

THEME 2B

Structuration du territoire pour répondre aux objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre

SUBVENTION 2009-2010

Octobre 2010

RAPPORT FINAL



Pilote : Jacques TELLER, Lepur-ULg

Chercheurs Lepur-ULg :

Sébastien DUJARDIN, France-Laure LABEEUW, Eric MELIN, François PIRART

TABLE DES MATIÈRES

1. CONTEXTE, DONNÉES DE CADRAGE ET ENJEUX.....	4
1.1 LES ÉMISSIONS DE GES ET LE CLIMAT	4
1.1.1 <i>L'effet de serre et les émissions anthropiques.....</i>	4
1.1.2 <i>Les changements climatiques et ses conséquences.....</i>	5
1.2 CONTEXTE INTERNATIONAL ET EUROPÉEN	5
1.2.1 <i>Contexte international.....</i>	5
1.2.2 <i>Contexte européen.....</i>	6
1.3 CONTEXTE BELGE ET WALLON.....	8
1.3.1 <i>Contexte belge.....</i>	8
1.3.2 <i>Contexte wallon.....</i>	9
1.3.3 <i>Evolution sectorielle des émissions wallonnes.....</i>	11
2. INVENTAIRE ET CALCUL DES ÉMISSIONS DE GES.....	13
2.1 LES PRINCIPES GÉNÉRAUX DE CALCUL DES ÉMISSIONS	13
2.2 LES DIFFÉRENTES APPROCHES D'INVENTAIRES TERRITORIAUX DES ÉMISSIONS DE GES	13
2.2.1 <i>Les méthodes standardisées.....</i>	13
2.2.2 <i>Les principales approches d'inventaires des émissions.....</i>	14
2.3 CALCUL DES ÉMISSIONS SPÉCIFIQUES	15
2.3.1 <i>Calculs des émissions spécifiques pour le transport de personnes.....</i>	15
2.3.2 <i>Calculs des émissions pour le secteur résidentiel.....</i>	18
2.3.3 <i>Limites et incertitudes.....</i>	20
3. ÉMISSIONS DE CO₂ ET CONSOMMATIONS ÉNERGÉTIQUES LIÉES AUX DÉPLACEMENTS DOMICILE-TRAVAIL	22
3.1 CADASTRE DES ÉMISSIONS DE GES LIÉES AUX DÉPLACEMENTS DOMICILE-TRAVAIL EN WALLONIE 22	
3.1.1 <i>Calcul d'un indice de performance environnementale des déplacements domicile-travail.....</i>	22
3.1.2 <i>Cartographie.....</i>	27
3.1.3 <i>Commentaire des résultats.....</i>	30
3.1.4 <i>Evolution 1991 – 2001.....</i>	33
3.1.5 <i>Consommations et émissions globales.....</i>	41
3.1.6 <i>Synthèse.....</i>	43
3.2 VILLE COMPACTE ET GAINS ÉNERGÉTIQUES POTENTIELS : UNE POLITIQUE D'AMÉNAGEMENT RÉALISTE ?.....	44
3.2.1 <i>Introduction et objectifs.....</i>	44
3.2.2 <i>Evaluation ex-post des émissions de GES.....</i>	45
3.2.2.1 <i>Analyse « évolution constante ».....</i>	45
3.2.2.2 <i>Analyse « taux le plus faible ».....</i>	52
3.2.3 <i>Synthèse.....</i>	59
4. ÉMISSIONS DE CO₂ ET CONSOMMATIONS ÉNERGÉTIQUES LIÉES AU STOCK BÂTI RÉSIDENTIEL.....	60
4.1 MÉTHODOLOGIE GÉNÉRALE	60
4.1.1 <i>Modélisation des besoins et consommations des stocks résidentiels.....</i>	60
4.1.1.1 <i>Revue de la littérature.....</i>	60
4.1.1.2 <i>Les approches bottom-up récentes.....</i>	62
4.2 LA DATE DE CONSTRUCTION : UNE INFORMATION CLEF POUR LA MODÉLISATION DES BESOINS ÉNERGÉTIQUES DU STOCK BÂTI RÉSIDENTIEL.....	64
4.2.1 <i>Méthode de datation.....</i>	64
4.2.2 <i>Analyse de l'âge du bâti en Wallonie suivant les données cadastrales.....</i>	65
4.2.3 <i>Les archétypes constructifs.....</i>	69
4.2.3.1 <i>Hypothèses préalables.....</i>	70
4.2.3.2 <i>Composition des archétypes constructifs suivant les classes d'âges.....</i>	71
4.2.3.3 <i>Performances énergétiques des enveloppes de chaque archétype.....</i>	74
4.2.3.4 <i>Exemple de sensibilité théorique des performances énergétiques des archétypes à la rénovation.....</i>	76
4.2.3.5 <i>La fragilité des données sources pour une connaissance fine des caractéristiques techniques du stock bâti</i>	77

4.3	MODÉLISATION DU PARC DE LOGEMENTS ET DE BÂTIMENTS	81
4.3.1	<i>Les dynamiques démographiques et l'évolution des ménages</i>	81
4.3.1.1	Population.....	81
4.3.1.2	Évolution du nombre de ménages.....	81
4.3.2	<i>Les mouvements dans le parc</i>	82
4.3.2.1	Le taux de renouvellement du parc de logements	82
4.3.2.2	Le taux de croissance du parc de logements et de bâtiments	82
4.3.2.3	Hypothèses de la part du stock des bâtiments existants en 2009 dans le stock projeté en 2050	83
4.3.3	<i>Morphologie du tissu bâti en région wallonne</i>	84
4.3.3.1	Analyse des typologies suivant un échantillon du stock par classe d'âge de construction.....	84
4.3.3.2	Analyse de la mitoyenneté sur l'ensemble du stock bâti par classe d'âge de construction	85
4.3.3.3	Estimation des hauteurs des bâtiments sur base du PICC.....	88
4.3.4	<i>La Surface chauffée du parc : une information clef pour la modélisation des besoins énergétiques du stock bâti résidentiel</i>	88
4.3.4.1	Analyse des données INS	89
4.3.4.2	Calcul de la superficie chauffée (Ach) en 2008 sur base PICC	90
4.4	CADASTRE DES ÉMISSIONS DE GES DANS LE STOCK BÂTI RÉSIDENTIEL	92
4.4.1	<i>Données de cadrage sur la consommation énergétique</i>	92
4.4.2	<i>Emissions de GES et consommation finale totale et l'indice de performance énergétique du stock bâti</i> 96	
4.4.2.1	Méthodologie	97
4.4.2.2	Principaux résultats	100
5.	LIENS ENTRE STRUCTURE TERRITORIALE ET CONSOMMATIONS ÉNERGÉTIQUES	104
5.1	INTRODUCTION	104
5.2	DÉMARCHE DE LA RECHERCHE ET CHOIX DES VARIABLES.....	104
5.2.1	<i>Modèle d'analyse</i>	104
5.2.2	<i>Liste complète des variables intervenant dans le modèle</i>	105
5.3	CONSTRUCTION DES VARIABLES.....	106
5.3.1	<i>La densité</i>	106
5.3.1.1	Différence entre densité nette et densité brute	106
5.3.1.2	Mesure de la surface urbanisée en Région Wallonne	107
5.3.1.3	Densité de population	109
5.3.1.4	Densité de logements et de bâtiments.....	112
5.3.2	<i>La densité d'emploi et la densité d'activité humaine nette</i>	114
5.3.3	<i>La mixité</i>	115
5.3.3.1	Équilibre emplois-résidents	116
5.3.3.2	La diversité sectorielle (mixité fonctionnelle)	116
5.3.4	<i>Accessibilité aux transports en commun</i>	119
5.3.4.1	Bus	120
5.3.4.2	Trains.....	120
5.3.5	<i>Le réseau routier</i>	122
5.3.5.1	Densité du réseau routier	122
5.3.5.2	Distance aux routes principales	123
5.3.6	<i>Les variables socio-économiques</i>	124
5.4	CORRELATIONS ET ANALYSES DE REGRESSION	125
5.4.1	<i>Corrélations bivariées</i>	125
5.4.1.1	Corrélation entre densité et mobilité.....	126
5.4.1.2	Corrélation entre mixité et mobilité.....	131
5.4.1.3	Corrélation entre l'offre d'emploi et mobilité.....	135
5.4.1.4	Corrélation entre offre en bus et mobilité	137
5.4.1.5	Corrélation entre offre en train et mobilité	137
5.4.1.6	Corrélation entre infrastructures routières et mobilité	138
5.4.1.7	Corrélation entre variables socio-économiques et mobilité	139
5.4.1.8	Corrélation entre variables territoriales et les consommations du bâti.....	142
5.4.1.9	Corrélation entre les performances énergétiques des déplacements domicile-travail et du bâti	144
5.5	LEVIERS DE L'AMENAGEMENT DU TERRITOIRE POUR LA REDUCTION DES EMISSIONS DE GES EN WALLONIE	145
6.	LISTE DES ENTRETIENS RÉALISÉS	147
7.	RÉFÉRENCES.....	147
7.1	RAPPORTS DE SUBVENTION CPDT	147

