements neufs en centre-ville. Habitat essentiellement 4 façades voire semi-mitoyen en périphérie	

c) *Ville compacte*

Scénario 3: Ville compacte			
Argument maximisé / Points forts		Limitation de la consommation d'espace. Reconstruction de la ville sur la ville. Ville des courtes distances. Autonomie (emploi exclusivement local)	
Argument insuffisamment considéré / Points faibles		Coût du foncier	
Impacts	<i>Occupation du sol</i>		Mixité des fonctions. Reconversion/réhabilitation des friches industrielles. Rénovation urbaine. Mise en œuvre des zones de rétention foncière. Suppression des ZH du PdS situées hors noyaux d'habitat. Nombre d'emplois par habitant proche de 1 dans les pôles
	<i>Mobilité</i>	<i>Flux</i>	Limitation des déplacements domicile-travail inter-urbains en faveur des déplacements intra-urbains, diminution importante des distances parcourues
		<i>Modes de transports</i>	Renforcement des modes doux
	<i>Habitat</i>	<i>Existant</i>	Très forte densité de logements. Taux de renouvellement très élevé
<i>Nouveau</i>		Densité de logements très élevée (15-20-50 lgmts/ha en milieu rural, périurbain et urbain). Conformité par rapport aux normes	

d) *Ville polycentrique*

Scénario 4: Ville polycentrique		
Argument maximisé / Points forts		Conformité avec la hiérarchie urbaine. Ville réseau. "Polycentrisme ascendant"
Argument insuffisamment considéré / Points faibles		Bénéfices liés aux économies d'agglomération. Richesse produite par l'accessibilité automobile. Autonomie.

Impacts	<i>Occupation du sol</i>		Mixité des fonctions. Reconversion/réhabilitation des friches industrielles. Rénovation urbaine. Mise en œuvre des zones de rétention foncière. Renforcement des axes structurants. Forte articulation entre urbanisation et offre structurante en TC. Complémentarité entre le centre et la périphérie. Nombre d'emplois par habitant proche de 1 dans les pôles
	<i>Mobilité</i>	<i>Flux</i>	Déplacements domicile-travail inter-urbains effectués selon les axes structurants. Stabilisation voire diminution des distances parcourues
		<i>Modes de transports</i>	Diminution de l'utilisation de la voiture particulière pour les trajets longues distances au profit de l'utilisation des TC sur des axes structurants
	<i>Habitat</i>	<i>Existant</i>	Forte densité de logements. Taux de renouvellement élevé
		<i>Nouveau</i>	Densité de logements élevée (12-15-20 lgmts/ha en milieu rural, périurbain et urbain). Conformité par rapport aux normes

### 5.2.2.2 Évolution de deux variables d'entrée clés

Pour envisager les 4 grands types de structure territoriale, nous avons choisi de faire évoluer deux variables d'entrée clés qui jouent un rôle majeur dans l'explication des émissions de GES liées aux déplacements domicile-travail. Il s'agit de la répartition de la population et de l'emploi. Nous avons envisagé leur évolution sur une période de près de 50 ans, c'est à dire entre 2001 et 2040. Le tableau ci-dessous détaille les hypothèses émises concernant l'évolution des deux variables par type de forme urbaine et selon le modèle/scénario considéré.

Variable	Ville métropole		Ville diffuse		Ville compacte		Ville polycentrique	
	Pop.	Empl.	Pop.	Empl.	Pop.	Empl.	Pop.	Empl.
1. Ville régionale (pôle I)	+	+++	---	---	+	+	+	+
2. Grande ville (pôle I)	+	++	---	---	++	++	+	+
3. Périphérie des pôles I	+	+	--	--	+	+	-	-
4. Pôles II	-	-	0	0	+++	+++	++	++
5. Pôles II ruraux	0	0	-	-	0	0	+++	+++
6. Périurbain	+++	---	+++	+++	-	-	-	-
7. Zone rurale I	+++	-	++	++	-	-	0	0
8. Zone rurale II	++	-	+	+	-	-	-	-
9. Zone rurale III	+	-	+	+	-	-	-	-

(+++)= +75%, (++)= +50%, (+)= +25%, (0)= status quo, (-)= -25%, (--)= -50%, (---)= -75%

**Tableau 13. Hypothèses sur la répartition de la population et de l'emploi entre 2001 et 2040 au sein des 9 types de forme urbaine et selon les 4 scénarii d'évolution de la structure du territoire**

Dans le cas de la ville métropole, un nombre limité de pôles régionaux attirent la majorité des travailleurs ce qui induit de longs déplacements domicile-travail et une périurbanisation accrue. Il y a décentralisation (à l'échelle régionale) et déconcentration (à l'échelle locale) de la population. Les pôles primaires et leur périphérie gagnent proportionnellement peu d'habitants comparés aux zones périurbaines et aux zones rurales. À l'opposé, l'emploi est centralisé et concentré dans les pôles primaires du territoire et leur périphérie. Les autres zones perdent des emplois.

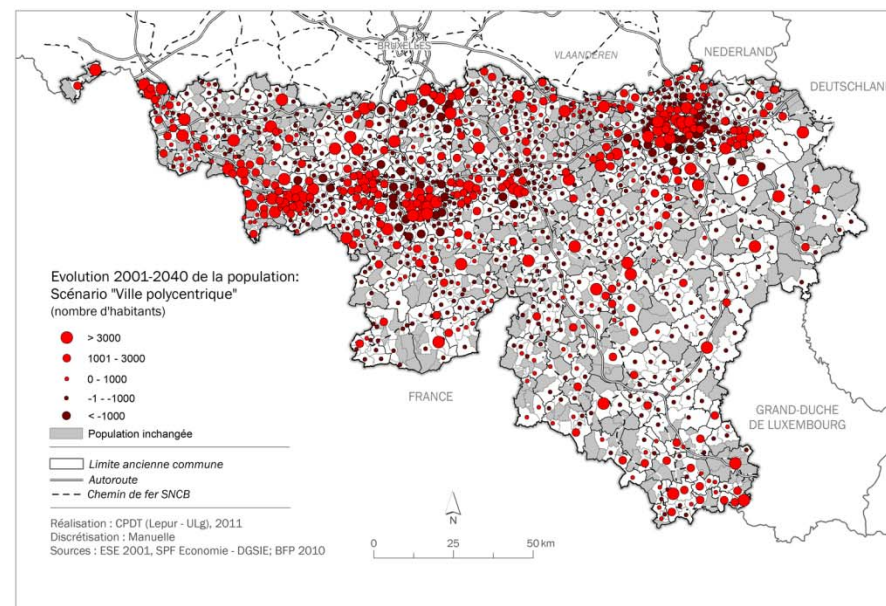
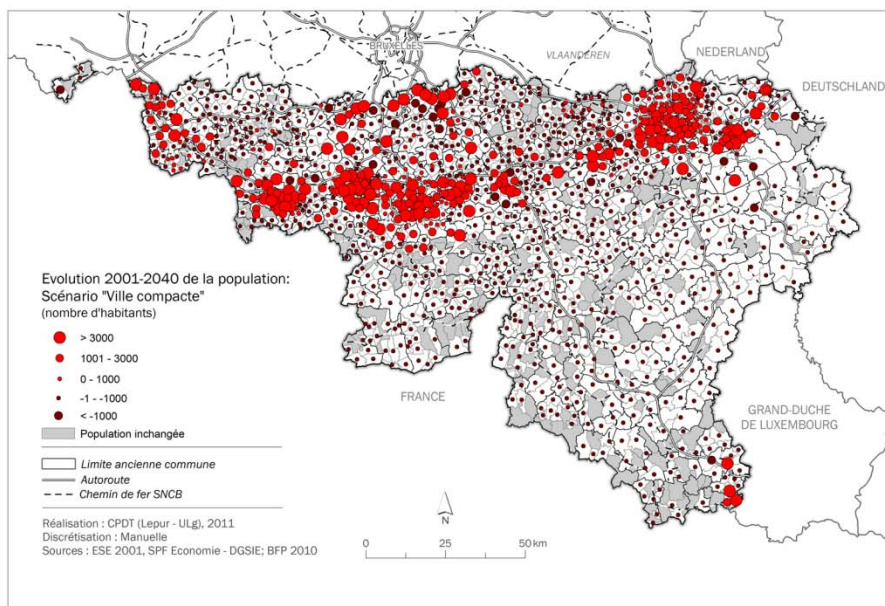
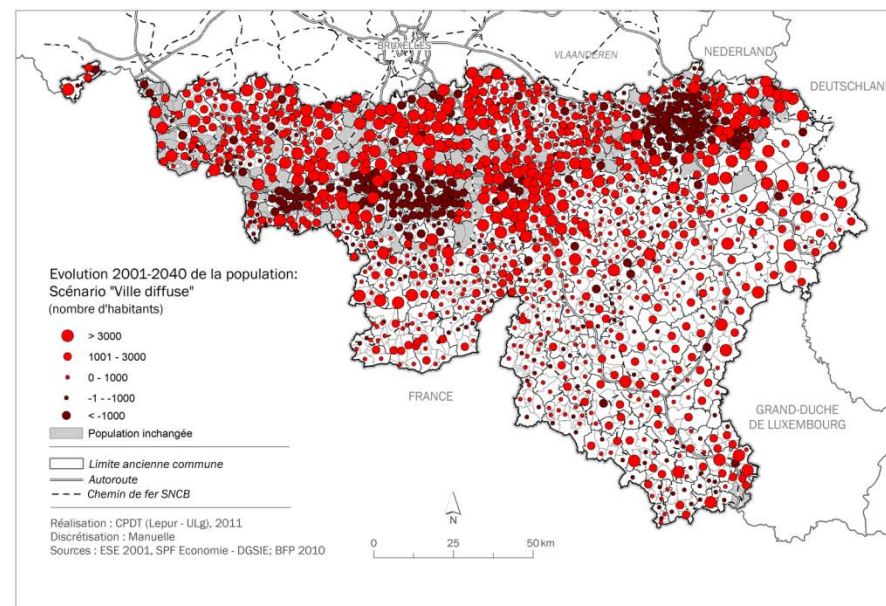
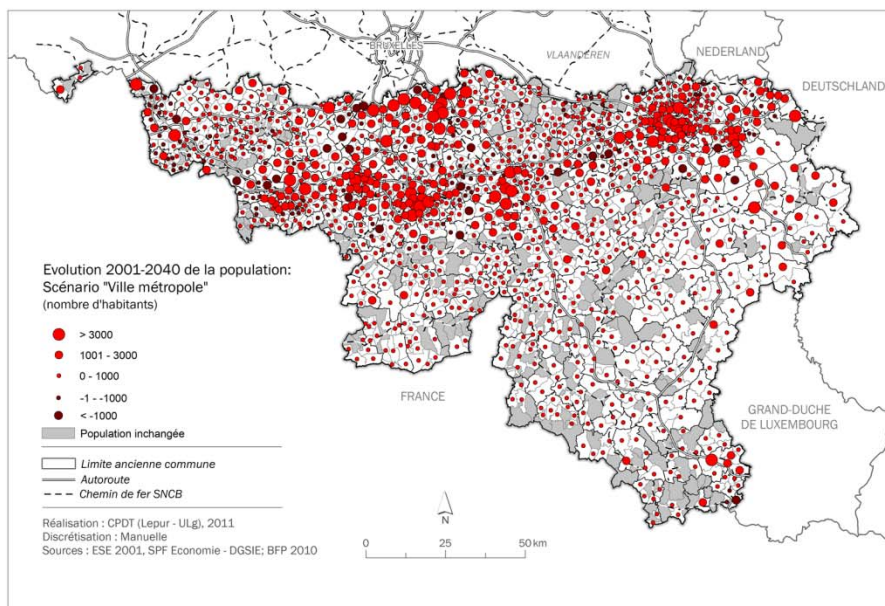
Dans le cas de la ville diffuse, la population et l'emploi évoluent proportionnellement de la même manière. Globalement, la ville est délaissée par l'habitat et l'activité économique au profit des zones périurbaines et rurales. Il y a décentralisation et déconcentration à la fois de la population et de l'emploi à travers tout le territoire. Les pôles primaires subissent les pertes les plus importantes. À l'opposé, les zones périurbaines et les zones rurales les moins reculées se voient attribuer les plus fortes augmentations.

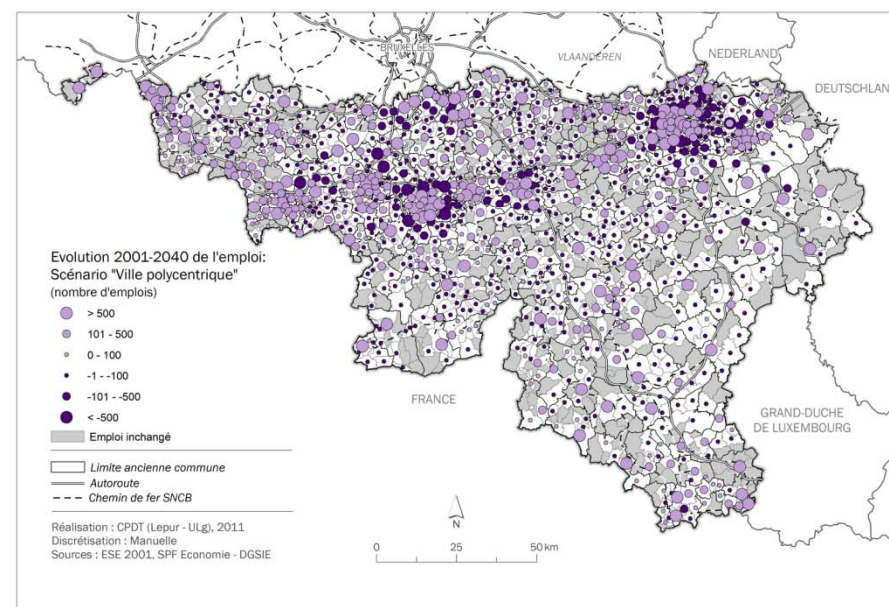
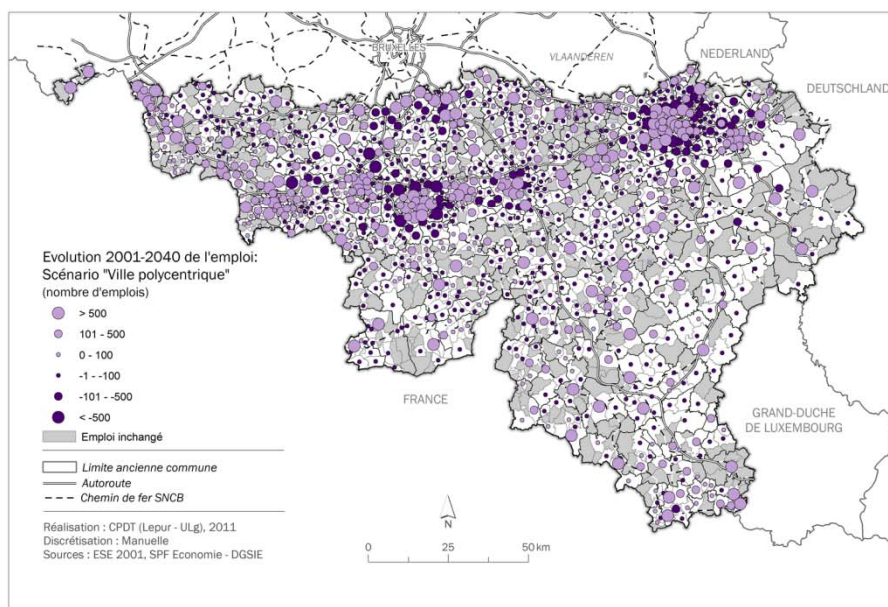
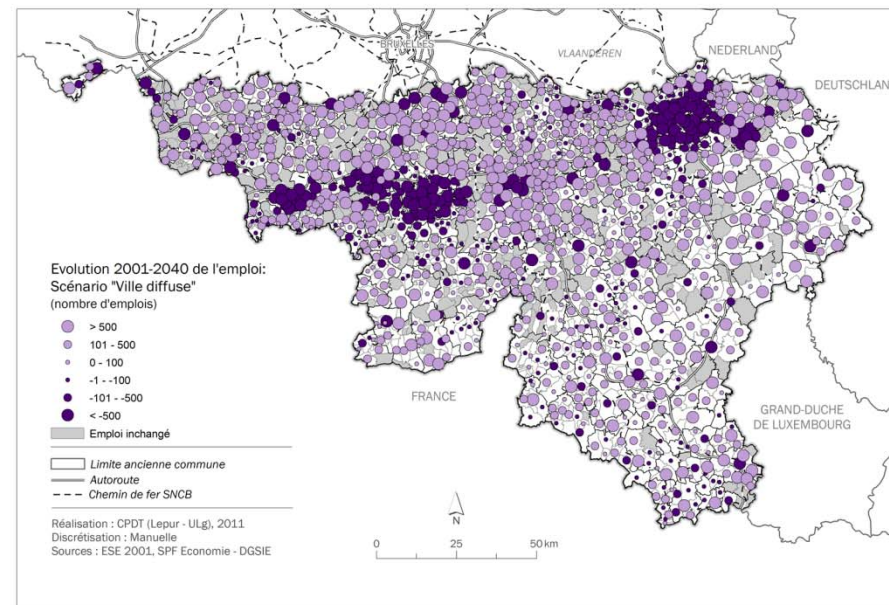
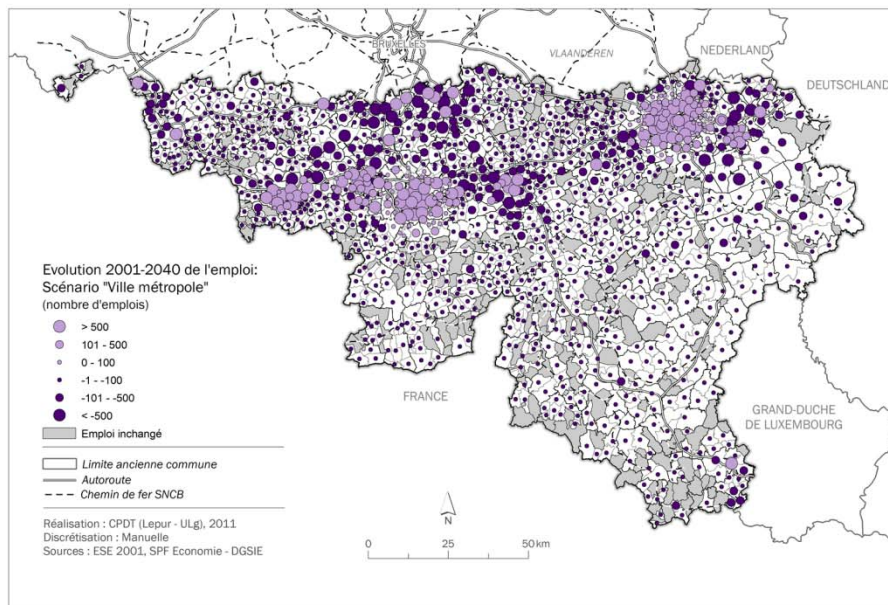
En ce qui concerne la ville compacte: les pôles d'emplois majeurs de la région wallonne sont autosuffisants. Les déplacements domicile-travail sont limités. La forme urbaine présente une compacité et une densité importante.