7.2	BIBLIOGRAPHIE	147
7.3	WEBOGRAPHIE.....	151
8.	ANNEXE I: HIÉRARCHIE DES COMMUNES WALLONNES SELON VAN HECKE (1998)	152
9.	ANNEXEII: LE LOGICIEL COPERT.....	155
10.	ANNEXE III: FICHES BIBLIOGRAPHIQUES	156
11.	ANNEXE IV: LISTE DES VARIABLES SOCIO-ECONOMIQUES.....	162

1. CONTEXTE, DONNÉES DE CADRAGE ET ENJEUX

1.1 LES ÉMISSIONS DE GES ET LE CLIMAT

1.1.1 L'effet de serre et les émissions anthropiques

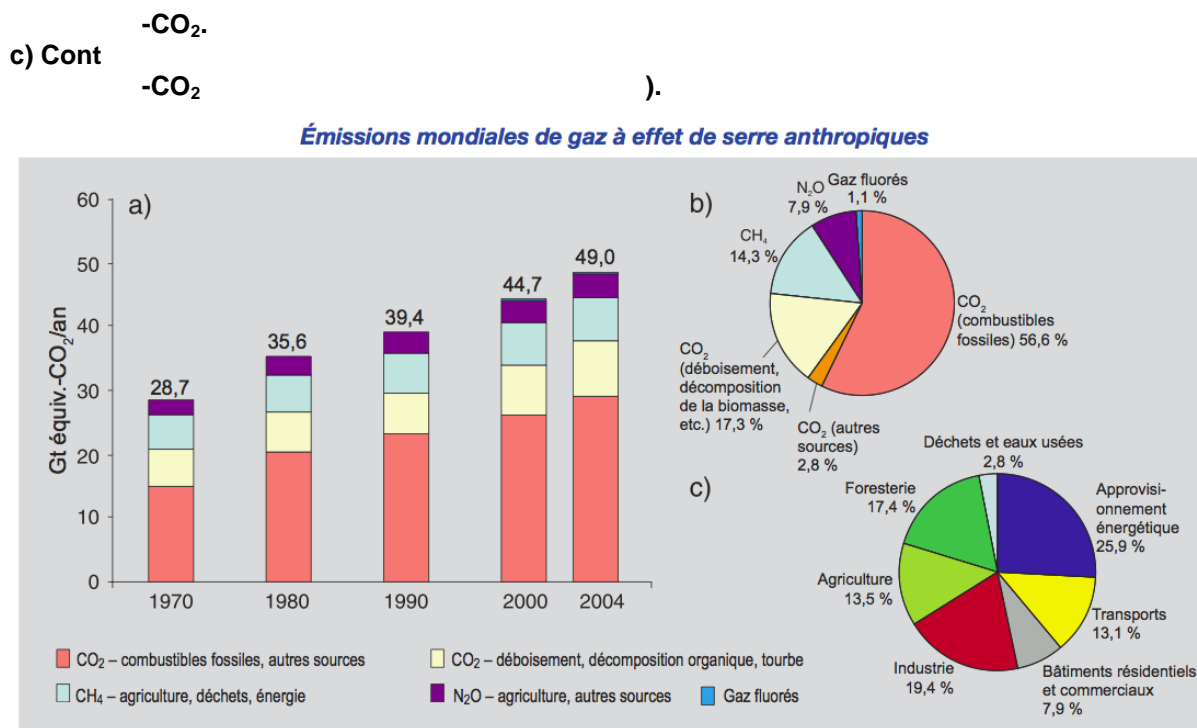
En préliminaire, il faut rappeler que l'effet de serre est un phénomène avant tout naturel qui conditionne les climats terrestres. Celui-ci permet la retenue par l'atmosphère d'une partie du rayonnement solaire et autorise ainsi des températures "globalement" acceptables par l'humanité. L'absorption du rayonnement infrarouge par l'atmosphère est essentiellement due à la vapeur d'eau, aux particules et au gaz (surtout dioxyde d'azote ou CO_2 , méthane ou CH_4 , protoxyde d'azote ou N_2O et ozone O_3). Sans ce phénomène naturel lié aux gaz à effet de serre (GES), la température moyenne sur la terre serait de -17°C au lieu de $+15^\circ\text{C}$.

La problématique soulevée provient de l'effet de serre additionnel résultant d'émissions de GES supplémentaires liées aux activités humaines. Ces émissions anthropiques ont été particulièrement amplifiées depuis le début de l'ère industrielle avec l'usage croissant de combustibles fossiles, en particulier charbon, pétrole, gaz naturel, et les transformations des écosystèmes, notamment les déforestations et les transformations des pratiques agricoles.

Les taux de CO_2 ont ainsi augmenté de plus de 36% depuis la période pré-industrielle. La concentration actuelle de CO_2 , de l'ordre de 379 ppmv (parties par million en volume) en 2005, n'avait encore jamais été atteinte au cours des 650 000 dernières années et probablement pas non plus au cours des 20 millions d'années précédentes où elle oscillait entre naturellement entre 180 et 300 ppmv (GIEC, Fourth Assessment Report, 2007; GUNS et Perrin, 2005).

Figure 1. Emissions mondiales de GES anthropiques (Source : GIEC, Fourth Assessment Report, 2007)

a) Emissions annuelles de GES anthropiques dans le monde, 1970–2004.



Ces émissions de GES anthropiques incontrôlés induisent un réchauffement climatique à l'échelle mondiale. Autrement dit, lorsque la concentration d'un GES augmente, il induit un réchauffement ou forçage radiatif positif exprimé en W/m^2 (bilan thermique du système sol-atmosphère).

Comme tous les GES à effet de serre n'ont pas les mêmes forçages radiatifs, la no

radiatifs respectifs. Elles servent notamment à exprimer les émissions de GES en poids de CO_2 -équivalent (éq. CO_2) pour permettre de sommer les émissions des différents GES (GIEC, 2001).

Tableau 1. Potentiel de Réchauffement Global (PRG) des gaz à effet de serre (Source : EEW, 2006-2007; GIEC, 2001)

Gaz à effet de serre	Durée de vie dans l'atmosphère	Potentiel de Réchauffement Global (horizon de 100 ans)
CO_2 (dioxyde de carbone)	100 – 150 ans	1
CH_4 (méthane)	12 ans	21
N_2O (protoxyde d'azote)	114 ans	310
Gaz fluorés (HFC, PFC, SF_6)	Quelques mois à 50 000 ans	500-23 900

L'émission d'équivalent- CO_2 est donc la quantité émise de dioxyde de carbone qui provoquerait le même forçage radiatif intégré dans le temps jusqu'à une date donnée qu'une quantité émise d'un gaz à effet de serre à longue durée de vie ou qu'un mélange de gaz à effet de serre. L'émission d'équivalent- CO_2 est obtenue en multipliant l'émission d'un gaz à effet de serre par son potentiel de réchauffement global (PRG) pour la période de temps considérée (GIEC, 2007).

1.1.2 Les changements climatiques et ses conséquences

Depuis 2007, le GIEC affirme avec un degré de confiance très élevé qu'en moyenne, les activités humaines menées depuis 1750 ont eu globalement un effet de réchauffement net, avec un forçage radiatif de + 1,6 [+ 0,6 à + 2,4] W/m^2 . En conséquence, l'essentiel de l'élévation de la température moyenne du globe observée depuis le milieu du XXe siècle est très probablement attribuable à la hausse des concentrations de GES anthropiques.

Dès lors, un réchauffement d'environ 0,2 °C par décennie au cours des vingt prochaines années est anticipé dans plusieurs scénarios d'émissions établis par le GIEC. Même si les concentrations de l'ensemble des GES et des aérosols avaient été maintenues au niveau de 2000, l'élévation des températures devrait se poursuivre à raison de 0,1 °C environ par décennie. Les conséquences sont une modification profonde du système climatique avec ses conséquences éventuellement désastreuses sur certaines régions du monde et secteurs d'activités vu la vitesse des modifications induites. Pour plus de détails, voir les rapports du GIEC (<http://www.ipcc.ch/>).

1.2 CONTEXTE INTERNATIONAL ET EUROPÉEN

1.2.1 Contexte international

Les recommandations et réglementations relatives à la problématique du réchauffement climatique découlent d'un certain nombre d'événements clés comme la Conférence de Rio (1992), le protocole de Kyoto (1997) et, plus récemment, l'accord de Copenhague (2009).

Les différents rapports du GIEC ont plus que largement contribué à la prise de conscience et à l'élaboration de cahiers de route de mesures pour une partie des nations. Les recommandations du GIEC pour les pays industrialisés visent une réduction des émissions de GES de 80 à 95% d'ici 2050, et de 25 à 40% d'ici 2020 (par rapport à 1990). Les pays en développement devraient quant à eux « dévier substantiellement » (de 15 à 30%) du scénario de référence « business as usual ».

Le protocole de Kyoto vise la réduction des émissions des 6 gaz à effet de serre qui sont considérés comme la cause principale du réchauffement climatique. Il prévoit notamment la réduction globale de 5,2 % des émissions de dioxyde de carbone d'ici 2012 par rapport aux émissions de 1990. Il est entré en vigueur en 2005 et sa portée va jusqu'à 2012.

La conférence de Copenhague tenue en décembre 2009 n'a pas permis de d'aboutir à un accord contraignant. Il s'agit toutefois du premier accord réellement mondial visant à réduire de 50% les émissions de gaz à effet de serre en 2050 par rapport à celles de 1990, pour ne pas dépasser une augmentation moyenne de 2 °C en 2100 par rapport à l'ère préindustrielle.

Sans accord mondial ambitieux, les espoirs sont reportés à la prochaine conférence internationale sur le climat à Mexico fin 2010.

L'UE a confirmé avant fin janvier 2010 son engagement de -20% d'émissions par rapport à 1990 (voire de 30% si les autres pays riches s'engagent à réaliser des efforts similaires). De même, les États-Unis conservent leur engagement de -17% par rapport à 2005.

1.2.2 Contexte européen

L'Union européenne Directive Emission Trading (2003) et paquet Energie-Climat (2008) : six textes législatifs pour atteindre les objectifs 3 x 20% pour 2020 : 20% de réduction GES, 20% d'économie énergétique, 20% d'énergie renouvelable, 10% pour les transports

Le « paquet Energie-Climat » a été voté le 17 décembre 2008 par le Parlement européen. Il comporte six textes législatifs¹ :

1. La directive établissant le système d'échange de quotas d'émissions de gaz à effet de serre (GES). De 2013 à 2020, les secteurs couverts par le système ETS² devront contribuer à l'objectif global par une diminution de 21 % de leurs émissions par rapport à 2005. Les droits d'émission, jusqu'à présent gratuits, seront mis aux enchères en 2013 (2020 pour les dix Etats-Membres les plus récents), avec cependant des exceptions pour certains secteurs dont ceux présentant des risques de « fuite de carbone », c'est-à-dire de délocalisation des entreprises les plus émettrices hors d'Europe.

2. La décision relative au partage de l'effort des réductions de GES hors système ETS. L'objectif à réaliser par les secteurs non concernés par le système ETS, parmi lesquels on compte les transports³, le logement, l'agriculture, etc., est une diminution de 10 % en 2020 par rapport aux émissions de 2005. Des objectifs nationaux ont été fixés : pour la Belgique, il s'agit de -15 %. Toutefois les réductions pourront être délocalisées jusqu'à 80 % moyennant l'achat de crédits extérieurs à l'UE.

¹ Source : « Le Parlement boucle le paquet changement climatique », communiqué de presse du Parlement européen du 17/12/2008, http://www.europarl.europa.eu/news/expert/infopress_page/064-44858-350-12-51-911-20081216IPR44857-15-12-2008-2008-false/default_fr.htm.

² Depuis le 1er janvier 2005, plus de 10000 grands établissements industriels européens (centrales énergétiques, raffineries, usines de production de ciment, verre, chaux, céramique, papier...) sont autorisés à acheter et à vendre des "droits à polluer" - plus précisément, à émettre des gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Ce système, reposant sur la Directive ETS (Emissions Trading Scheme), permet aux entreprises dépassant leurs plafonds d'émissions de gaz à effet de serre d'acheter des quotas auprès d'entreprises plus performantes sur le plan environnemental.

³ Les transports aériens seront intégrés au système en 2012.

3. La directive sur les énergies renouvelables adoptée en décembre 2008⁴ : la part des énergies renouvelables devra représenter 20 % du total de la consommation finale brute européenne d'énergie en 2020. La directive précise en outre un objectif spécifique de 10 % pour la part de l'énergie produite à partir de sources renouvelables dans la consommation d'énergie pour les transports. Cet objectif de 10 %, identique pour tous les Etats-Membres, sera atteint grâce à l'usage de biocarburants et autres bioliquides⁵ mais aussi d'électricité « verte » (ex. train). La production comme l'achat de biocarburants seront contrôlés pour éviter les effets pervers sur les plans alimentaires, sociaux et environnementaux. Le mode de calcul de la réduction des émissions de gaz à effet de serre résultant de l'usage de biocarburants est précisé. Chaque Etat-Membre devra d'ici le 30 juin 2010 élaborer un plan d'action national comportant des objectifs intermédiaires et le soumettre à la Commission. Remarque : pour la Belgique, l'objectif à atteindre est de 13 % (la répartition par régions n'a pas encore été décidée).

4. La directive sur la qualité des carburants établit notamment des normes limitant les gaz à effet de serre dus à la production des carburants utilisés dans les transports. Elle détermine également la protection de certains types de zones (ex. zones humides) qui pourraient être mises en danger directement ou indirectement par la production de biocarburants.

5. La directive concernant le règlement des émissions de CO₂ des nouvelles voitures.

6. La directive sur la capture et le stockage du carbone fixe un cadre légal pour ces technologies.

On notera que si certains objectifs ont été chiffrés pour la Belgique, la répartition de l'effort entre les trois régions n'est pas encore décidée.

L'objectif final de l'ensemble de ces mesures est résumé par le slogan « trois fois 20 % » :

- 20 % de réduction des émissions de GES d'ici 2020 par rapport à 1990 (30 % si les négociations internationales aboutissent à un effort suffisant, l'Union européenne a confirmé cet engagement dans le cadre l'accord de Copenhague sur le climat) ;
- 20 % d'économie sur la consommation énergétique de l'UE par rapport aux projections pour l'année 2020 ;
- 20 % d'énergies renouvelables dans la consommation énergétique finale de l'UE d'ici 2020, dont 10 % d'énergies renouvelables dans les consommations dues aux transports.

Rappelons par ailleurs que la Communauté internationale, en particulier le GIEC, appelle à une réduction des émissions de GES de 50 à 85 % pour 2050 par rapport à leur niveau de 2000, ce qui signifiera que des mesures encore bien plus exigeantes devront être mises en oeuvre le plus rapidement possible.