Finalement, le scénario de la ville polycentrique fait l'hypothèse que les pôles majeurs n'attirent plus la majorité des travailleurs. Ceux-ci sont concurrencés par des pôles de moyenne importance. Les déplacements domicile-travail sont limités et la densité est raisonnée.

Des cartes de l'évolution relative de la population et de l'emploi ont été effectuées (cf. annexe 9.8). Elles constituent une représentation spatiale des hypothèses émises dans le Tableau 13. Cependant, elles ne permettent pas d'appréhender le volume de population et d'emploi qui est affecté aux différentes parties du territoire selon le scénario considéré. C'est pourquoi sont présentées ci-dessous l'évolution absolue entre 2001 et 2040 des deux variables. La méthodologie ayant abouti à ce résultat est détaillée au point suivant.







### 5.2.2.3 Calcul des variables du modèle

Sur base des hypothèses d'évolution de la population et de l'emploi, les 3 variables du modèle sont recalculées pour les 4 scénarii. À titre de comparaison, un scénario de référence est également envisagé.

#### a) Densité de population

Afin de faire évoluer la densité de population par ancienne commune à l'horizon 2040, les perspectives démographiques du BFP sont mobilisées, comme dans le cas de l'approche contrastée (cf. 5.2.1). Celles-ci prévoient une augmentation de 22,0% de la population entre 2001 et 2040. Sur base des données de population de l'ESE de 2001, cela représente une augmentation de 737.005 habitants.

Dans le cas du scénario de référence, nous avons utilisé les chiffres d'évolution de la population fournis à l'échelle la plus désagrégée, c'est-à-dire celle des arrondissements. La part de la population initiale au sein de l'arrondissement est utilisée comme clé de répartition pour ventiler la population totale attendue en 2040 au sein de l'arrondissement.

En ce qui concerne les 4 scénarii d'évolution de la structure territoriale, la répartition de la population s'effectue en deux étapes. Tout d'abord, chaque ancienne commune se voit retirer ou ajouter des habitants en fonction de la typologie à laquelle elle appartient et des hypothèses émises au Tableau 13. La traduction mathématique des hypothèses d'évolution de la population est définie arbitrairement comme suit :

(+++)	+75%
(++)	+50%
(+)	+25%
(0)	0
(-)	-25%
(--)	-50%
(---)	-75%

**Tableau 14. Traduction mathématique des hypothèses d'évolution de population et d'emploi**

Ensuite, les opérations diffèrent selon si l'ancienne commune accuse une perte ou un gain de population. Dans le premier cas, la population en 2040 est le résultat de l'opération effectuée à l'étape 1. Dans le deuxième cas, on effectue la somme des habitants retirés dans le premier cas pour l'ajouter au solde total de population supplémentaire attendue d'ici 2040 (737.005 habitants). Ce volume de population est ensuite attribué aux anciennes communes de manière proportionnelle à la population existante après augmentation de la population effectuée lors de la première étape. Le résultat de cette opération est la population en 2040.

Finalement, la densité de population par ancienne commune est recalculée en divisant la population totale estimée à l'horizon 2040 par la superficie totale de l'ancienne commune (restée inchangée).

### *b) Proximité de l'emploi*

L'évolution de l'emploi au lieu de travail se base sur le nombre de travailleurs au lieu de travail de l'ESE de 2001 ajusté sur base les données de l'ONSS de 2001<sup>4</sup>. Il évolue de manière linéaire entre 2001 et 2040 proportionnellement à l'augmentation de la population (+22% entre 2001 et 2040). Cette augmentation représente 197.647 emplois supplémentaires d'ici 2040.

Dans le cas du scénario de référence, l'emploi augmente de la même manière que la population en fonction des évolutions différenciées projetées par arrondissement. Pour les 4 scénarii d'évolution de la structure du territoire, la méthodologie adoptée est également la même que pour la population. La seule différence réside dans le solde d'emplois supplémentaires attendus à l'horizon 2040.

Notons qu'aucune hypothèse n'est avancée par rapport à l'évolution du marché du travail d'ici 2040. Compte tenu de l'évolution démographique attendue et de l'incertitude économique que l'on connaît actuellement, il est cependant évident que le nombre d'actifs occupés pourrait décroître à cet horizon, amenant à une surévaluation du nombre d'emplois dans nos analyses.

L'indicateur de proximité de l'emploi est ensuite recalculé pour 2040 en poursuivant la même méthodologie adoptée lors de la subvention 2009-2010. Il s'agit de comptabiliser par ancienne commune la somme des emplois (par secteur statistique) dans un rayon de 10 kilomètres autour de son périmètre.

### *c) Mixité des fonctions*

L'indice de mixité des fonctions poursuit une évolution linéaire entre 2001 et 2040, toujours proportionnellement à l'augmentation de la population. Sur base des valeurs de l'indice construit lors de la subvention 2009-2010, la mixité des fonctions des anciennes communes augmente de 22%, cela de manière uniforme sur l'ensemble territoire.

Contrairement à l'évolution de l'emploi et de la population, aucune hypothèse sur la répartition spatiale de l'évolution de la mixité des fonctions n'est effectuée. Ce manquement serait cependant difficile à combler tant les hypothèses à poser pour décrire les changements futurs de l'occupation du sol sont nombreuses.

#### **5.2.2.4 Modèle d'estimation des valeurs d'IPE attendues**

L'évolution à l'horizon 2040 des variables d'entrée calculées au point précédent induit de nouveaux comportements de mobilité et donc des modifications des émissions de GES. Un des avantages des modèles de régression linéaire effectués aux points 4.1 et 4.2, c'est de pouvoir prédire la valeur moyenne attendue (théorique) de l'indice de performance environnementale sur base des trois paramètres étudiés. L'équation utilisée se présente de la manière suivante:

$$\log IPE_{CO2} = \alpha + \beta_1 * \log DENS\_POP + \beta_2 * \log EMPL\_10KM + \beta_3 * \log MIXITE\_URBA$$

---

<sup>4</sup> La donnée sur le nombre d'emplois par ancienne commune n'existant pas, le nombre total d'emplois correspond à la somme totale des emplois par commune renseignée dans la brochure jaune de l'ONSS. La part de l'emploi d'une ancienne commune par rapport à l'emploi communal est utilisée comme clé de répartition.

Afin d'améliorer la précision du modèle, nous avons cette fois pris en compte l'autocorrélation spatiale. En effet, lorsqu'une valeur observée à un endroit donné dépend de la valeur observée dans son voisinage, il y a dépendance spatiale. Étant donné que nos données sont suffisamment précises que pour être spatialement contigües sur l'ensemble du territoire d'étude, cette problématique doit être traitée pour renforcer la robustesse du modèle.

Pour ce faire, trois modèles sont calculés grâce au logiciel libre GeoDA: *ordinary least squares estimation* (OLS), *spatial lag model* et *spatial error model*. Une transformation logarithmique est appliquée aux quatre variables afin d'obtenir une distribution normale des données.

L'indice de Moran I très élevé de l'OLS démontre bien qu'il y a une très forte dépendance spatiale. Après comparaison des tests d'hétéroscédasticité, bien que le *spatial lag model* présente un *Likelihood Ratio Test* sensiblement meilleur à celui du *spatial error model*, c'est ce dernier qui a été retenu car il est plus fiable (tous les tests de significativité,  $p$ , avoisinent zéro). De plus, il possède un coefficient de détermination  $R^2$  légèrement supérieur à celui du *spatial lag model*: 0,764. Ce coefficient élevé démontre l'utilité d'un modèle de régression tenant compte de l'autocorrélation spatiale. Les trois variables prises en compte dans le modèle expliquent maintenant plus des trois quarts des émissions de GES des déplacements domicile-travail.

	Coefficients non standardisés ( $\beta$ )	Significativité ( $p$ )
Constante ( $\alpha$ )	1.991	0,000
1. DENS_POP	-0.030	0,000
2. EMPL_10KM	-0.059	0,000
3. MIXITE_URBA	-0.147	0,000

**Tableau 15.** *Spatial error model*

Une fois ces analyses effectuées, les coefficients non standardisés (Beta) du *spatial error model* sont extraits (cf. Tableau 15) afin de déterminer l'indice de performance environnementale théorique d'une ancienne commune à l'horizon 2040. L'estimation est calculée comme suit :

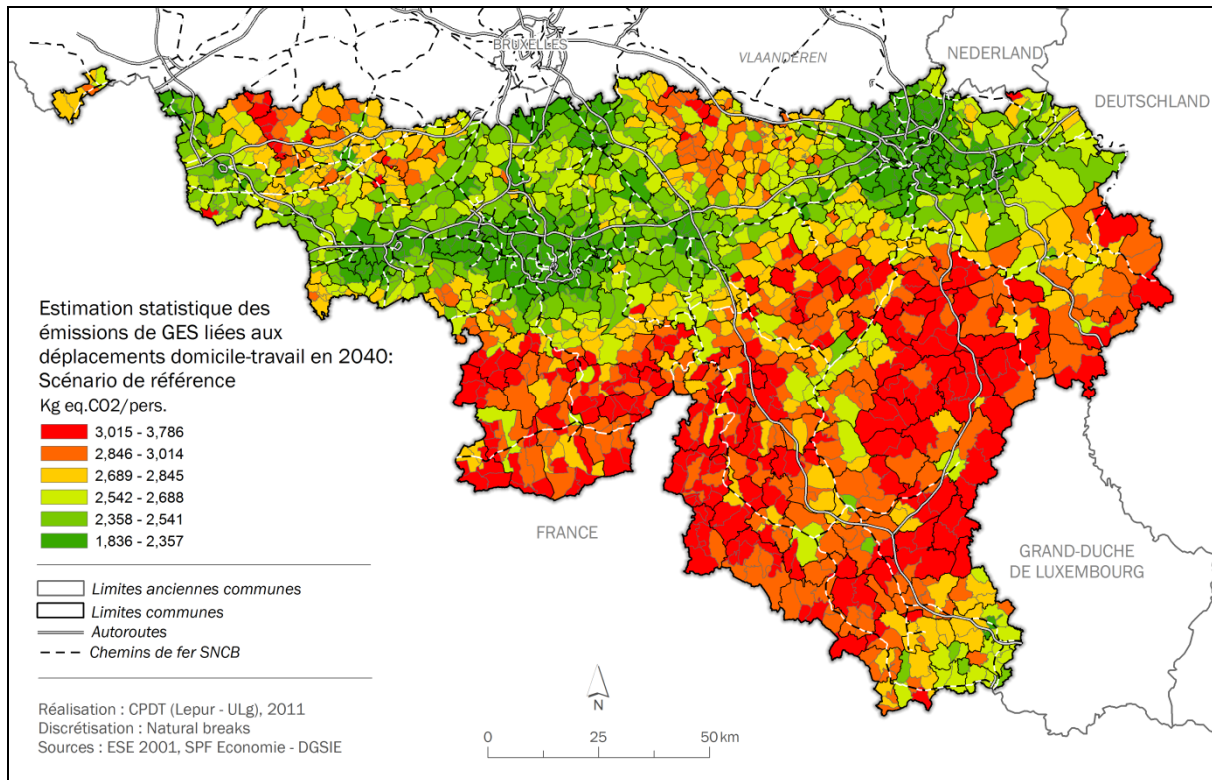
$$IPE_{CO2_{AC}} = \exp(1,991 - 0,030 * \log DENS\_POP_{AC} - 0,059 * \log EMPL\_10KM_{AC} - 0,147 * \log MIXITE\_URBA_{AC})$$

Le signe négatif des coefficients non standardisés confirme la relation inversement proportionnelle entre l'IPE et les trois variables explicatives du modèle. Au plus la densité, la proximité à l'emploi et la mixité augmentent, au plus les émissions diminuent. Dans les résultats, on peut donc s'attendre à de faibles émissions par travailleur là où se concentrent la population et l'emploi.

### 5.2.2.5 Principaux résultats

#### a) Estimation statistique des émissions de GES liées aux déplacements domicile-travail en 2040 par ancienne commune

Tous scénarii confondus, l'indice montre la même tendance générale qu'en 2001. Les bonnes performances énergétiques des déplacements domicile-travail s'observent au sein du sillon Sambre et Meuse. Les régions qui présentent de mauvaises performances sont le sud de la province du Hainaut et de Namur, ainsi que la majeure partie de la province du Luxembourg. La périphérie sud-ouest et sud-est de Bruxelles présente également un indice élevé (cf. Figure 11 par exemple).



**Figure 11. Estimation statistique des émissions de GES des déplacements domicile-travail en 2040 (Kg eq.CO<sub>2</sub>/pers.) selon le scénario de référence**

Une telle tendance démontre bien le poids de la structure héritée du territoire. Malgré des hypothèses relativement fortes d'évolution de la population et de l'emploi, la quantité moyenne de kg d'équivalent CO<sub>2</sub> émise par trajet et par habitant par ancienne commune ne change pas fondamentalement. Les grandes villes restent des pôles attractifs majeurs qui concentrent suffisamment de population et d'emplois pour minimiser les distances domicile-travail. À l'opposé, les zones rurales restent des zones peu peuplées distantes des grands pôles d'emplois, ce qui a tendance à induire de longs déplacements domicile-travail.

Cependant, quelques nuances entre les 4 scénarii peuvent être tout de même discernées. Les scénarii de la ville diffuse et de la ville compacte présentent des zones élargies de très bonne performance autour des villes principales du sillon Sambre et Meuse. Le scénario de la ville polycentrique met en évidence un indice très faible dans les pôles secondaires ruraux du sud de la province. Finalement, le scénario de la ville diffuse se démarque des trois autres par la faible proportion d'anciennes communes accusant des valeurs d'indice élevées. Cela s'explique essentiellement par la large diffusion de l'emploi et de l'habitat, amenant à de plus faibles émissions par navetteur. L'évolution 2001-2040 de l'indice permet de détailler d'avantages ces constats.

Le Tableau 16 détaille le nombre total d'habitants et d'emplois déplacés et leur part relative par rapport au total de population et d'emploi attendu en 2040 en Région wallonne (respectivement 4.090.661 habitants et 1.100.767 emplois) selon le scénario étudié. Il permet de faciliter l'interprétation des résultats. En effet, le cas de la ville diffuse se démarque des autres scénarii car près de la moitié des habitants et des emplois (42% et 46% respectivement) sont déplacés, ce qui impacte fortement l'organisation du territoire. Un tel remodelage s'explique par les importants retraits de population dans les pôles primaires imposés par les hypothèses de départ.

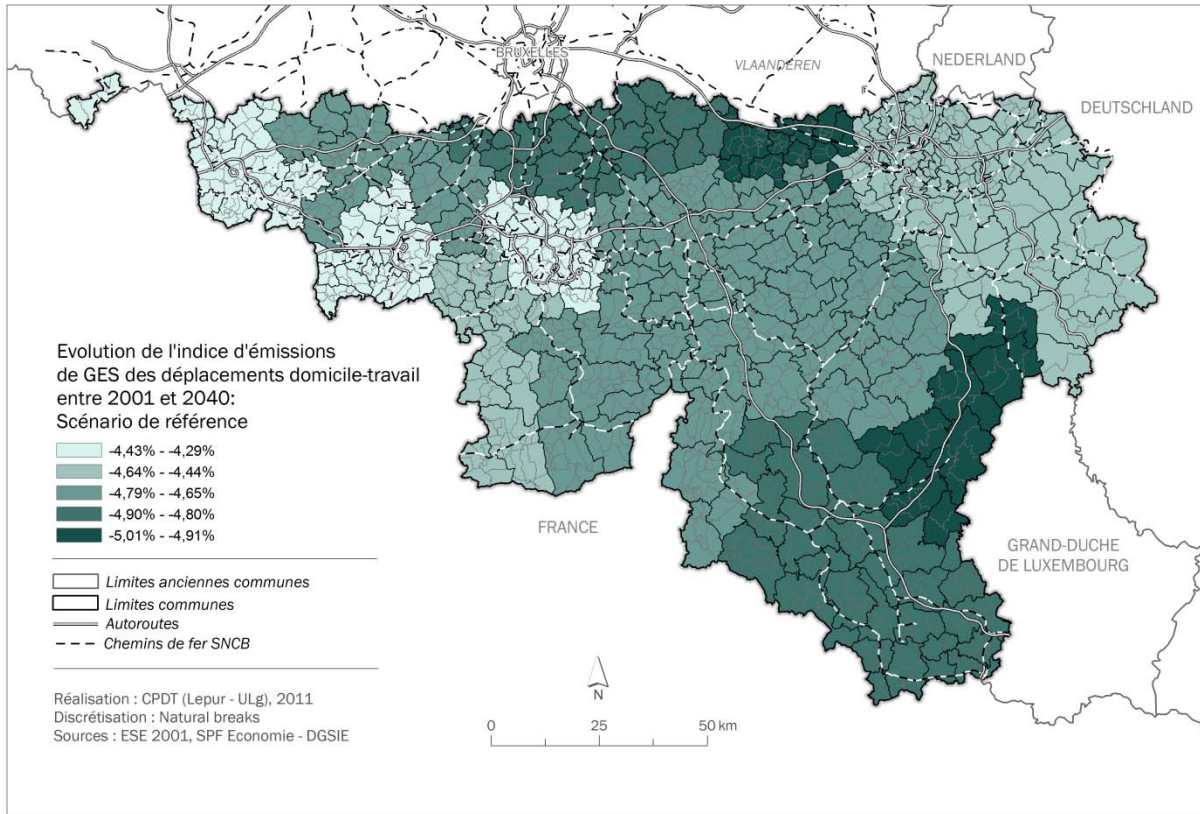
Variable	Ville métropole		Ville diffuse		Ville compacte		Ville polycentrique	
	Pop.	Empl.	Pop.	Empl.	Pop.	Empl.	Pop.	Empl.
Volume déplacé	1.136.847	400.164	1.728.820	508.775	1.105.575	301.600	1.046.201	298.889
Part (%) du total 2040	27,8	36,4	42,3	46,2	27,0	27,4	25,6	27,2

**Tableau 16. Nombre total d'habitants et d'emplois déplacés et leur part relative par rapport au total attendu en 2040**

*b) Évolution de l'indice d'émissions de GES des déplacements domicile-travail entre 2001 et 2040 par ancienne commune*

L'indice de performance des déplacements domicile-travail généralement diminue entre 2001 et 2040, à l'exception de certaines anciennes communes dans le cas du scénario de la ville diffuse. Les plus fortes diminutions s'observent là où beaucoup de population et d'emplois ont migrés. Généralement, le renforcement d'un pôle par une forte augmentation de la population et de l'emploi entraîne une amélioration de l'indice par navetteur.

Dans le cas du scénario de référence, les arrondissements accusent une diminution des émissions de GES par navetteur supérieure à la moyenne régionale. Notons cependant que ces diminutions n'affectent qu'une faible part de la population totale. Cela est bien mis en évidence dans l'évaluation des émissions totales en 2040 (Figure 14). De plus, une telle diminution de l'indice suppose que l'emploi va croître dans les mêmes proportions que la population d'ici 2040, mais rien ne porte à croire actuellement que l'activité économique va se développer de manière préférentielle dans ces zones.



**Figure 12. Evolution 2001-2040 de l'indice d'émissions de GES des déplacements domicile-travail selon le scénario de référence**

L'amélioration de l'indice par navetteur s'étend dans un rayon qui varie selon le scénario de structuration du territoire (cf. Figure 13).

Dans le cas de la ville métropole les fortes diminutions de l'indice s'observent autour des pôles primaires et de leur périphérie, dans un rayon de 10 à 20 km. L'indice diminue également de manière significative en dehors de ceux-ci. La diffusion de la population sur le territoire a pour effet de rapprocher un nombre important d'habitants des emplois présent dans ces zones.

Ce phénomène s'observe de manière très marquée dans le scénario de la ville diffuse car l'emploi a migré avec la population. Par ailleurs, l'augmentation de l'indice s'explique par la migration des emplois en dehors des pôles. Cela signifie que les habitants de ceux-ci sont obligés de se déplacer sur de plus longues distances, en dehors des agglomérations, pour aller travailler.

Ce phénomène de décentralisation de la population de l'emploi a déjà été observé entre 1991 et 2001 dans le centre de la province du Brabant wallon par exemple (Dujardin *et al.* 2011). L'augmentation de la densité de population et l'importante création d'emplois dans cette zone ont permis de combler l'inadéquation entre emploi et résidence, fréquemment observée ailleurs sur le territoire. Cependant, étant donné que l'essentiel de la population réside dans les principales agglomérations et que ces diminutions de l'indice n'affectent qu'une faible part de la population totale, une augmentation globale de la consommation énergétique est toujours observée (cf. ci-dessous).



Le scénario de la ville compacte présente des évolutions plus contrastées. Les fortes diminutions s'observent dans les pôles primaires, secondaires, mais également à leurs abords, c'est à dire dans les zones périphériques des grands pôles et périurbaines. Il s'agit de la distance d'influence des pôles ayant subi une augmentation du nombre d'habitants et d'emploi. Ces zones de forte diminution de l'indice se marquent clairement le long du sillon Sambre et Meuse et de part et d'autre des axes majeurs reliant les pôles primaires de Namur, Charleroi et La Louvière à Bruxelles.

Finalement, le scénario de la ville polycentrique présente des diminutions dans des zones peu mises en évidence dans les scénarii précédents. La décentralisation de la population et de l'emploi dans les pôles secondaires ruraux a pour effet d'améliorer les performances des zones reculées du territoire souvent fort émettrices. Ceci s'explique par le maillage assez dense des anciennes communes qui constituent la catégorie "pôles secondaire ruraux". Spatialement, la diminution de l'indice apparaît donc plus étendue. Comparé au scénario de la ville compacte, un plus grand nombre d'anciennes communes est affectée par une diminution des émissions par navetteur.

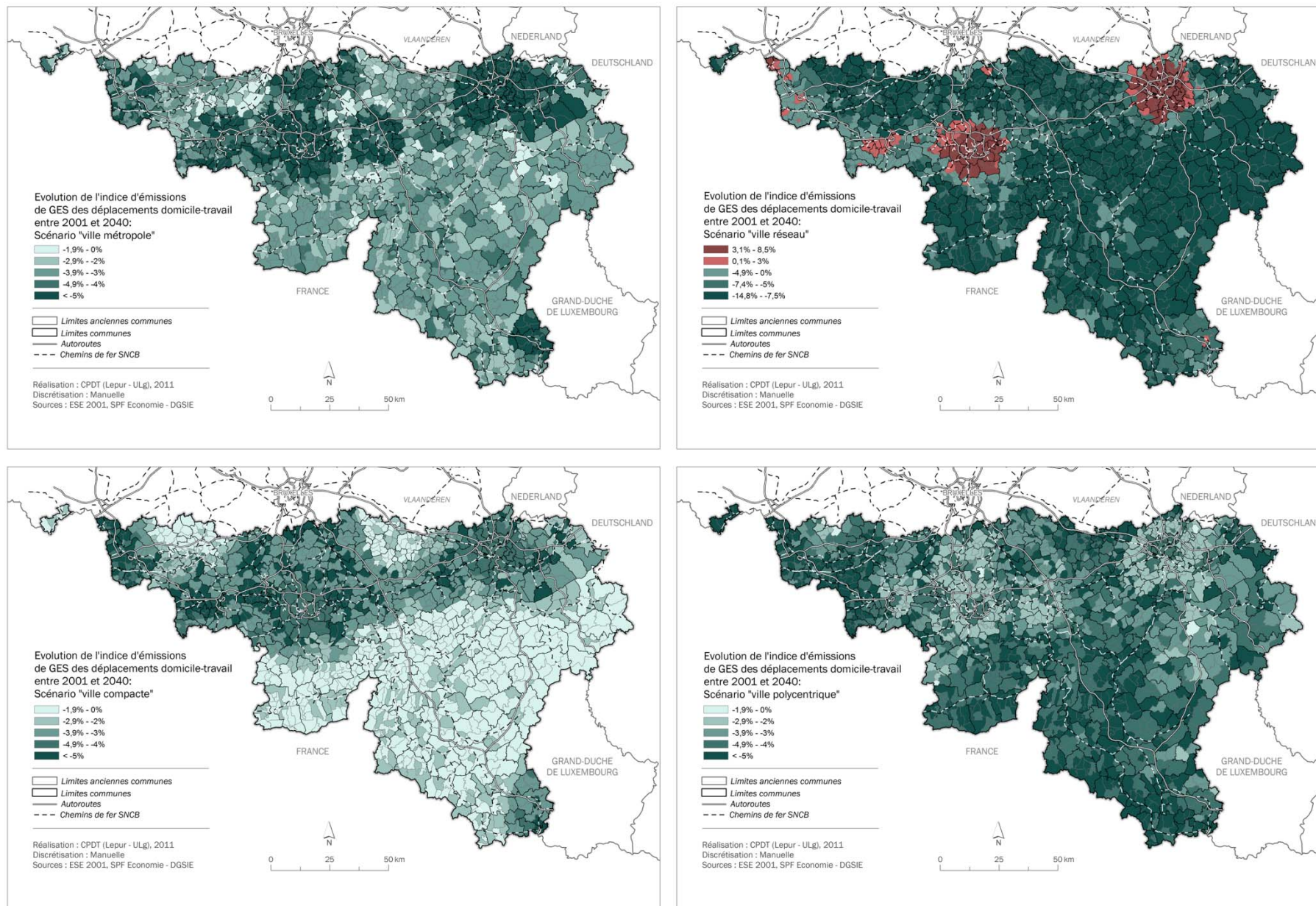


Figure 13. Evolution 2001-2040 de l'indice d'émissions de GES des déplacements domicile-travail selon le scénario de structure territoriale

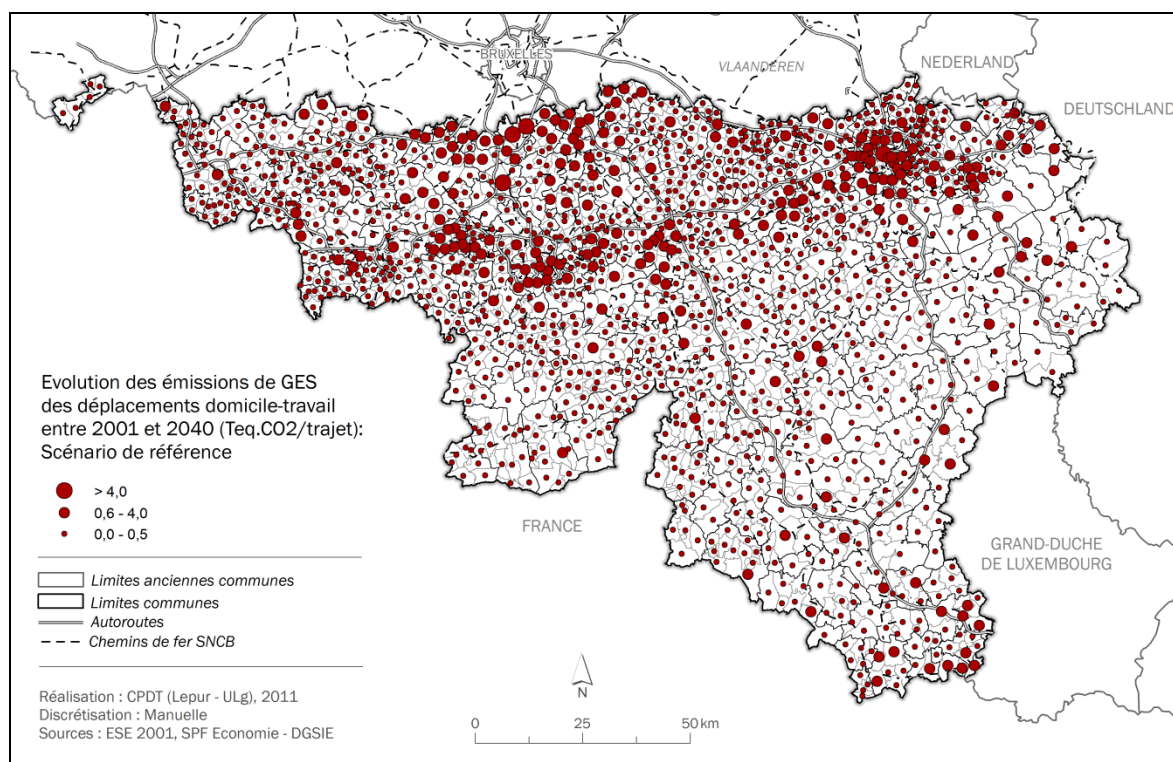
c) *Évolution des émissions de GES des déplacements domicile-travail entre 2001 et 2040 par ancienne commune*

L'évolution de l'indice de performance des déplacements domicile-travail ne suffit pas pour évaluer les émissions de GES attendues en 2040. L'évaluation des émissions totales à cet horizon est également indispensable pour évaluer le bilan CO<sub>2</sub> global de la région.