⁴ <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2008:0019:FIN:FR:PDF>

⁵ La contribution apportée par les biocarburants produits à partir de déchets, de résidus, de matières cellulosique d'origine non alimentaire et de matière ligno-cellulosiques est considérée comme équivalant à deux fois celle des autres biocarburants (art. 21/2).

1.3 CONTEXTE BELGE ET WALLON

1.3.1 Contexte belge

Sur le plan des engagements au niveau européen et internationaux, il convient de rappeler que la Belgique reste seule responsable. C'est notamment le Ministre fédéral de l'Environnement gère le registre des émissions.

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 % par rapport à 1990, année de référence (sauf 1995 pour les gaz fluorés). En 2006, les émissions de gaz à effet de serre en Belgique (sans l'UTMATF⁶: utilisation des terres, modification de l'affectation des terres et foresterie) s'élevaient au total à 137,0 millions de tonnes d'équivalents CO₂ (Mt éq. CO₂), soit 6 % de moins que l'année de référence.

Figure 2. Part des principaux secteurs dans les émissions de GES en 2007 (source: Belgium's greenhouse gas inventory (1990-2007), National Inventory Report, avril 2009).

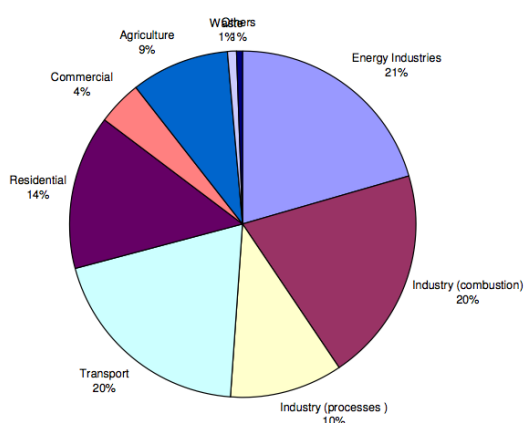
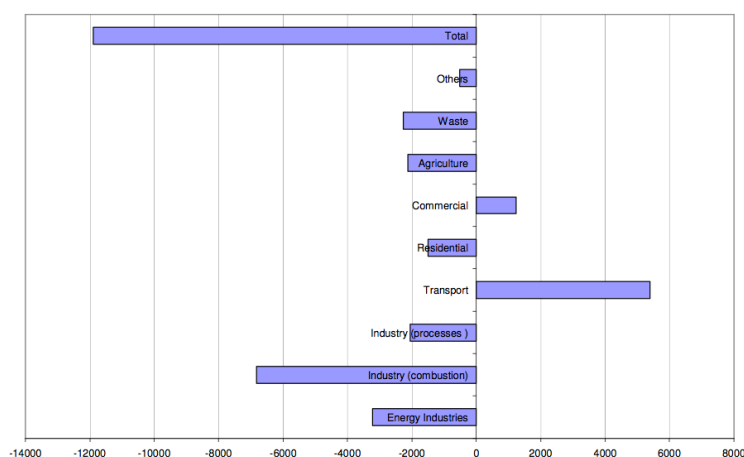


Figure 3. Modification de la part des principaux secteurs dans les émissions de GES entre 2000 et 2007 (Gg CO₂ équivalents) (source: Belgium's greenhouse gas inventory (1990-2007), National Inventory Report, avril 2009).



⁶ LULUCF: Land use, land use change and forestry

Figure 4. Evolution des émissions de GES en Belgique (Données excluant Land-Use, Land-Use Change et Forestry, comparées avec l'objectif du protocole de Kyoto. L'année de base pour les gaz fluorés est 1995) (source: Belgium's greenhouse gas inventory (1990-2007), National Inventory Report, avril 2009).

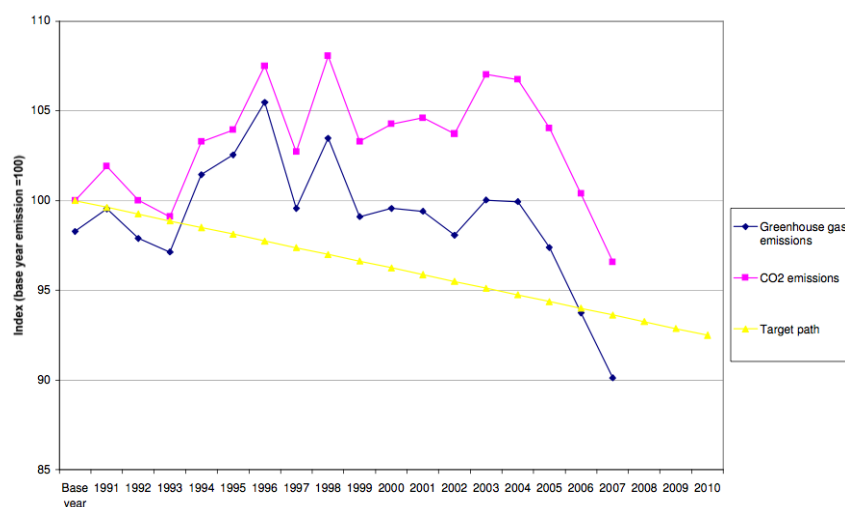
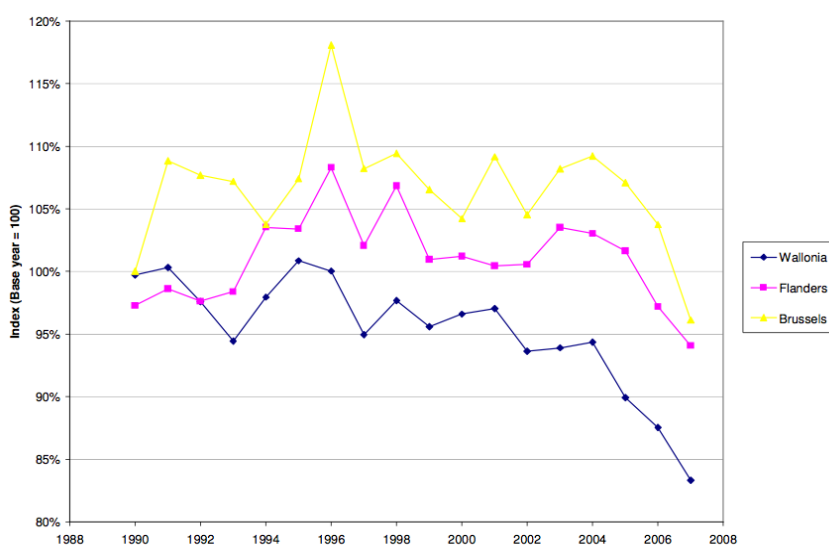


Figure 5. Evolution des émissions de GES dans les trois régions (Données excluant Land-Use, Land-Use Change et Forestry, comparées avec l'objectif du protocole de Kyoto. L'année de base pour les gaz fluorés est 1995) (Données excluant Land-Use Change et Forestry. La Wallonie avait en 2006 une part de 35% dans les émissions (Bruxelles-Capitale, 3% et Flandre, 62%) (source: Belgium's greenhouse gas inventory (1990-2007), National Inventory Report, avril 2009).



La Commission Nationale Climat assure donc la concertation et la coopération interne pour l'objectif de réduction de 7,5 % par rapport aux émissions de 1990 pour la période 2008-2012 suivant le protocole de Kyoto. En vertu de l'accord de coopération entre Régions de mars 2004, les réductions sont de : - 7,5 % (au cours de la période 2008-2012) pour la Région wallonne et respectivement - 5,2 % pour la Région flamande et + 3,475 % pour la Région bruxelloise. La protection du climat est toutefois une compétence régionale

1.3.2 Contexte wallon

En Région wallonne, la première réelle prise en compte du problème climatique intervient dans l'adoption du Plan pour la maîtrise durable de l'énergie (PMDE) adopté en 2003. Celui-ci fixait un certain nombre d'objectifs à l'horizon 2010.

En 2009, un projet de révision du PMDE est établi avec l'élaboration de différents scénarios pour les horizons 2010, 2015 et 2020.

Entre temps, le Plan Air Climat (adopté le 15.03.2007) identifie 99 objectifs (ou actions) à l'horizon 2020, dont les importants accords de branche avec l'industrie (165 entreprises).