Pour ce faire, l'indice d'émissions de GES (en  $\text{geq.CO}_2/\text{pers.-trajet}$ ) est multiplié par la part de la population active (qui se déplace vers un lieu de travail fixe) observée en 2001. Une fois cette opération effectuée pour 2001 et 2040, une comparaison en valeur absolue est dressée.

Tous scénarii confondus (Figure 14 et Figure 15), les zones les plus peuplées après répartition de la population et de l'emploi sont généralement les plus émettrices. À l'inverse, les zones ayant subi les pertes les plus importantes accusent une diminution des émissions de CO<sub>2</sub> totale. Ces variations sont spatialement différenciées selon le type de scénario envisagé.

Dans le cas du scénario de référence (Figure 14), on observe une augmentation des émissions généralisée sur l'ensemble du territoire entre 2001 et 2040. Les zones fortement peuplées sont les plus émettrices, mais certaines anciennes communes de zones plus périphériques présentent également des émissions dépassant la moyenne régionale. C'est le cas dans l'arrondissement de Waremme et de Bastogne où de fortes augmentations de la population sont attendues en 2040.



**Figure 14. Evolution 2001-2040 des émissions de GES des déplacements domicile-travail (Teq.CO<sub>2</sub>/trajet) selon le scénario de référence**

Le scénario de la ville métropole laisse transparaître une augmentation des émissions quasi généralisée sur l'ensemble du territoire wallon. La délocalisation de l'habitat dans les zones périurbaines et rurales engendre un coût CO<sub>2</sub> élevé en termes de déplacement domicile-travail. La diminution du nombre d'habitants dans les pôles secondaires a pour conséquence une diminution des émissions entre 2001 et 2040.

Dans le cas de la ville diffuse, on observe également une augmentation des émissions sur une très large partie du territoire. Le nombre de Teq.CO2 supplémentaire est cependant nettement plus élevé comparé au scénario de la ville métropole. Les pôles primaires et secondaires affichent une diminution des émissions suite à la migration d'une part importante de la population vers les zones périurbaines et rurales.

Les scénarii de la ville compacte et de la ville polycentrique attestent de nombreuses diminutions des émissions sur une part importante du territoire. Celles-ci sont plus étendues dans le cas de la ville compacte. La délocalisation de la population et de l'emploi étant projetée dans un nombre limité de pôles, peu d'anciennes communes subissent une augmentation des émissions entre 2001 et 2040. Pour le scénario de la ville polycentrique, les augmentations se concentrent dans un nombre de pôles plus élevé comparé au scénario de la ville compacte, d'où la répartition spatiale sensiblement plus diffuse des augmentations.

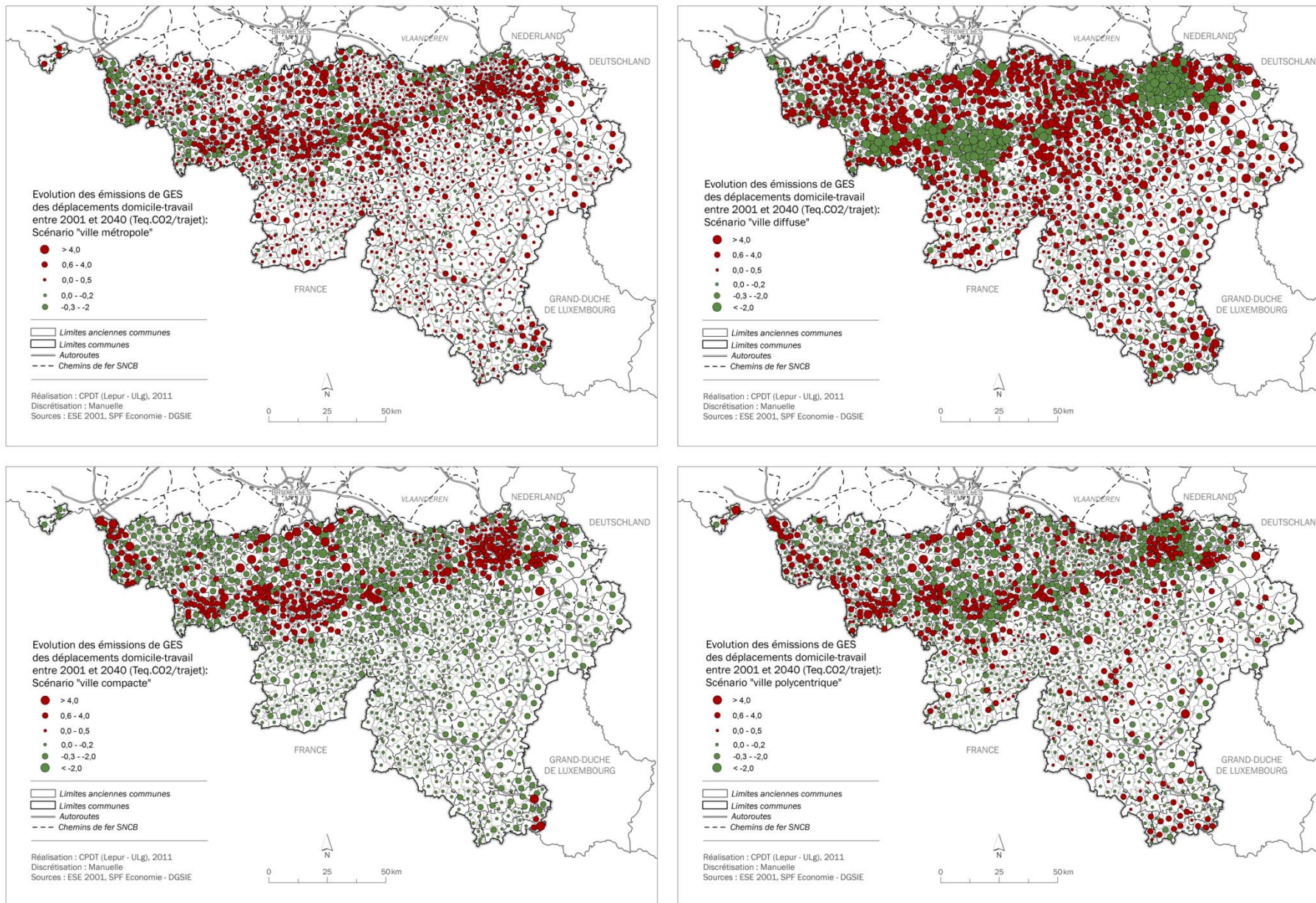


Figure 15. Evolution 2001-2040 des émissions de GES des déplacements domicile-travail (Teq.CO<sub>2</sub>/trajet) selon le scénario de structure territoriale

*d) Comparaison des scénarii***Évolution des émissions de GES des déplacements domicile-travail entre 2001 et 2040 en Wallonie selon le scénario de structure du territoire**

Le Tableau 17 met en évidence les émissions totales, par an, des émissions de GES des déplacements domicile-travail en 2001 et 2040 selon le type de forme urbaine. La Figure 16 illustre les émissions globales pour la Wallonie selon le scénario de structure territoriale. Pour obtenir ces chiffres annuels, nous avons convertis les émissions journalières en considérant un trajet aller-retour pendant une période de 253 jours ouvrables (Hubert & Toint 2002, p35).

Les résultats montrent que le scénario de la ville diffuse est le plus émetteur: les émissions de GES augmentent de 35% entre 2001 et 2040. À l'opposé, le scénario de la ville compacte accuse la plus faible augmentation d'émissions de GES, 17,1%. Ce scénario est suivi de près par celui de la ville polycentrique: 18,9% d'émissions de GES supplémentaires à l'horizon 2040. Un facteur 2 sépare donc les deux scénarii les plus extrêmes (la ville compacte et la ville diffuse).

Lorsque l'on compare les émissions totales en 2040 du scénario de référence (1.284 Teq.CO<sub>2</sub>)<sup>5</sup> avec les 4 autres scénarii, la ville métropole et la ville diffuse accusent respectivement 1,1 % et 11,0 % d'émissions supplémentaires. Par contre, la ville compacte et la ville polycentrique présentent des émissions inférieures au scénario de référence: -3,8 % et -2,3 % respectivement.

Afin d'interpréter ces écarts par rapport au scénario de référence, rappelons que les scénarii envisagés manipulent une part plus ou moins importante de la population et de l'emploi selon les hypothèses initiales de répartition (Tableau 16). Lorsqu'un volume de population et d'emploi important est déplacé, on peut s'attendre à de fortes variations par rapport au scénario de référence. C'est le cas par exemple du scénario de la ville diffuse qui envisage une délocalisation de 42 % de la population et de 46% de l'emploi total attendu en 2040. Les trois autres scénarii envisagent une délocalisation de l'emploi et de la population qui varie entre 27 % et 36 %, ce qui explique les plus faibles écarts par rapport au scénario de référence.

Ce qui importe donc n'est pas tant l'écart à la moyenne en valeur relative, mais bien la manière dont se hiérarchisent les 4 scénarii. La ville diffuse et la ville métropole sont deux modèles de ville qui engendrent une augmentation des émissions de GES liées aux déplacements domicile-travail, alors que la ville polycentrique et la ville compacte contribuent à une réduction ces émissions.

---

<sup>5</sup> Pour le cadrage de ce chiffre par rapport aux émissions du transport terrestre de voyageurs en Wallonie, voir le rapport final de la subvention 2009-2010, p41.

	2001	Ville métropole		Ville diffuse		Ville compacte		Ville polycentrique	
		2040	%	2040	%	2040	%	2040	%
1. Ville régionale (pôle I)	166,2	184,9	11,2	44,5	-73,2	204,9	23,2	208,6	25,5
2. Grande ville (pôle I)	229,3	258,6	12,8	57,6	-74,9	335,1	46,2	286,9	25,1
3. Périphérie des pôles I	122,9	136,8	11,3	63,8	-48,1	151,4	23,2	89,7	-27,1
4. Pôles II	162,7	119,0	-26,9	155,6	-4,3	276,4	69,9	242,5	49,1
5. Pôles II ruraux	166,4	162,2	-2,6	118,0	-29,1	161,4	-3,0	285,7	71,7
6. Périurbain	151,2	236,4	56,3	496,1	228,1	109,4	-27,7	110,1	-27,2
7. Zone rurale I	175,3	277,7	58,5	482,5	175,3	128,2	-26,9	167,4	-4,5
8. Zone rurale II	85,8	117,4	36,9	196,2	128,7	63,0	-26,5	61,9	-27,8
9. Zone rurale III	24,5	28,1	14,7	56,1	128,5	18,1	-26,4	17,7	-27,8
Région wallonne	1284,3	1521,1	18,4	1670,4	30,1	1447,8	12,7	1470,4	14,5

**Tableau 17. Emissions de GES totales des déplacements domicile-travail en 2001 et 2040 (Téq.CO<sub>2</sub>/an) et évolution 2001-2040 (%) selon les 9 types de forme urbaine**

La ville diffuse est la plus émettrice car le scénario prévoit qu'une part importante de la population des pôles primaires et secondaires migre dans les zones périurbaines et rurales. Bien que cette migration soit couplée avec une délocalisation de l'emploi, le ratio population/emploi des zones d'accueil reste malgré tout plus faible que dans les zones d'origine. Une telle configuration de structure territoriale a pour conséquence d'augmenter très fortement les émissions totales. Une délocalisation de la population et de l'emploi en dehors des pôles primaires et secondaires du territoire ne permet donc pas de limiter les déplacements domicile-travail d'un volume suffisant de la population que pour améliorer le bilan CO<sub>2</sub> global des déplacements domicile-travail.

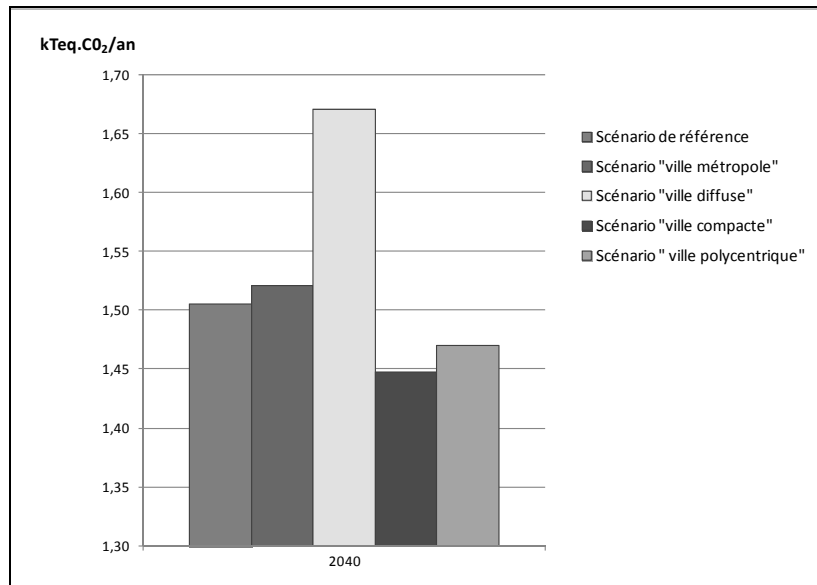
La ville métropole présente des émissions supérieures au scénario de référence car le scénario envisage une centralisation de l'emploi dans les pôles primaires du territoire, couplée à une décentralisation de l'habitat à l'échelle régionale. Dans les zones périurbaines et rurales, étant donné que l'arrivée de nouveaux habitants n'est pas accompagnée d'emplois, l'indice d'émissions reste relativement élevé. Les travailleurs sont contraints à parcourir de longues distances pour se rendre dans les pôles primaires (les grandes villes et les villes régionales). Cela se traduit par une augmentation des émissions quasi généralisée sur l'ensemble du territoire.

La ville polycentrique est moins émettrice que le scénario de référence suite à une meilleure adéquation entre localisation des emplois et de l'habitat. Le scénario prévoit une augmentation de la population et de l'emploi dans les pôles primaires et secondaires du territoire au détriment des zones périphériques des pôles primaires, des autres zones périurbaines et des zones rurales. Cela a pour conséquence de créer un maillage de pôles suffisamment dense permettant de limiter les déplacements domicile-travail et donc les émissions de GES.

La ville compacte est le modèle de ville le moins émetteur de par la très forte concentration de la population et de l'emploi dans un nombre limité de pôles. La centralisation des lieux de résidence et d'emploi dans les pôles primaires et leur périphérie, ainsi que dans certains pôles secondaires, offre à la majeure partie des travailleurs des opportunités d'emplois dans un rayon ne dépassant pas les 25 km. La réduction des distances domicile-travail pour ces travailleurs se traduit par une diminution globale des émissions.

Dans le cas du scénario de la ville compacte, l'application de telles densités impliquerait une réorganisation profonde de la structure du territoire assez contraignante étant donné qu'il suppose la limitation de tout développement en dehors des grands pôles d'emplois actuels. Par contre, le scénario de la ville polycentrique semble offrir un meilleur compromis car il se base essentiellement sur un renforcement accru des pôles secondaires, bien présents sur l'ensemble du territoire.

Rappelons finalement que ces scénarii supposent implicitement une augmentation de la mobilité résidentielle et une meilleure adéquation entre localisation des emplois et des actifs aptes à occuper ces emplois.



**Figure 16. Estimation des émissions de GES totales des déplacements domicile-travail en Wallonie en 2040 selon le scénario de structure territoriale**

### ***Implications en termes de distances domicile-travail minimum à l'origine***

La distance domicile-travail minimum ou « *minimum commuting distance* » (MCD) en anglais est la distance minimale théorique - telle que suggérée par la structure spatiale du lieu considéré - qu'un travailleur pourrait parcourir pour se rendre à son travail s'il acceptait d'occuper le travail le plus proche de son domicile, et cela indépendamment de son niveau de qualification. Les MCD sont un indicateur de la séparation/du déséquilibre entre la fonction résidentielle, considérée comme l'origine des déplacements, et les autres fonctions (travail, école, commerces, loisirs), considérées comme des destinations. Calculées à l'origine, les MCD expriment l'éloignement de l'entité considérée par rapport aux centres d'emploi.

Évalués au point 3.2.3.1 pour 2001, les MCD ont été réévalués sur base des chiffres de population et d'emploi des 4 scénarii de structure territoriale. Le Tableau 18 compare le nombre total de kilomètres (en Milliers) parcourus à l'origine en 2001 et 2040 selon les 9 types de forme urbaine. L'évolution 2001-2040 est également présentée.



	2001	Ville métropole		Ville diffuse		Ville compacte		Ville polycentrique	
		2040	%	2040	%	2040	%	2040	%
1. Ville régionale (pôle I)	119	240	102,4	51	-56,8	445	274,4	552	364,7
2. Grande ville (pôle I)	287	591	105,6	88	-69,4	1.528	431,7	1.555	441,1
3. Périphérie des pôles I	284	503	77,1	153	-46,1	699	146,1	285	0,3
4. Pôles II	290	441	52,1	639	120,4	1.687	481,5	1.805	522,2
5. Pôles II ruraux	251	624	148,4	286	14,0	485	93,3	1.370	445,5
6. Périurbain	313	3.979	1173,1	2.888	823,9	350	11,9	423	35,5
7. Zone rurale I	442	4.296	872,7	2.898	556,1	623	41,1	997	125,6
8. Zone rurale II	251	1.408	461,4	878	250,2	344	37,2	307	22,3
9. Zone rurale III	64	220	244,6	367	475,8	89	39,4	80	25,3
Région wallonne	2.300	12.302	434,8	8.249	258,7	6.249	171,7	7.372	220,5

**Tableau 18. Nombre total de kilomètres (en Milliers) parcourus à l'origine en 2001 et 2040 et évolution 2001-2040 (en %) selon les 9 types de forme urbaine**

### Implications en termes de densité

Afin de situer les chiffres avancés ci-dessus par rapport à la réalité terrain, nous avons fait l'exercice de calculer ce que représentaient les hypothèses posées pour chacun des scénarii en termes de densité d'activité humaine nette (DAHN), c'est-à-dire le nombre d'habitants et d'emplois par hectare urbanisé. À titre de comparaison, Fouchier (1997) a mesuré des DAHN pouvant atteindre les 900 habitants+emplois/ha en l'île de France. La plus forte DAHN observée en Wallonie en 2001 est celle de l'ancienne commune de Charleroi avec 262 habitants+emplois/ha. La DAHN moyenne des anciennes communes wallonnes en 2001 est de 29 habitants+emplois/ha.

Dans le Tableau 19, il apparaît que le scénario de la ville diffuse implique une relocalisation importante de la population et de l'emploi. Ainsi, le périurbain voit sa DAHN plus que triplée (+222,2%). Les zones rurales accusent en moyenne une augmentation de plus de 100%, ce qui apparaît difficilement réalisable. Par contre, le scénario de la ville métropole présente des évolutions de la DAHN moins fortes qui oscillent entre -38,7 % et +23,8 %. Les scénarii de la ville compacte et de la ville polycentrique ont pour conséquence des variations de la DAHN qui varient entre plus ou moins une fois et demi la densité initiale (-40,8 % à 44,3 %).

En termes d'acceptation de telles mesure, nous avons surligné les DAHN supérieures à 45 habitants+emplois/ha, c'est à dire le seuil de densité au-delà duquel la relation "forte densité = statut socio-économique élevé = faibles émissions" s'inverse. En effet, dans les zones de forte intensité d'occupation du sol, nous avons observé sur base des données de 2001 qu'un statut socio-économique élevé est associé à de fortes émissions (cf. 4.2). Dès lors, augmenter la densité dans les pôles primaires et secondaires du territoire d'ici 2040 implique que les populations au statut socio-économique élevé acceptent de vivre dans ces zones où l'occupation du sol est intense. Tenir compte de ce phénomène est indispensable si les objectifs de diminutions des émissions de GES veulent être atteint.

	2001	Ville métropole		Ville diffuse		Ville compacte		Ville polycentrique	
		2040	%	2040	%	2040	%	2040	%
1. Ville régionale (pôle I)	<b>74</b>	<b>81</b>	+9,6	16	-78,9	<b>79</b>	+7,1	<b>81</b>	+8,8
2. Grande ville (pôle I)	<b>58</b>	<b>59</b>	+1,8	12	-79,4	<b>73</b>	+25,9	<b>62</b>	+6,6
3. Périphérie des pôles I	35	36	+0,5	15	-57,4	39	+8,7	23	-36,2
4. Pôles II	31	19	-38,7	26	-18,2	<b>46</b>	+46,3	40	+27,3
5. Pôles II ruraux	32	26	-20,3	19	-40,3	26	-20,3	47	+44,3
6. Périurbain	25	30	+21,6	<b>81</b>	+222,2	15	-38,8	15	-38,8
7. Zone rurale I	24	30	+23,8	<b>65</b>	+166,4	14	-40,4	19	-20,5
8. Zone rurale II	21	23	+7,8	<b>46</b>	+114,8	13	-40,8	13	-40,8
9. Zone rurale III	19	17	-8,4	36	+94,9	11	-40,8	11	-40,8
Région wallonne	29	30	1,2	43	48,3	25	-13,5	27	-7,1

**Tableau 19. DAHN (pop.+empl./ha urb.) moyenne des anciennes communes en 2001 et 2040 et évolution 2001-2040 selon les 9 types de forme urbaine**

### **5.2.2.6 Précautions et limitations**

Notons que notre modèle n'intègre pas certaines grandes évolutions prévisibles susceptibles d'impacter les consommations et les émissions, telles que :

-L'évolution des consommations et émissions spécifiques des modes de transports: une amélioration des performances environnementales des différents moyens de transport pourrait être envisagée d'ici 2040 ;

-Les contraintes environnementales et urbanistiques, notamment le nombre fini de superficie urbanisable disponible au plan de secteur.

-L'évolution des modes de transports. La création ou la suppression de lignes de transports en commun structurant n'est pas envisagée. Evaluer le report modal lié à ces changements aurait été difficile à modéliser compte tenu des données disponibles actuellement.

Finalement, les émissions de CO<sub>2</sub> à l'horizon 2040 estimées dans cet exercice sont calculées sur base d'analyses décrivant une relation CO<sub>2</sub> - structure du territoire, tel qu'elle existe aujourd'hui. Il se peut qu'en 2040, les 3 variables étudiées ne permettent plus d'expliquer une part importante des émissions de GES des déplacements domicile-travail. L'équation deviendrait alors obsolète et le modèle établi dans ce travail devrait être revu.

## 6. CONCLUSIONS

À travers le cadastre des émissions de GES liées aux déplacements domicile-travail, il apparaît que la structure du territoire constitue un facteur explicatif majeur pour l'interprétation des performances environnementales des déplacements des travailleurs. La moyenne régionale des émissions de GES s'élève à 2,5 kg équivalents CO<sub>2</sub> par trajet et par navetteur. On constate de bonnes performances dans les communes les plus peuplées du sillon wallon. Les communes qui accusent les moins bonnes performances sont généralement situées dans les espaces « périphériques » ou « ruraux » moins peuplés de Wallonie et éloignés des pôles d'emplois principaux. Entre 1991 et 2001, on observe une augmentation de 16 % de la moyenne des distances parcourues pour les déplacements domicile-travail. Cette évolution, couplée avec l'augmentation généralisée de l'utilisation de la voiture, se solde par une augmentation des émissions de GES par navetteur de 20%.

L'élaboration du cadastre des consommations énergétiques du bâti résidentiel met en évidence que les émissions de GES sont essentiellement influencées par des variables liées à la qualité de l'enveloppe des bâtiments, à la morphologie urbaine et à la localisation (effet climatique). Ainsi, les grandes villes du sillon wallon conservent de bonnes performances énergétiques, malgré l'ancienneté du bâti, et cela grâce au taux élevé de mitoyenneté qui caractérise les tissus urbains denses. Les consommations moyennes du bâti résidentiel étudié sont estimées à 350 kWh/m<sup>2</sup>.an, ce qui est considérable lorsque l'on compare ces chiffres avec ceux des pays voisins. De manière générale, les performances énergétiques du bâti décroissent logiquement avec l'âge et le taux de mitoyenneté. Par ailleurs, ce cadastre ne tient pas compte, entre autres, de la température interne de consigne et de la période de chauffe.

Les analyses de régression linéaire démontrent l'existence d'un lien fort entre structuration du territoire et émissions de GES. Une part importante (47,6 %) des émissions de GES liées aux déplacements domicile-travail s'explique par la proximité à l'emploi, la densité de population et la mixité fonctionnelle. Le mode de transport utilisé est une variable permettant peu d'expliquer les émissions de GES. Ce qui importe davantage est la distance parcourue. Par ailleurs, près d'un tiers (23,9 %) des émissions de GES liées aux déplacements domicile-travail s'explique par des variables socio-économiques. Le niveau d'éducation, considéré comme un *proxy* du revenu, le nombre de véhicules personnels par logement et le nombre de couples avec un ou plusieurs enfants apparaissent comme des variables explicatives fortes des émissions de GES.

Les modèles d'équations structurelles établis mettent en lumière la nature des relations qui existent entre les variables territoriales et les variables socio-économiques ainsi que leurs effets sur les émissions de GES liées aux déplacements domicile-travail. L'influence directe du statut socio-économique sur les émissions de GES est généralement faible comparée à celle de l'occupation du sol. Le statut socio-économique a un impact davantage indirect sur les émissions de GES. À l'échelle de la Wallonie, un statut socio-économique élevé est associé à une faible intensité d'occupation du sol, ce qui a pour effet de contribuer aux émissions de GES.

Somme toute, ce qui importe pour réduire les émissions de GES liées aux déplacements domicile-travail n'est pas tant la densité en tant que telle mais bien ce qui l'accompagne. Dans cette étude, il s'agit de la mixité fonctionnelle et de la proximité à l'emploi. Dès lors, densifier en suivant le principe d'intensité d'utilisation du sol apparaît comme étant un levier majeur de la structure du territoire permettant de réduire de manière significative les émissions de GES liées aux déplacements domicile-travail. Des nuances doivent néanmoins être apportées à ce constat selon la densité d'activité humaine nette (DAHN) de la région concernée.

Dans les zones où la densité d'activité humaine nette est forte (>45 hab.+empl./ha), plus le statut socio-économique est élevé, plus l'intensité d'occupation du sol a tendance à être faible et plus les émissions de GES sont élevées. Dans les zones où la densité d'activité humaine nette est faible (<45 hab.+empl./ha), un statut socio-économique élevé a tendance à être associé à une forte intensité d'occupation du sol, ce qui a pour conséquence de diminuer les émissions de GES. Ceci suggère donc qu'un seuil de densité existe au-delà duquel l'intensité de l'occupation du sol devient moins attrayante pour les populations ayant un statut socio-économique élevé. Une augmentation de la densité n'aura donc pas d'effet « mécanique » sur les émissions de GES, si elle n'est pas accompagnée de mesures contraignantes dans la périphérie.

La construction de scénarii prospectifs à l'horizon 2040 a permis d'envisager les futurs possibles en termes de structuration du territoire et leurs impacts sur les émissions de GES des déplacements domicile-travail. Une première approche met en évidence une très forte augmentation des émissions de GES (+75 %) si la tendance des comportements de mobilité observés entre 1991 et 2001 se poursuit de manière linéaire. Dans ce cas, un scénario de concentration de la population attendue d'ici 2040 dans les entités qui présentent une distance moyenne domicile-travail inférieure à la moyenne régionale prévoit près de 5% d'émissions de GES en moins comparé au scénario tendanciel.

Une deuxième approche envisage une réorganisation de la structure du territoire dans son ensemble à travers une meilleure adéquation entre localisation de la population et des emplois. Quatre modèles de villes sont envisagés sur base du croisement des axes concentration *versus* déconcentration des lieux de résidence et d'emploi: ville métropole, ville diffuse, ville compacte et ville polycentrique. En termes d'émissions par travailleur et par trajet, on remarque que la structure héritée du territoire a un poids non négligeable. Malgré une remobilisation des habitants et de l'emploi pouvant atteindre près de 50 % du total des effectifs attendus en 2040 dans le cas de la ville diffuse, la tendance générale des émissions par travailleur reste quasi inchangée : les bonnes performances s'observent toujours dans les milieux historiquement denses, au détriment des zones périphériques et rurales.

Cependant, en termes d'émissions totales, les différents scénarii de configuration territoriale étudiées laissent apparaître des impacts différenciés sur les émissions de GES. Les scénarii de la ville métropole et de la ville diffuse engendrent de fortes augmentations des émissions pour la majorité des anciennes communes wallonnes. Les scénarii de la ville compacte et de la ville polycentrique mettent en évidence de nombreuses diminutions des émissions sur une part importante du territoire.

À l'échelle de la région, le scénario de la ville diffuse est le plus émetteur. Les émissions de GES des déplacements domicile-travail augmentent de 35 % entre 2001 et 2040. À l'opposé, le scénario de la ville compacte accuse la plus faible augmentation de GES : 17,1 %. Ce scénario est suivi de près par celui de la ville polycentrique : 18,9 % d'émissions de GES supplémentaires à l'horizon 2040.

La ville diffuse est la plus émettrice car le scénario prévoit qu'une part importante de la population des pôles primaires et secondaires migre dans les zones périurbaines et rurales. Bien que cette migration soit couplée avec une délocalisation de l'emploi, le ratio population/emploi des zones d'accueil reste malgré tout plus faible que dans les zones d'origine, ce qui a pour conséquence d'augmenter très fortement les émissions totales. La ville métropole présente des émissions supérieures au scénario de référence car le scénario envisage une centralisation de l'emploi dans les pôles primaires du territoire, couplée à une décentralisation de l'habitat à l'échelle régionale. Cela se traduit par une augmentation des émissions quasi généralisée sur l'ensemble du territoire.

La ville polycentrique est moins émettrice que le scénario de référence suite à un renforcement des pôles primaires et secondaires du territoire et une meilleure adéquation entre localisation des emplois et de l'habitat. Cela se traduit spatialement par un maillage de pôles suffisamment dense permettant de limiter les déplacements domicile-travail et donc les émissions de GES. La ville compacte est le modèle de ville le moins émetteur de par la centralisation des lieux de résidence et d'emploi dans les pôles primaires et leur périphérie, ainsi que dans certains pôles secondaires, ce qui offre à la majeure partie des travailleurs des opportunités d'emplois dans un rayon ne dépassant pas les 25 km.

Dans le cas du scénario de la ville compacte, l'application de telles densités impliquerait une réorganisation profonde de la structure du territoire assez contraignante étant donné qu'il suppose la limitation de tout développement en dehors des grands pôles d'emplois actuels. Par contre, le scénario de la ville polycentrique semble offrir un meilleur compromis car il se base essentiellement sur un renforcement accru des pôles secondaires, bien répartis sur l'ensemble du territoire (un pôle tous les 10 à 20 km).

Notons que ces scénarios supposent implicitement une augmentation de la mobilité résidentielle et une meilleure adéquation entre localisation des emplois et des actifs aptes à occuper ces emplois. Par ailleurs, ils n'intègrent pas certaines évolutions prévisibles susceptibles d'impacter les consommations et les émissions, telles que l'évolution des émissions spécifiques des modes de transports et des parts modales et les contraintes urbanistiques (disponibilités au plan de secteur).

Finalement, cette recherche démontre qu'une réduction de émissions de GES est envisageable dans les domaines de la mobilité et du bâti. La Wallonie est de fait caractérisée par une forte périurbanisation combinée à un très faible recyclage du stock bâti. Ces caractéristiques structurelles du territoire imposent aujourd'hui de formuler des réponses adaptées à différents types d'urbanisation. En outre, il apparaît que les émissions de GES liées au transport et au bâti ne peuvent être interprétées ni *a fortiori* infléchies sans une réflexion de nature territoriale.

## 7. DIFFUSION DES RÉSULTATS ET COMMUNICATIONS

### 7.1 ARTICLES DANS DES REVUES

Structuration du territoire pour répondre aux objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre. DUJARDIN Sébastien, LABEEUW France-Laure, MELIN Eric, PIRART François, TELLER Jacques. *Territoire(s) wallon(s)*, 2011, CPDT, 6, 43-57.