19% des actions concernent les acteurs transports, infrastructures et aménagement du territoire, mais les actions spécifiques à l'aménagement du territoire proprement dit (excluant les transports et infrastructures) sont quasi inexistantes hormis une action portant sur la valorisation du patrimoine foncier ferroviaire par la prise en compte optimale des aspects énergétiques dans l'urbanisation des quartiers de gare (3.385 ha, dont 20% disponibles pour l'urbanisation à court ou moyen terme).

Parmi les autres mesures concernant les transports et les infrastructures du Plan Air Climat, se dégagent entre autres les objectifs suivants :

- Sensibiliser pour une évolution des comportements de déplacements
- Favoriser l'utilisation du transport public grâce à une offre attractive
- Recourir aux nouvelles technologies dans le secteur du transport public et favoriser le recours aux nouvelles technologies dans le secteur privé
- Mieux identifier, mieux gérer les besoins de mobilité et développer l'intermodalité pour le transport de passagers
- Le télétravail à domicile
- Encourager les modes de transport doux
- Limiter l'impact des transports routiers sur la qualité de l'air
- Adapter la fiscalité
- Faire de la Wallonie un leader dans les transports de marchandises et la logistique dans l'esprit du développement durable
- Accorder une attention particulière aux déplacements dans le cadre du travail
- Vivre avec son temps, prendre l'avion pour aller vite, mais pas sans contreparties pour l'environnement

La création de l'Agence wallonne Air Climat (AWAC) a été entérinée par le décret du 05.03.2008. L'arrêté d'organisation de l'AWAC a été défini le 03.07.2008.

Plus récemment, le Parlement wallon a adopté une résolution sur les pics de pétrole et de gaz (18 juillet 2008) visant entre autres l'efficacité énergétique et le développement des énergies renouvelables.

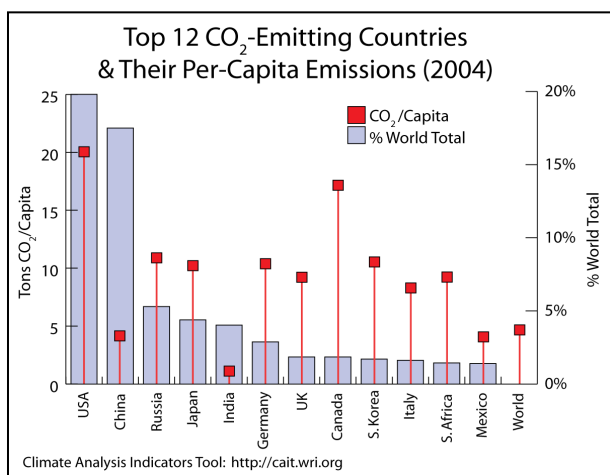
Par comparaison, les émissions de GES en Région wallonne restent très importantes et sont loin d'être favorables à la lutte contre le réchauffement climatique lorsqu'on examine les émissions par habitant. Le tableau 2 permet de fixer quelques ordres de grandeur.

Tableau 2. Les ordres de grandeur des émissions de GES

	m	g/an
(2007)		23300
Belgique (2007)		131,3
wallonne (2007)		45,6
	t	g/an
Émissions par habitant en Belgique (2007)		12,4
Émissions par habitant (2007)		13,3
		5,2
wallonne		3,7

Les émissions par habitant peuvent en particulier donner une idée de l'impact lié au niveau de vie par comparaison avec d'autres régions ou pays. Les émissions totales par pays et par habitant de ces pays présentées à la Figure 6 permettent ainsi de dégager des ordres de grandeur comparatifs avec la situation wallonne.

Figure 6. Emissions de GES par pays et par habitant. Source: <http://www.wri.org/chart/top-12-CO2-emitting-countries-their-per-capita-emissions-2004>.

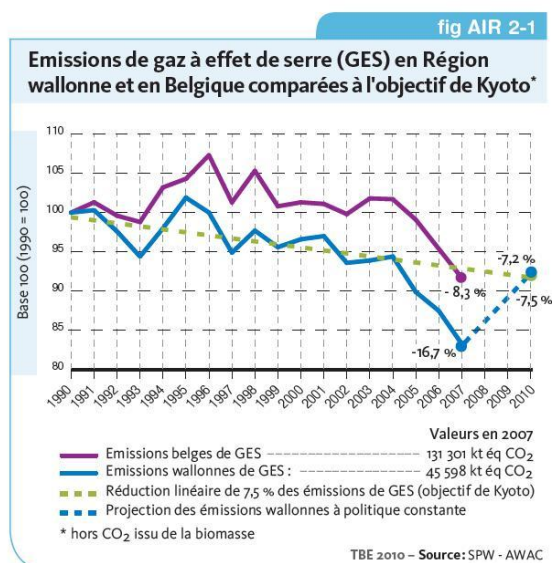


Ces quelques chiffres montrent bien que les efforts de réduction d'émissions de GES pour la Région wallonne devront être très importants pour respecter les engagements européens et internationaux.

1.3.3 Evolution sectorielle des émissions wallonnes

Les émissions de GES en Région wallonne sont globalement en diminution depuis 1990. La figure tirée de l'Etat de l'environnement wallon (2010) illustre bien cette évolution. On note ainsi une réduction de 16,7% (données 2007) entre 1990 et 2007.

Figure 7. Evolution des émissions de GES en Région wallonne et en Belgique (Etat de l'Environnement wallon, 2010).



Les projections 2010 sont toutefois plus modestes en raison d'incertitudes : évolution des transports, des activités industrielles (sidérurgie), développement de centrales électriques, demande en chauffage (hiver doux en 2006-2008).

L'objectif de Kyoto pour la Région wallonne sera donc a priori atteint en référence l'engagement de la réduction de 7,5 % (au cours de la période 2008-2012), mais des mesures de précautions ont toutefois été prises afin de disposer d'unités Kyoto via les mécanismes de flexibilité.

L'évolution sectorielle est toutefois éclairante sur les principaux enjeux de la lutte contre le réchauffement climatique.

Figure 8. Evolution des émissions de GES en Région wallonne par secteur d'activités (Etat de l'Environnement wallon, 2010).

tab AIR 2-1

Evolution des émissions de gaz à effet de serre (GES), en Région wallonne, par secteur d'activité (entre 1990 et 2007)			
Secteurs	Emissions de GES (kt eq CO ₂)		Evolution
	1990	2007	
Transformation et transport d'énergie*	6 812	3 411	-49,9 %
Déchets**	1 215	672	-44,7 %
Industrie (combustion)	17 984	12 736	-29,2 %
Autres transports***	744	567	-23,8 %
Résidentiel	6 859	5 428	-20,9 %
Agriculture	4 651	4 155	-10,7 %
Industrie (procédés)	7 923	7 544	-4,8 %
Tertiaire	1 348	1 517	+12,6 %
Transports routiers	6 869	9 002	+31,1 %
Gaz fluorés (HFC, PFC, SF ₆)	175	560	+219,0 %
CO ₂ issu de la biomasse	1 075	2 909	+170,7 %

* centrales de production d'électricité (hors industrie), cokeries (hors émissions fugitives) et transport de gaz. ** y compris les incinérateurs
*** agricole, militaire, aérien, par rail et par voie d'eau.

TBE 2010 - Source : SPW - AWAC

Contrairement aux autres secteurs (industrie, énergie, déchets et agriculture), les transports (+ 31,1%), ainsi que le secteur tertiaire (+ 12,6%), connaissent une augmentation significative de leurs émissions de GES en Wallonie. Cette évolution est comparable en Europe.

Par ailleurs, les projections pour les transports tablent sur une augmentation continue à court et moyen termes.

Tableau 3. Estimation des principales émissions atmosphériques du secteur Transports en Région wallonne et évolution 1990-2010 (Plan Air-Climat, 2007)

	1990	2005	Evolution 1990-2005	Projections 2010	Évolution 1990-2010 selon projection
CO ₂ -Kyoto (en t/an)	7.067.190	9.240.350 soit 22 % des émissions de CO ₂	+31%	10.828.000	+53%
CH ₄ (en t/an)	1.848	1.411 soit 1,2 % des émissions de CH ₄	-24%		
N ₂ O (en t/an)	445	993 soit 8 % des émissions de N ₂ O	+123%		
Total 3GES – Kyoto (CO ₂ +CH ₄ +N ₂ O) (en t eq CO ₂ /an)	7.243.863	9.577.925 soit 19,5 % des émissions des 3 GES	+32%		

Il faut toutefois noter que la part modale du transport routier des personnes est en très légère baisse en Région wallonne (TBE, 2010), alors que les transports collectifs sont en augmentation progressive. Toutefois, environ 80% restent attribués aux voitures particulières et motos.

La part modale du transport routier des marchandises est quant à elle en hausse légère sur la période 1995-2007 et atteint 78%. Près de 86% des émissions de GES en 2005 peuvent être attribués aux camions pour le transport des marchandises. Le rail et les voies navigables représentent respectivement 9,7% et 4,3% des émissions GES.

2. INVENTAIRE ET CALCUL DES ÉMISSIONS DE GES

2.1 LES PRINCIPES GÉNÉRAUX DE CALCUL DES ÉMISSIONS

L'estimation des émissions de GES pose le problème de la qualité et de la fiabilité des données.

Il faut notamment tenir compte de l'ensemble des gaz émis par une activité. Suite aux recommandations du GIEC, seuls les gaz principaux sont considérés en raison de leur importance et du degré de connaissance de leurs impacts : le dioxyde de carbone (CO₂), le méthane (CH₄), le protoxyde d'azote (N₂O), et trois types de gaz fluorés : les hydrofluorocarbones (HFC), les perfluorocarbones (PFC) et l'hexafluorure de soufre (HF₆). Etant donné que ces gaz ont des potentiels de réchauffement global (PRG ou GWP en anglais) différents, on utilise pour tous ces gaz une unité commune pour exprimer les émissions de gaz à effet de serre : le CO₂-équivalent (éq. CO₂). Même si d'autres éléments gazeux (vapeur d'eau et ozone, notamment) ou aérosols (particules, poussières) interviennent ceux-ci ne sont donc pas pris en compte, mais dans l'état actuel des connaissances ne jouerait qu'un rôle mineur par rapport aux 6 principaux GES retenus par le GIEC.

Au-delà des éléments à prendre en compte pour évaluer l'impact des GES sur le réchauffement climatique, la fiabilité des données d'émissions des principaux GES relatives à l'impact d'une source ou d'une activité donnée doit également être posée. Idéalement, les données directes d'émissions d'une activité méritent d'être utilisées lorsqu'elles sont disponibles. Toutefois, dans de nombreux cas, ces données ne sont pas mesurées et doivent être déduites. Dans cette recherche, elles seront soit obtenues indirectement, notamment par le biais des consommations énergétiques (émissions énergétiques des combustibles fossiles), soit estimées (voir le chapitre 2.2 sur les différentes approches d'inventaire ci-après). Sur un plan théorique, les émissions peuvent être calculées de la façon suivante :

$$E_{s,a,t} = A_{a,t} \times F_{s,a}$$

Où

E = émission relative à la substance « s » et à l'activité « a » pendant le temps « t »

A = quantité d'activité relative à l'activité « a » pendant le temps « t »

F = facteur d'émission relatif à la substance « s » et à l'activité « a »

(Desjardins et Llorente 2009)

2.2 LES DIFFÉRENTES APPROCHES D'INVENTAIRES TERRITORIAUX DES ÉMISSIONS DE GES

2.2.1 Les méthodes standardisées

Les inventaires territoriaux d'émissions de GES concernent un champ d'application vaste et complexe :

- Les activités sont extrêmement variées : résidentiel, tertiaire, industrie, agriculture, transport, etc.
- Les territoires peuvent être de taille fort variable : pays, région, commune, quartier.

Afin de pouvoir comparer les résultats, les inventaires des émissions sont standardisés et suivent généralement la méthodologie du GIEC et CORINAIR⁷, notamment pour les inventaires nationaux que les Etats membres de l'Union européenne doivent remettre chaque année sous forme de rapport d'inventaire.

Cette standardisation du système d'inventaire est nécessaire pour garantir la qualité des données et de leur évaluation : cohérence, comparabilité, transparence, exactitude et exhaustivité. Différentes méthodologies sont toutefois déclinées avec des adaptations plus ou moins importantes, notamment en fonction du territoire concerné ou des objectifs souhaités. Celles-ci peuvent être développées par des bureaux d'étude ou des organismes publics, comme la méthode Bilan Carbone de l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie) en France, par exemple.

En région wallonne, c'est l'AWAC (Agence de l'Air et du Climat) qui est chargée de transmettre les données d'émissions au niveau fédéral.

2.2.2 Les principales approches d'inventaires des émissions

a) Approche déductive ou top-down

L'approche déductive ou top-down part de données générales existant à un niveau géographique donné (pays, région) et vise à calculer les émissions sur base de ces données. Les émissions sont ensuite réattribuées à l'échelle spatiale souhaitée en fonction d'indicateurs statistiques (population, occupation du sol, etc.). Les données doivent donc être désagrégées soit au niveau spatial soit au niveau temporel.

L'atout de l'approche déductive est généralement l'accessibilité plus aisée des données. Son inconvénient majeur est une faible précision à un niveau spatial inférieur.

Exemple d'une approche « top-down » : approche basée sur des données de vente de combustibles mais ne permettant pas de savoir précisément les émissions résultantes si les caractéristiques du parc résidentiel ou automobile ne sont pas connues.

b) Approche inductive ou bottom-up

L'approche inductive ou bottom-up part de données les plus précises possibles à l'échelle locale (quartiers, communes) et vise à transposer les émissions calculées à une plus grande échelle (région, pays).

L'atout de l'approche inductive est son degré de précision lorsque la méthodologie est correctement établie. Son inconvénient est la collecte des données qui nécessite des enquêtes longues et coûteuses à mettre en œuvre.

Exemple d'une approche « bottom-up » : approche basée sur des données désagrégées telles que les caractéristiques des logements ou des véhicules. L'approche nécessite la collecte et le traitement de nombreuses données.

Ces deux approches sont en pratique utilisées de manière complémentaire en privilégiant l'une ou l'autre en fonction du niveau de détail souhaité. Les inventaires sont donc souvent hybrides dans leur construction.

⁷ CORINAIR (CORE INventory of AIR émissions in Europe) est l'inventaire de référence des émissions atmosphériques en Europe

2.3 CALCUL DES ÉMISSIONS SPÉCIFIQUES

2.3.1 Calculs des émissions spécifiques pour le transport de personnes

Pour le secteur des transports de personnes, les émissions globales sont essentiellement dues aux modes de transports suivants : train, bus-tram-métro, vélomoteur-moto et voiture automobile. Les déplacements à pied et à vélo ne sont pas considérés comme émetteurs de CO₂.

Ces émissions correspondent essentiellement à des consommations de gasoil, d'essence, de GPL (LPG) et d'électricité. L'électricité peut par ailleurs être considérée comme uniquement utilisée pour certains transports en commun (train-tram-métro) vu le très faible développement des véhicules électriques individuels (seulement quelques immatriculations anecdotiques en 2010).

Afin d'obtenir les émissions spécifiques pour le transport de personnes propres à la Wallonie, les consommations énergétiques moyennes sont calculées sur base de chiffres de l'ICEDD, de la SRWT et de l'AWAC. Le tableau ci-dessous détaille les consommations respectives des différents modes de transport énumérés ci-avant. On constate ainsi que les consommations importantes sont essentiellement le fait des voitures automobiles, soit 92,9% avec respectivement 64,1% pour le diesel et 28,8% pour l'essence.

Tableau 4. Répartition des consommations d'énergie par catégories de transport terrestre de personnes.