Home-to-work commuting, urban form and potential energy savings: a local scale approach to regional statistics. Dujardin Sébastien, Pirart François, Brévers Florence, Marique Anne-Françoise, Jacques Teller. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. *En cours*.

### 7.2 ACTES DE COLLOQUES

Structuration du territoire pour répondre aux objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre. Dujardin Sébastien, Labeeuw France-Laure, Melin Eric, Pirart François, Teller Jacques. *La dimension territoriale des politiques énergétiques et de réduction des GES*, 2010, CPDT, Liège, 33-50.

Morphologie urbaine et consommation énergétique du bâti résidentiel pour répondre aux objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre. LABEEUW France-Laure, DUJARDIN Sébastien, LAMBOTTE Jean-Marc, TELLER Jacques. *Proceedings of the Eighteenth International Seminar on Urban Morphology and the Post-Carbon City*, 2011, Concordia University, Montréal, Canada, 13.

Home-to-work commuting, spatial structure and energy consumption: A comparative analysis of Wallonia and Flanders, Belgium. Dujardin Sébastien, Boussauw Kobe, Brévers Florence, Lambotte Jean-Marc, Teller Jacques, Witlox Frank. *BIVÉC-GIBET Transport Research Day 2011*, 2011, FUNDP, Namur, 97-110.

Reducing energy consumption through urban planning: What role can geography play? Dujardin Sébastien, Labeeuw France-Laure, Melin Eric, Pirart François, Teller Jacques 2010, Zagreb, Croatie (Hrvatska), 5/11/2010. Communication orale.

Journée d'étude COSW et mesures de densité pour l'évaluation de l'impact de la structure du territoire wallon sur les émissions de GES. Dujardin Sébastien, Labeeuw France-Laure, Melin Eric, Pirart François, Teller Jacques. 2010, Gembloux, Agro-Bio Tech, Belgique, 20/10/2010. Communication orale.

### 7.3 PUBLICATIONS DE VULGARISATION

Structurer le territoire pour réduire les émissions de gaz à effet de serre DUJARDIN Sébastien, LABEEUW France-Laure, MELIN Eric, PIRART François, TELLER Jacques. *Lettre de la CPDT*, 2010, CPDT, Namur, 25, 6-7.

Structuration du territoire et réduction des GES: Le cas des déplacements domicile-travail en Wallonie. DUJARDIN Sébastien, LABEEUW France-Laure, MELIN Eric, PIRART François, TELLER Jacques. *Poster pour le colloque CPDT - La dimension territoriale des politiques énergétiques et de réduction des GES*, 2010, CPDT, Namur, 1.

Politique foncière - Structuration du territoire pour réduire les GES. DUJARDIN Sébastien, BRÉVERS Florence, LAMBOTTE Jean-Marc, TELLER Jacques. *Lettre de la CPDT*, 2011, CPDT, Namur, 25, 6-7.

## 8. RÉFÉRENCES

### 8.1 RAPPORTS DE SUBVENTION CPDT

CPDT (2010). *Les effets du « pic pétrolier » sur le territoire*. Rapport final de subvention (2009-2010). Thème 2A, octobre 2010

CPDT (2010). *Expertise veille – Etat du territoire wallon*. Rapport final de subvention (2009-2010), octobre 2010

### 8.2 BIBLIOGRAPHIE

BOUSSAUW, K., NEUTENS, T. AND WITLOX, F. Minimum commuting distance as a spatial characteristic in a non-monocentric urban system : The case of Flanders. *Papers in Regional Science*, 2011 2011, vol. 90, no. 1, p. 47-65.

BOUSSAUW, K. AND WITLOX, F. Introducing a commute-energy performance index for Flanders. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2009, vol. 43, no. 5, p. 580-591.

DUJARDIN, S., BOUSSAUW, K., BRÉVERS, F., LAMBOTTE, J.-M., TELLER, J. AND WITLOX, F. 2011. Home-to-work commuting, spatial structure and energy consumption: A comparative analysis of Wallonia and Flanders, Belgium. In *Proceedings of the BIVEC-GIBET Transport Research Day 2011*, FUNDP, Namur, 25-05-2011 2011, E. CORNELIS Ed. University Press BVBA, Zelzate, 97-110.

EWING, R. AND CERVERO, R. Travel and the built environment. A synthesis. *Transportation Research Record*, 2001, vol. 1780, p. 87-113.

HALLEUX, J.M. Structuration spatiale des marchés fonciers et production de l'urbanisation morphologique. Application à la Belgique et à ses nouveaux espaces résidentiels. In *Geographie*. Liège: Université de Liège, 2005, vol. Docteur en Sciences.

LE GALLO, J. Econométrie spatiale - L'autocorrélation spatiale dans les modèles de régressions linéaires. *Economie et Prévision*, 2002, vol. 155, no. 4, p. 139-158.

MAIZIA, M., HOUDANT, N., JOLITON, D., RIMMEL, L., MENARD, R., BERGE, S., TELLER, J., VIEJO GARCIA, P., LACOSTE, G. AND LEROLLES, H. Les gisements du développement urbain: Analyse quantitative à l'horizon 2050 des consommations énergétiques et des émissions de CO2 des tissus urbains. In. Compiègne: Université de Technologie de Compiègne, 2008, p. 183.

POUYANNE, G. Forme urbaine et mobilité quotidienne. In *Droit, sciences sociales et politiques; Sciences économiques et de gestion*. Bordeaux: Université Montesquieu - Bordeaux IV, 2004, vol. Sciences Economiques, p. 325.

STEAD, D. Relationships between land use, socioeconomic factors, and travel patterns in Britain. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 2001, vol. 28, p. 499-528.

VAN ACKER, V. Spatial and social variations in travel behaviour: Incorporating lifestyles and attitudes into travel behaviour-land use interaction research. In *Géography*. Ghent: Ghent University, 2010.

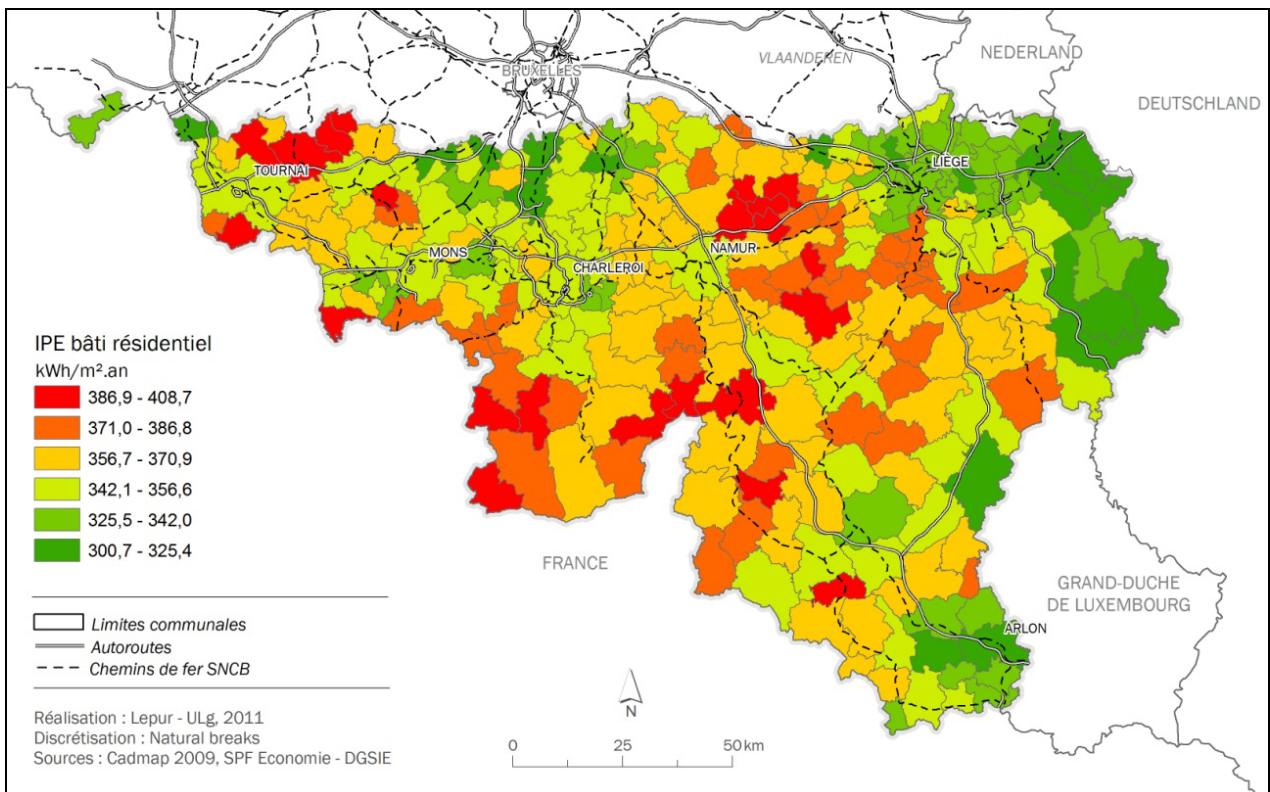
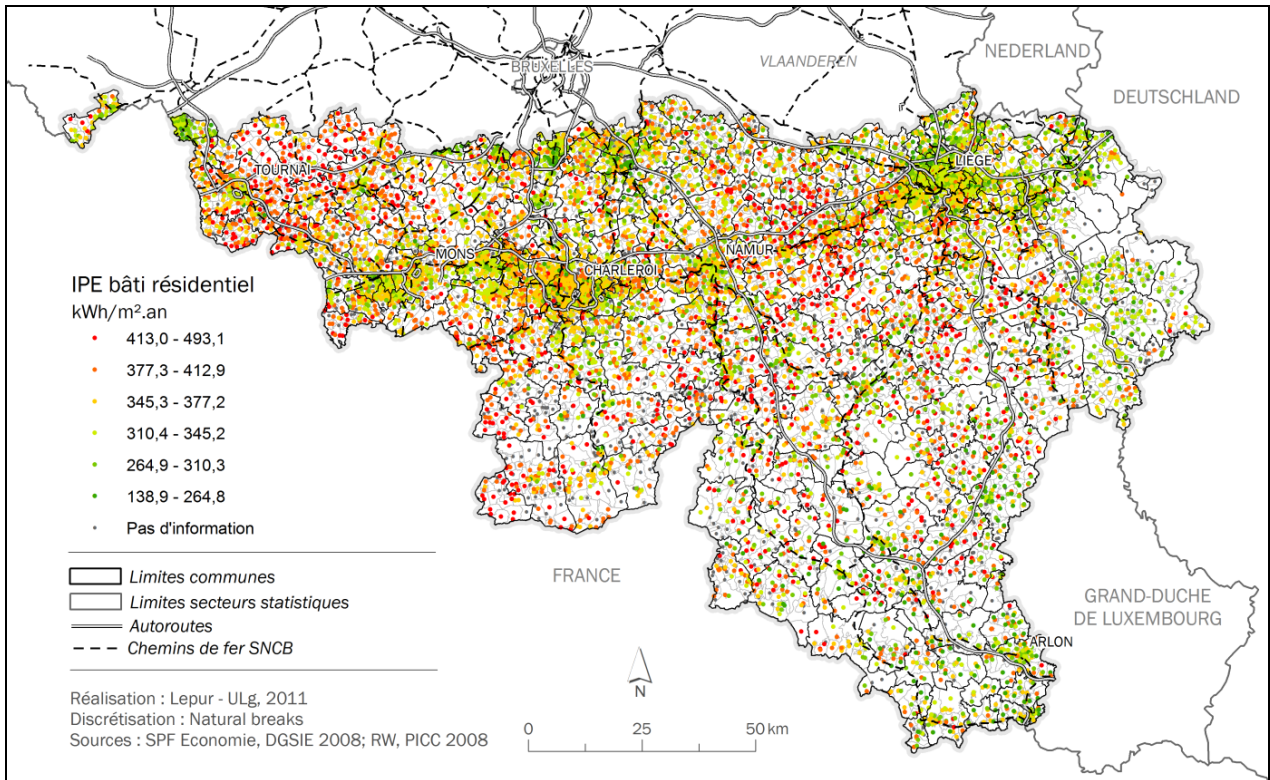
VAN ACKER, V. AND WITLOX, F. Car ownership as a mediating variable in car travel behaviour research using a structural equation modelling approach to identify its dual relationship. *Journal of Transport Geography*, 2010, vol. 18, p. 65-74.

VAN HECKE, E. Actualisation de la hiérarchie urbaine de Belgique. *Bulletin du Crédit Communal*, 1998, vol. 3, no. 205, p. 45-76.

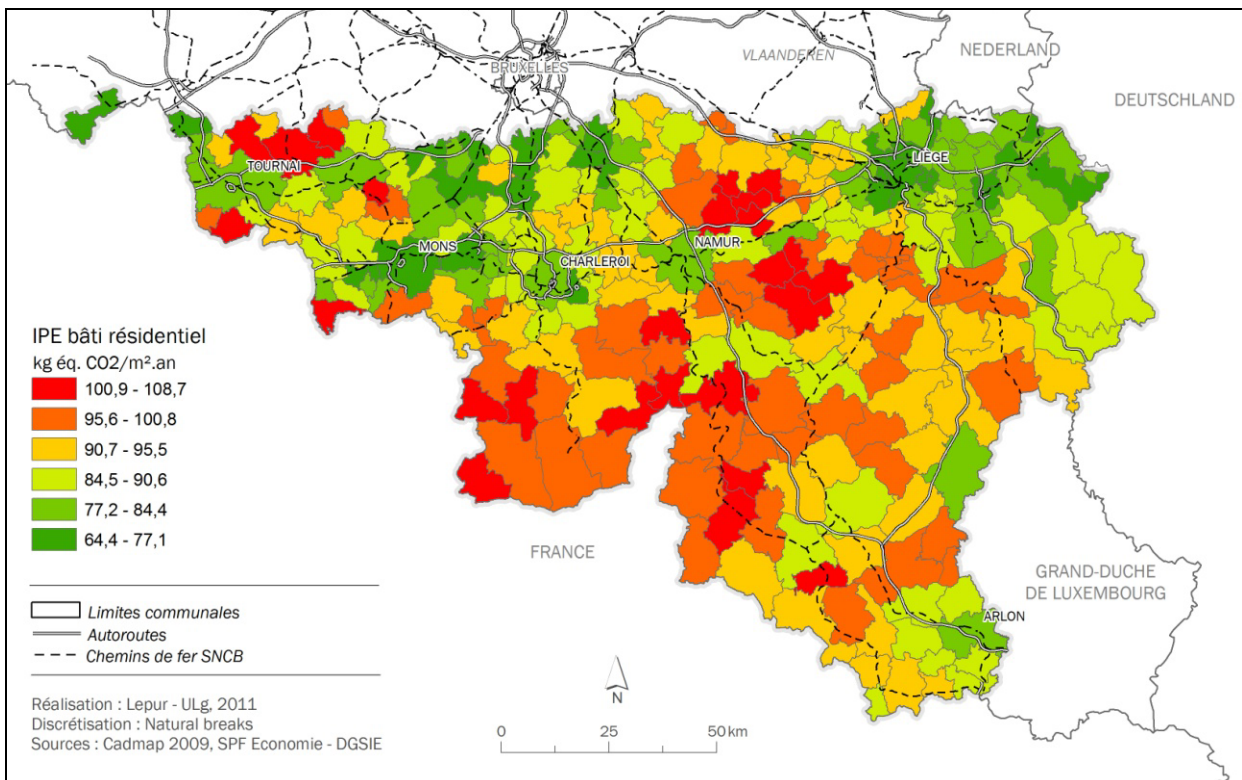
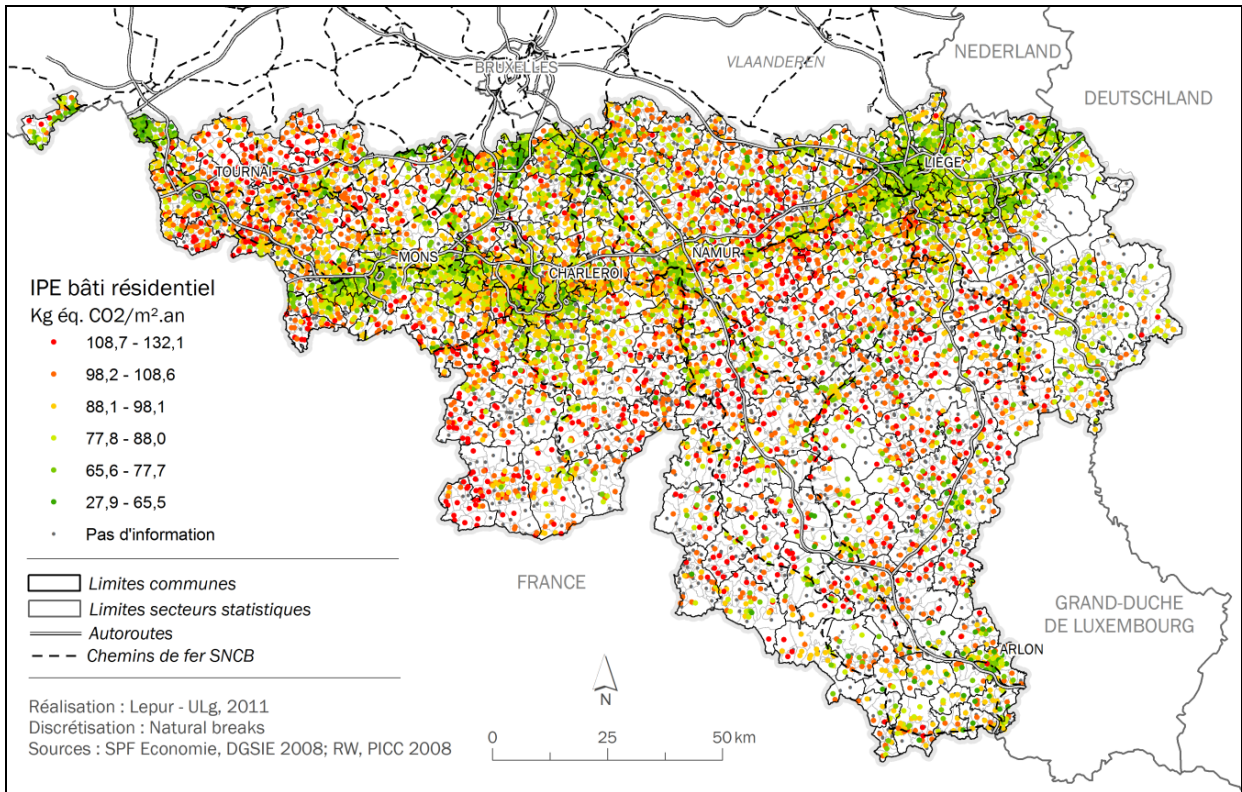