Catégories de transport	Consommation d'énergie (GWh)	%
Train (traction électrique)	397,1	2,00%
Train (diesel)	56,5	0,28%
Bus (diesel)	411,5	2,07%
Métro Charleroi (électricité)	5,8	0,03%
Moto, scooter (essence)	251,4	1,27%
Voiture (essence)	5715,6	28,80%
Voiture (diesel)	12719,3	64,10%
Voiture (LPG)	287,0	1,45%
TOTAL	19844,2	

Auteur : CPDT, Lepur – ULg. Calculé sur base de AWAC 2010; IWEPS 2007; ICEDD 2009; SRWT 2010, Electrabel 2006, 2007

Pour remettre en perspective le calcul des émissions spécifiques pour le transport de personnes, il est utile de rappeler que la part des consommations d'énergie pour les transports représente environ 25% de la consommation totale d'énergie en Région wallonne (cfr tableau 5).

Tableau 5. Répartition sectorielle de la consommation d'énergie liée au transport de personnes et de marchandises en Région wallonne durant l'année 2007 (Tableau de bord de l'Environnement, 2010⁸).

Secteur d'activité	Consommation d'énergie liée au transport (GWh) (2007)
Ménages	11776
Tertiaire (personnes)	8425
Tertiaire (marchandises)	7549
Industrie (personnes)	1975
Industrie (marchandises)	6785
TOTAL	36510

A partir des consommations, il est possible d'estimer les émissions de GES du secteur des transports de personnes en tenant compte de facteurs de conversion. Afin d'obtenir un facteur d'émission par passager et par km exprimé en g éq. CO₂/pkm, le facteur d'émission moyen global de GES est divisé par le taux d'occupation moyen du mode de transport utilisé (tous motifs de déplacement confondus). Généralement, les deux approches *top-down* (généralement) et *bottom-up* (lorsque les données désagrégées sont disponibles) sont utilisées. La section qui suit détaille la méthodologie que nous avons suivie pour évaluer les consommations énergétiques et les émissions spécifiques moyennes de GES par type de transport terrestre de voyageurs en Wallonie (cfr tableau 6):

a) Voiture

Le calcul des consommations énergétiques de la voiture se base sur la vente de carburants en 2007 en Wallonie (1.563.061 Tcarbu. au total en 2007). Les chiffres de consommation sont fournis par l'Agence Wallonne Air-Climat (AWAC) via le logiciel COPERT (cfr annexe 7) qui calcule de manière désagrégée les consommations de carburant en tenant compte du type de véhicule⁹, de la classe EURO, de la cylindrée, de l'âge etc. Cette différenciation permet d'attribuer de manière précise une consommation de carburant propre à chaque type de véhicule du parc wallon. Ensuite, les consommations totales par type de carburant sont converties en kWh sur base des facteurs de conversion de l'AWAC (12.209,2 kWh/Tcarbu. pour l'essence, 11860,3 kWh/Tcarbu. pour le diesel et 12763,6 kWh/Tcarbu. pour le LPG). Finalement, les consommations totales (18.722 GWh) sont ramenées en kWh par passager et par kilomètre en utilisant les données de mobilité du parc (29,8 Mveh.km en 2007 d'après les chiffres du SPF Mobilité Transports) et le taux d'occupation moyen des véhicules (1,39 p/veh. un jour ouvrable scolaire selon Hubert et Toint 2002). Nous évaluons ainsi la consommation énergétique moyenne d'une voiture en Wallonie à 0,45 kWh par passager et par kilomètre (pkm). Notons que le taux d'occupation des voitures est nettement plus faible dans le cadre des déplacements domicile-travail (1,16 en 1991 calculé sur base du recensement) ce qui a tendance à augmenter les consommations. Cependant, étant donné que les chiffres sur la mobilité des véhicules pour le calcul des consommations spécifiques ne permettent pas de discerner les déplacements domicile-travail des autres, nous nous en tiendrons pour le moment à ce chiffre qui englobe tous les types de déplacements.

⁸ Service Public de Wallonie, 2010. Tableau de bord de l'Environnement wallon. Rapport sur l'état de l'environnement wallon, Jambes, 234 pp.

⁹ Les véhicules légers (*light duty vehicles*) sont écartés dans notre évaluation. Ces véhicules utilitaires sont considérés comme étant dédiés au transport de marchandises uniquement. En 2007, ils représentaient 12% de la consommation de carburant pour les transports terrestres.

La conversion « carbone » des consommations se fait au niveau de la conversion « tonnes de carburant – kWh ». Les consommations de carburants sont converties en CO₂ selon les facteurs d'émissions suivants cette fois : 3015,5 kg CO₂/Tcarbu. pour l'essence, 3129,7 kg CO₂/Tcarbu. pour le diesel, 2867,2 kg CO₂/Tcarbu. pour le LPG. Ensuite, afin d'obtenir une mesure du potentiel de réchauffement climatique (Global Warming Potential) des gaz étudiés (CO₂, N₂O, CH₄), les coefficients de conversion « CO₂ – équivalent CO₂ » du Panel Intergouvernemental sur le Changement Climatique (IPCC) sont utilisés de tel sorte que: 1 CO₂ = 0,31 N₂O = 0,021NH₄. Finalement, les mêmes données relatives à la mobilité du parc wallon de véhicule et au taux d'occupation des véhicules sont utilisées pour obtenir une émission moyenne de 118,3 grammes d'équivalent CO₂ par passager et par kilomètre.

Notons que, dans les deux cas, le calcul ne tient pas compte des sur-consommations de carburant liées à la présence de climatisation dans les voitures individuelles.

b) Moto, scooter

La démarche poursuivie pour le calcul des consommations énergétiques et des émissions de CO₂ des motos/scooter est la même que pour la voiture. La consommation (20.599 Tcarbu.¹⁰), les kilomètres totaux parcourus (0,6 Mveh.km¹¹), et le taux d'occupation (1.02 p/veh.¹²) étant moins importants, la consommation moyenne de ce moyen de transport diminue à 0,41 kWh/pkm et 105,0 geq. CO₂/pkm.

c) Bus, tram, métro

L'évaluation des consommations énergétiques du bus se base sur une estimation des émissions CO₂ du Groupe TEC réalisée par la SRWT en 2010. La consommation totale de carburant pour la régie¹³ en 2008 est isolée et transformée en consommation énergétique via les facteurs de conversion de l'AWAC (34.694.759 litres de gasoil, soit 294.905 Tcarbu., équivalent à 411,5 GWh). A cela vient s'ajouter la consommation totale d'électricité du Métro Léger de Charleroi (6,1 GWh). Celle-ci tient compte des pertes d'électricité liées au transport et à la distribution (4,7% de l'énergie consommée en 2001 selon la Fédération des Producteurs d'Énergie). Les consommations totales sont ensuite ramenées au parcours moyen d'un voyageur (estimé à 8,6km par la SRWT) et par le nombre total de voyageurs transportés par la régie (évalué à 137,6 millions de voyageurs en faisant l'hypothèse que le nombre de voyageurs transportés est proportionnel aux kilomètres parcourus).

Pour la conversion en CO₂, les données de base restent les mêmes. Pour les bus, les tonnes de carburants sont converties en geq. CO₂ suivant les facteurs d'émissions de l'AWAC et les coefficients de conversion de l'IPCC. Dans le cas du Métro Léger de Charleroi, l'énergie consommée est convertie en équivalent CO₂ sur base des rapports d'activités annuels d'Electrabel (2006, 2007, 2008) détaillant le type et la quantité de polluants émis en fonction du mix de production énergétique belge. Une fois le total des émissions obtenu (93,7 kT eq.CO₂), les émissions sont ramenées en geq. CO₂ par passager-kilomètre sur base du parcours moyen d'un voyageur et du nombre total de voyageurs transportés comme évoqué ci-dessus.