## **9. ANNEXES**

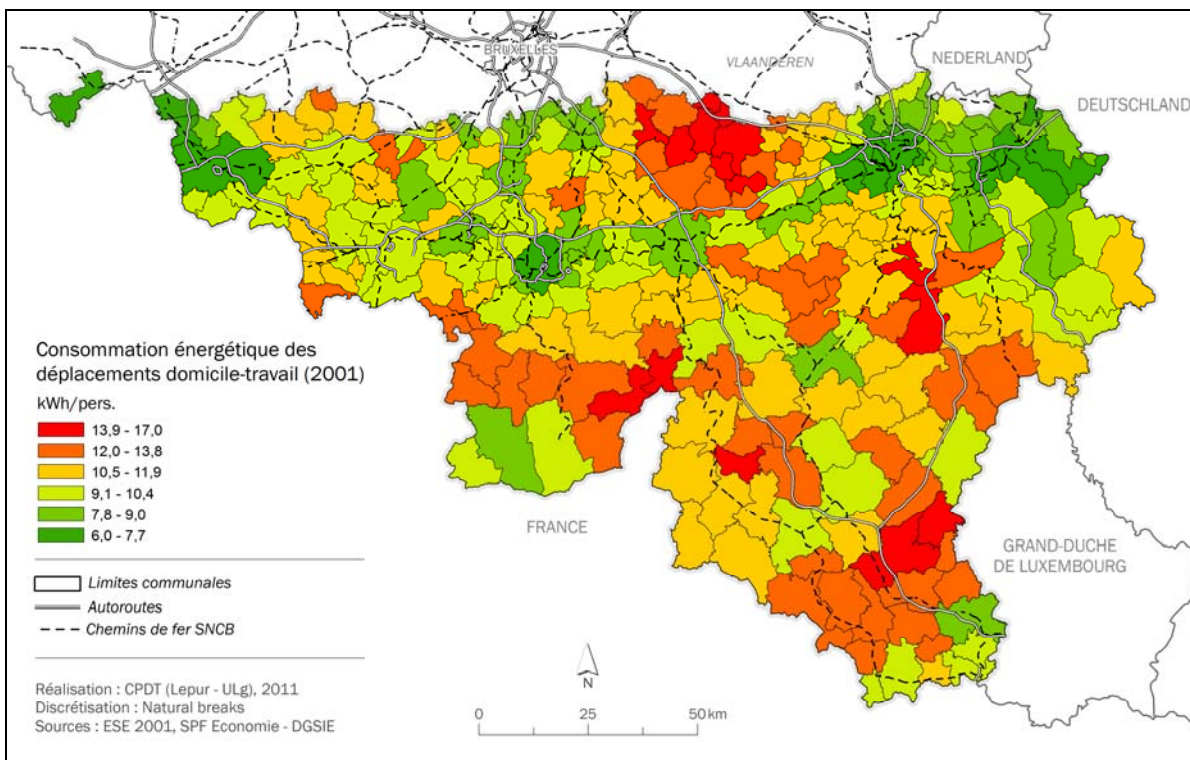
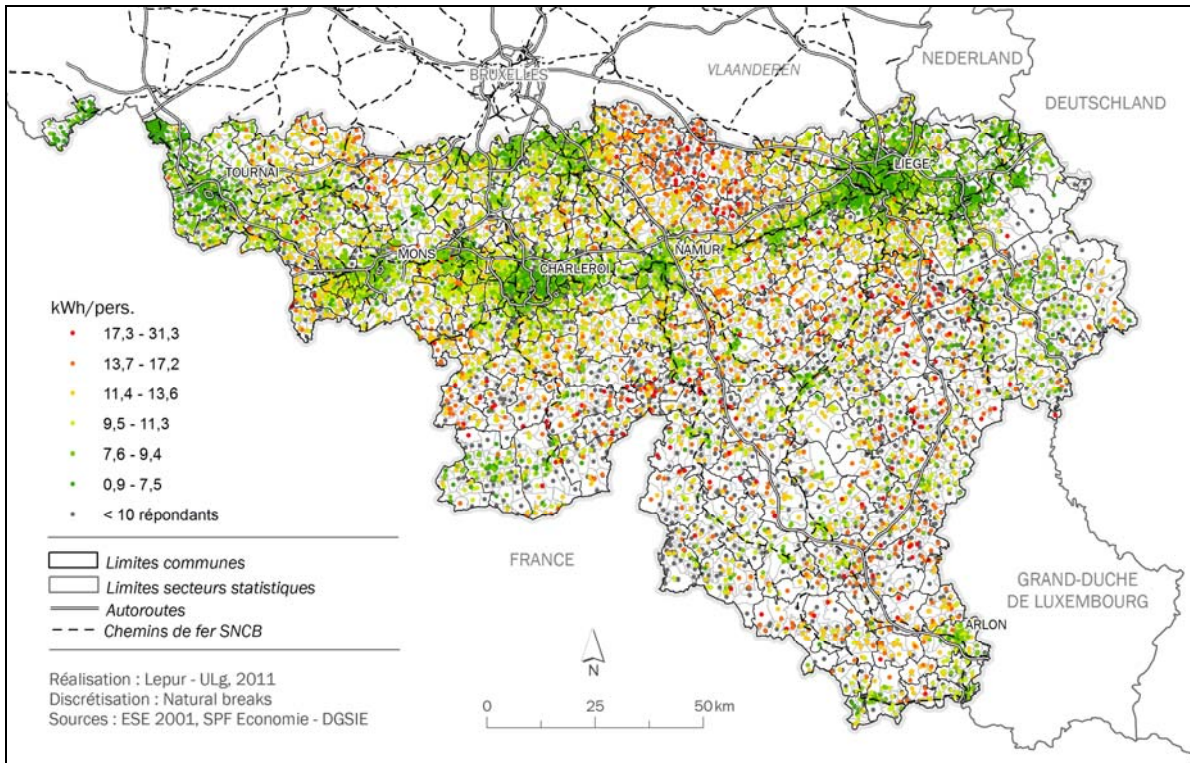
### 9.1 ANNEXE - CONSOMMATION ÉNERGÉTIQUE DU BÂTI RÉSIDENTIEL EN WALLONIE PAR SECTEUR STATISTIQUE ET PAR COMMUNE (2009)



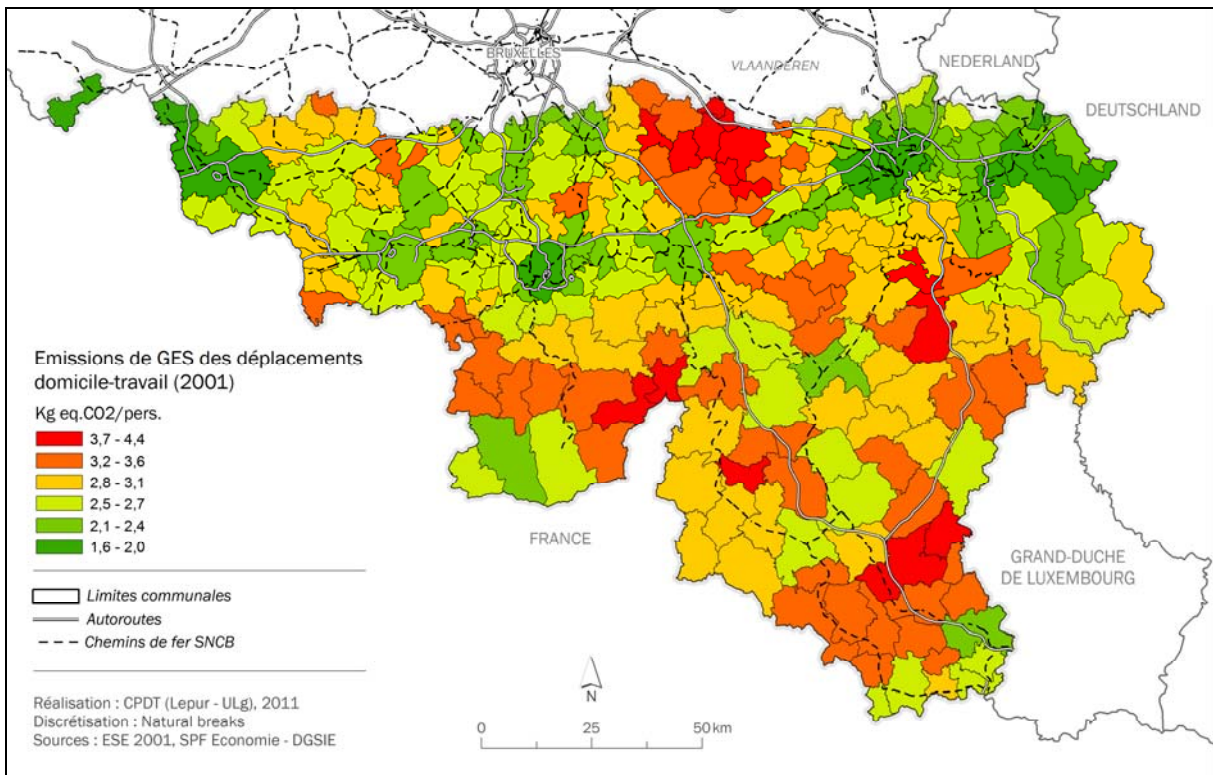
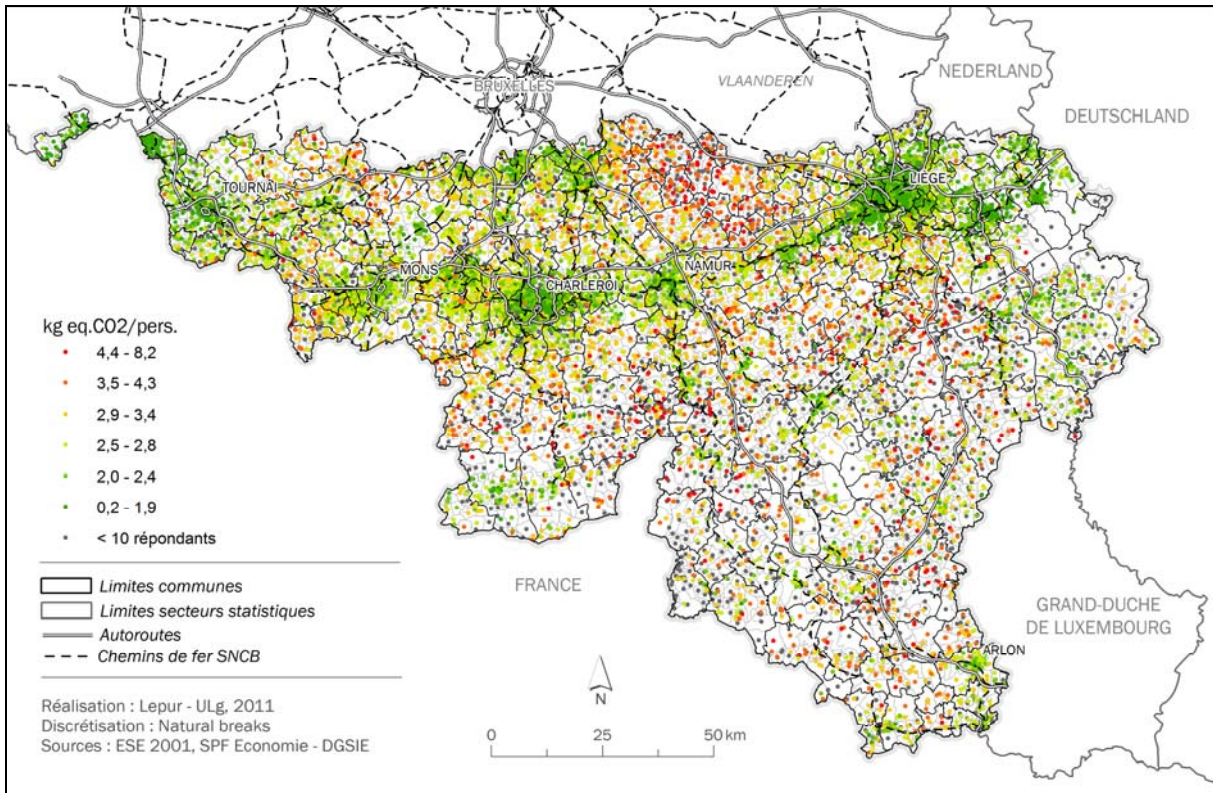
## 9.2 ANNEXE - ÉMISSIONS DE GES DU BATI RESIDENTIEL EN WALLONIE PAR SECTEUR STATISTIQUE ET PAR COMMUNE (2009)



### 9.3 ANNEXE - CONSOMMATION ENERGETIQUE DES DEPLACEMENTS DOMICILE-TRAVAIL EN WALLONIE PAR SECTEUR STATISTIQUE ET PAR COMMUNE (2001)

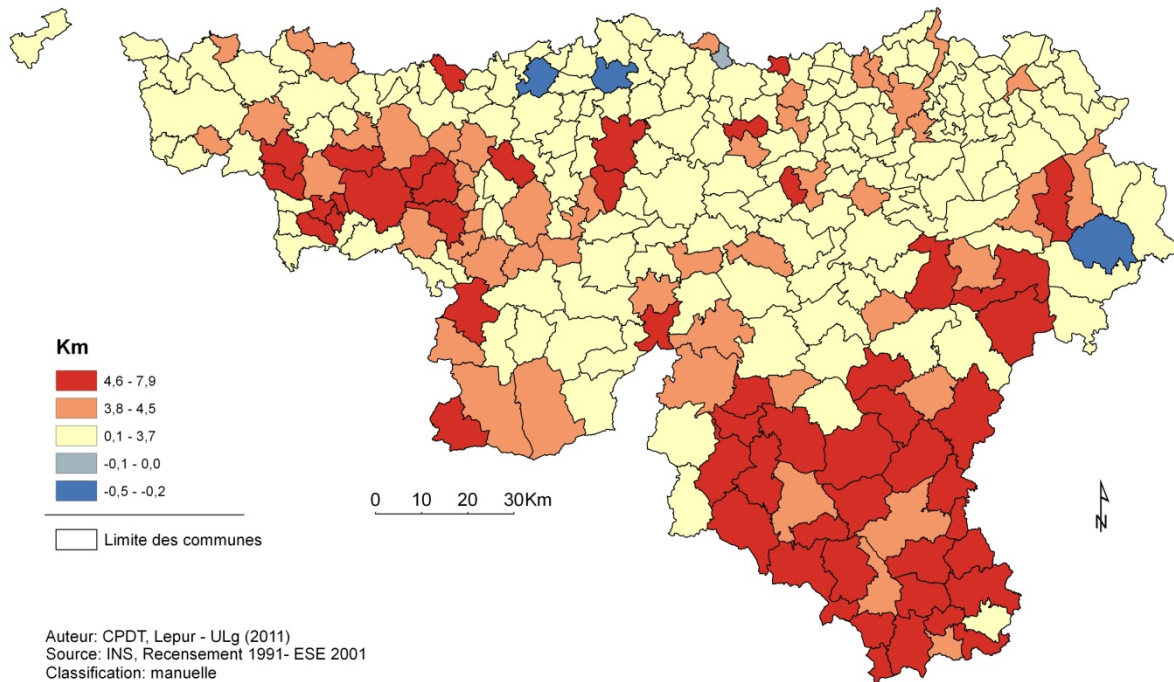


### 9.4 ANNEXE - EMISSIONS DE GES MOYENNES DES DÉPLACEMENTS DOMICILE-TRAVAIL EN WALLONIE PAR SECTEUR STATISTIQUE ET PAR COMMUNE (2001)

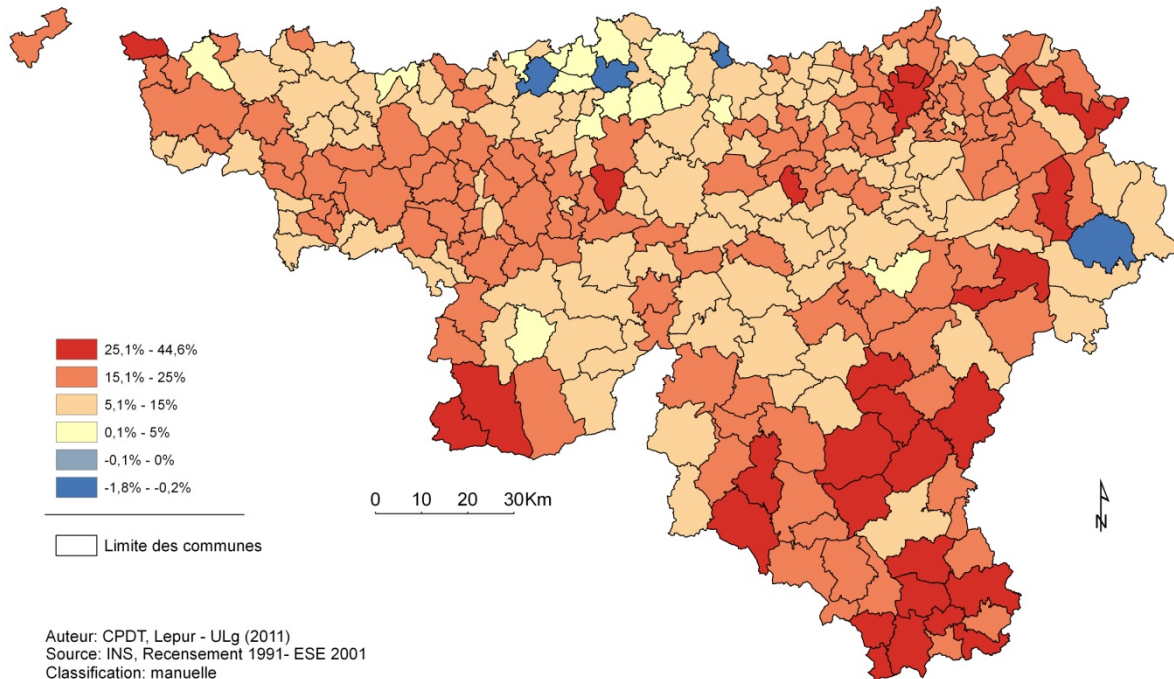


## 9.5 ANNEXE - ÉVOLUTION DES DISTANCES MOYENNES DES DÉPLACEMENTS DOMICILE-TRAVAIL EN WALLONIE ENTRE 1991 ET 2001 PAR COMMUNE

Evolution 1991-2001 des distances moyennes parcourues pour les déplacements domicile-travail en Wallonie par commune



Evolution 1991-2001 des distances moyennes parcourues pour les déplacements domicile-travail en Wallonie par commune (exprimé en pourcentage)



## 9.6 ANNEXE – RÉSULTATS DES TESTS DE KOLMOGOROV-SMIRNOV

### Tests de normalité (Kolmogorov-Smirnov) et transformations sur les variables

Variable	Assym.	Kurtosis	Avant transformation		Après transformation		Type de transformation
			Stat.	Sig.	Stat.	Sig.	
IPE_CO2	0,529	0,310	,039	,000	0,022	0,093	LOG <sub>10</sub> (VAR)
Part_VP	-0,982	1,958	,072	,000	0,035	0,000	LOG <sub>10</sub> (100-VAR)
MOY_KM	0,478	0,284	,037	,000	0,030	0,004	LOG <sub>10</sub> (VAR)
AGE_MOY	0,113	0,377	,031	,002	0,023	0,062	LOG <sub>10</sub> (VAR)
VP_LGMT	-0,292	0,154	,042	,000	-	-	-
COUPLE_ENF	0,078	0,550	,034	,000	0,030	0,005	LOG <sub>10</sub> (VAR)
TM_MOY	-0,289	0,618	,035	,000	-	-	-
NIV_EDU	0,594	0,538	,052	,000	0,025	0,037	LOG <sub>10</sub> (VAR)
REV_MOY	0,897	1,691	,065	,000	0,031	0,002	LOG <sub>10</sub> (VAR)
DENS_POP	4,509	27,439	,299	,000	0,054	0,000	LOG <sub>10</sub> (VAR)
EMPL_10KM	4,732	43,466	,204	,000	0,065	0,000	LOG <sub>10</sub> (VAR)
MIXITE_URBA	1,963	3,612	,059	,000	0,015	0,200	LOG <sub>10</sub> (VAR)
ACCESS_BUS	0,754	0,829	,276	,000	0,034	0,000	LOG <sub>10</sub> (VAR)
ACCESS_TRAIN	6,459	67,411	,175	,000	0,051	0,000	LOG <sub>10</sub> (VAR)
DENS_ROUTES	3,526	22,591	,151	,000	0,045	0,000	LOG <sub>10</sub> (VAR)
N = 1471							

## 9.7 ANNEXE - LISTE DES VARIABLES INTERVENANT DANS LES MODÈLES

### I. Structure territoriale

#### Organisation du milieu bâti

- Hiérarchie des villes et des communes
- Densité de population brute
- Taux d'urbanisation (Superficie urbanisée par secteur statistique)
- Densité de population nette
- Proximité de l'emploi
- Densité d'activité humaine nette (population + emploi / superficie urbanisée)
- Mixité des fonctions
- Ratio emploi/population
- Densité de logement nette
- Volume habitable des zones urbanisées
- Taux de mitoyenneté
- Age des bâtiments et caractérisation de l'hétérogénéité
- Surface du parc de logement

#### Infrastructure de mobilité

- Accessibilité au réseau routier
- Accessibilité au réseau de bus
- Accessibilité à une gare
- Densité du réseau routier
- Distance au réseau routier principal

#### Localisation des activités

- Mixité des fonctions
- Taux emplois/habitants
- Accessibilité aux services de proximité

### II. Caractéristiques socio-économiques

#### Caractéristiques individuelles

- Age
- Niveau d'éducation
- Niveau socioprofessionnel
- Revenus
- Statut (ouvrier, employé, cadre, etc.)

#### Ménages

- Taille du ménage
- Composition du noyau familial
- Nombre de voiture personnelle par logement

### III. Performances environnementales

#### Transport

- Moyenne du nombre de grammes de CO<sub>2</sub> émis / véhicule, kilomètre

#### Stock bâti résidentiel

- Age des bâtiments
- Caractérisation des performances des éléments constructifs (vitrage, mur, toiture)
- Taux de mitoyenneté (2F, 3F, 4F)
- Types (individuel, collectif)
- Hauteur des bâtiments
- Emprise au sol
- Système de chauffage

### IV. Comportements

#### Mobilité

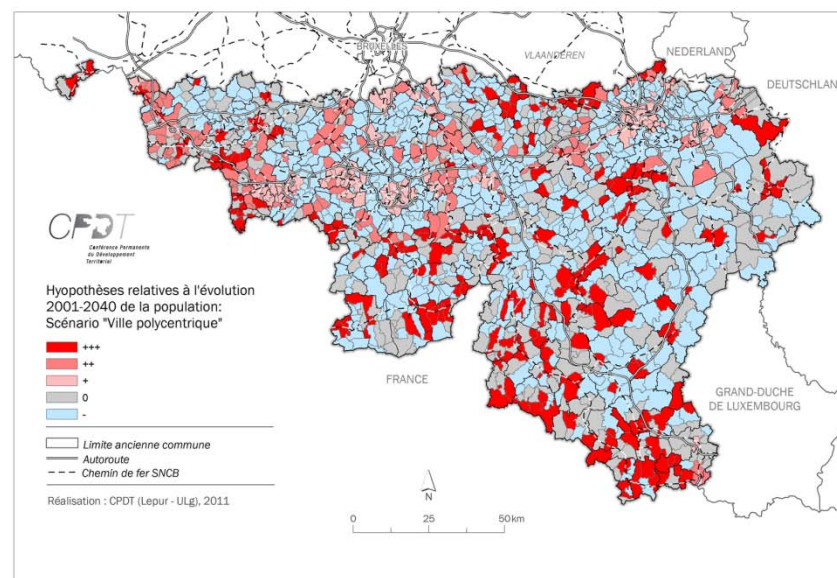
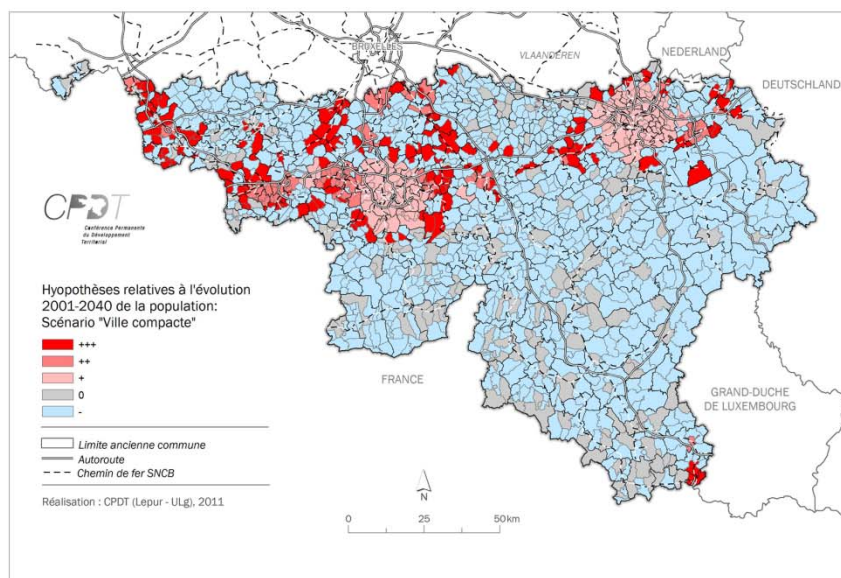
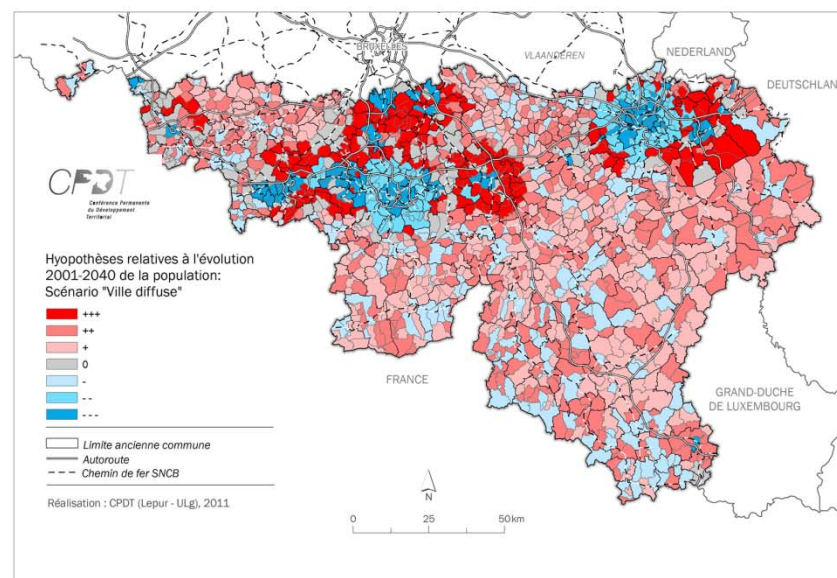
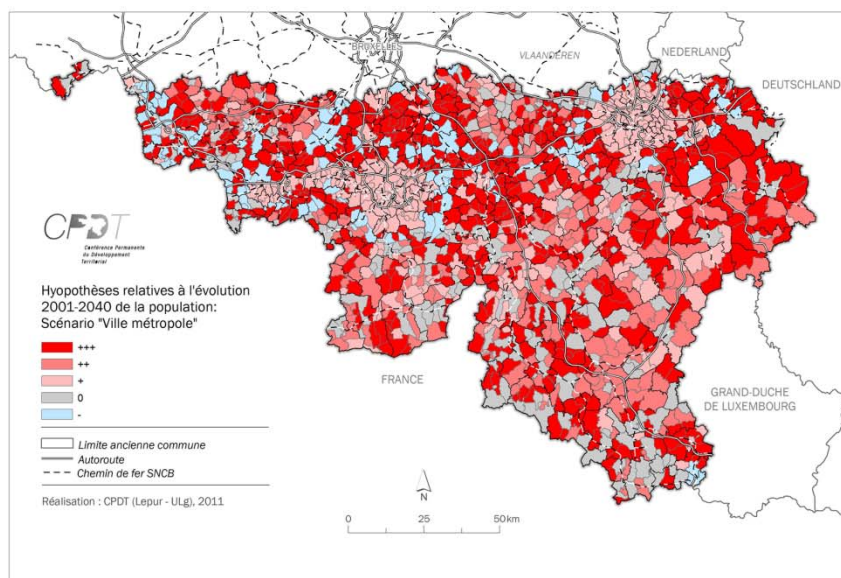
- Distances domicile-travail
- Fréquence et motif de déplacement
- Choix modaux
- Taux d'occupation des véhicules

#### Résidentiels

- Mode d'occupation du bâtiment (durée et température de consigne)



### 9.8 ANNEXE - CARTOGRAPHIE DES HYPOTHESES SUR L'EVOLUTION 2001-2040 DE LA POPULATION



## 9.9 ANNEXE - CARTOGRAPHIE DES HYPOTHESES SUR L'EVOLUTION 2001-2040 DE L'EMPLOI