Notons que seuls les bus « TEC » et le Métro Léger de Charleroi sont évalués ici étant donné que la Wallonie ne comporte aucun tram sur son territoire.

d) Train

¹⁰ Les chiffres de consommation sont fournis par l'Agence Wallonne Air-Climat (AWAC) via le logiciel COPERT

¹¹ D'après les chiffres du SPF Mobilité Transports de 2007

¹² A défaut de données propres à la Wallonie, nous avons repris le taux d'occupation des motos en Flandres (cfr De Vlieger *et al.* 2006)

¹³ Le parc « Régie » comprend la flotte de bus des 5 TEC (Brabant Wallon, Charleroi, Hainaut, Liège-Verviers, Namur-Luxembourg)

Le calcul des consommations du train se fait sur base des chiffres de l'ICEDD (2009) qui présente, dans son bilan énergétique des transports, des chiffres concernant l'énergie totale consommée pour le transport de voyageurs en Wallonie. La traction électrique pour le ferroviaire, après majoration de la quantité d'électricité perdue suite au transport et à la distribution (4,7%), consomme ainsi au total 397,1 kWh par an. La traction diesel-gasoil consomme 54,0 kWh. Ramenée au nombre de passager-km par an (2.926000 Mvkm¹⁴ selon l'IWEPS 2007), la consommation énergétique des trains est de 0,15 kWh par passager-km.

Afin de convertir les kWh en CO₂, les kWh des locomotives électriques et diesel-gasoil sont convertis en geq. CO₂ en fonction des facteurs d'émissions liés à la production électrique belge (Electrabel 2006, 2007, 2008) et des coefficients de conversion de l'IPCC, tout cela en tenant compte également des pertes liées au transport et à la distribution (4,7%). Ainsi, la traction électrique émet 90,2 kt eq. CO₂ par an et la traction diesel-gasoil 14,3 kt eq. CO₂ par an. Ramenées au nombre de passager-km évalué par l'IWEPS (2.926000 Mvkm), ces émissions représentent un total de 35,7 geq CO₂ par passager et par kilomètre.

Tableau 6. Consommations énergétiques et émissions de CO₂ globales moyennes pour le transport terrestre de voyageurs en Wallonie en 2007

Mode	Gwh	%	kWh/pkm	Teq. CO ₂	%	geq. CO ₂ /pkm
Voiture	18722,0	94,4	0,45	4894,7	94,9	118,3
Moto, scooter	251,4	1,3	0,41	64,6	1,3	105,0
Bus ¹⁵ , tram, métro	417,6	2,1	0,35	93,7	1,8	79,5
Train	451,1	2,3	0,15	104,4	2,0	35,7
Vélo	-	-	-	-	-	-
Marche à pied	-	-	-	-	-	-
TOTAL	19842,1	100	-	5157,5	100	-

Auteur : CPDT, Lepur – ULg. Calculé sur base de AWAC 2010; IWEPS 2007; ICEDD 2009; SRWT 2010, Electrabel 2006, 2007

2.3.2 Calculs des émissions pour le secteur résidentiel

Pour le secteur résidentiel, les émissions globales sont essentiellement dues aux usages énergétiques suivants : le chauffage des locaux ; la production de l'eau chaude sanitaire (ECS), la cuisson, les usages spécifiques de l'électricité, la demande pouvant être désagrégée selon qu'elle relève de l'éclairage ou des appareils électroménagers.

Pour le secteur résidentiel en Région wallonne, les émissions globales sont essentiellement dues aux consommations de gasoil, de gaz naturel et d'électricité, respectivement de 45,9%, 28,4% et 18,2% en 2005 (ICEDD, 2007)¹⁶.

¹⁴ L'unité « voyageur-km » correspond au déplacement d'un voyageur sur une distance d'un kilomètre. Elle est obtenue en multipliant le nombre de voyageurs transportés par les distances tarifaires réalisées par l'opérateur correspondant à des distances réelles, fictives ou forfaitaires, suivant la catégorie de titre de transport et sur une base territoriale. (IWEPS 2009)

¹⁵ Chiffres pour 2008

¹⁶ ICEDD, 2007. Bilan énergétique wallon 2005. Consommation du secteur Logement 2005. Rapport au Ministère de la Région wallonne, pp. 39.

Nous nous intéressons en particulier aux consommations liées au confort thermique (chauffage et ECS), qui représentent une très large part du total. Les consommations de gasoil, de gaz naturel et d'électricité sont respectivement de 59,4%, 32% et 3%. Le gasoil et le gaz naturel couvrent donc plus de 90% des besoins énergétiques de chauffage du parc résidentiel wallon. Chaque vecteur énergétique contribue de manière différente aux émissions de GES.

Afin d'obtenir les émissions spécifiques pour le chauffage du secteur résidentiel en Wallonie, les consommations énergétiques moyennes sont calculées en croisant les besoins énergétiques conventionnels et les modes de production d'énergie.

les besoins conventionnels des bâtiments en énergie de chauffage par mètre carré chauffé par an sont fonction du comportement thermique des bâtiments, qui s'établit sur la base de plusieurs paramètres physiques internes et externes. Ils peuvent être exposés de manière générale comme suit : le coefficient de déperdition des bâtiments, l'indice d'inertie thermique des bâtiments, les apports conventionnels internes et température de non chauffage, les températures extérieures, les apports solaires et coefficient de récupération.

Les besoins sont estimés sur une modélisation de l'enveloppe de l'ensemble des bâtiments de la Région Wallonne, élaborée à partir de données cadastrales et de photogrammétrie aérienne. Cette modélisation repose sur une segmentation du parc en cinq classes d'âges, considérées comme constructivement homogènes et dont les caractéristiques physiques ont été définies sur la base des données issues de l'Enquête qualité logement de 2006 interprétées à partir de connaissances historiques et techniques spécifiques de l'équipe de recherche. Les informations sur l'âge des systèmes et les vecteurs énergétiques utilisés pour le chauffage sont issues de l'enquête qualité logement de 2006 et spécifiés suivant l'âge des logements.

A partir des consommations, il est possible d'estimer les émissions de GES du parc résidentiel tenant compte de facteurs de conversion et de leurs incertitudes (voir ci-dessous).

Les émissions de GES pour les principaux combustibles du chauffage résidentiel peuvent être estimées aux valeurs suivantes :

	g éq. CO₂/kWh
Gasoil de chauffage	271
Gaz naturel	206
GPL (LPG)	231
Electricité	180 (135 RW, 250 Belgique)

Les facteurs d'émission considérés ici sont les chiffres de l'ADEME (2007)¹⁷.

¹⁷ ADEME (2007) *Guide des facteurs d'émissions. Version 5.0.* 240 pp.

2.3.3 Limites et incertitudes

Les termes A (quantité d'activité) et F (facteur d'émissions) sont complexes à déterminer car ils intègrent de nombreux paramètres : types de combustible et leurs variabilités, rendements des processus, fréquence d'usage, etc. Les facteurs d'émissions sont déterminés par la méthode de calcul utilisée et intègrent normalement les incertitudes associées (notamment les compositions variables des combustibles). Ainsi, même si les émissions de GES sont bien étudiées pour les combustibles fossiles les plus courants, leur composition peut influencer les émissions dans une proportion non négligeable, de l'ordre de 5% pour les produits pétroliers et gaziers et de 20% pour le charbon et produits dérivés. Toutefois, la variabilité des émissions liée aux conditions de combustion est faible en comparaison à la variabilité de composition.

Chaque facteur d'émission possède une incertitude associée. Dans son outil Bilan Carbone pour les entreprises et collectivités, l'ADEME (2007) définit dans son Guide des facteurs d'émissions le calcul des facteurs d'émissions et leurs incertitudes. On pourra s'y référer avec intérêt.

En résumé, sont pris en compte :

- Les facteurs associés à la consommation directe d'énergie (combustibles fossiles, bioénergie, électricité, etc.)
- Les émissions ne provenant pas de l'usage de l'énergie (engrais azotés, fluides frigorigènes, etc.)
- Les transports (routiers personnes et marchandises, aérien, ferroviaire, fluvial, etc.)
- Matériaux et produits utiles aux différents secteurs d'activités
- Déchets directs et eaux usées

D'une manière générale, pour les combustibles, les facteurs d'émission de CO₂ se déterminent à partir de leur composition physique et de leur pouvoir calorifique. Plusieurs sources relatives aux facteurs d'émission en CO₂ des différents combustibles consommés sont disponibles et résumées dans le guide de l'ADEME, entre autres :

- Les facteurs d'émission publics recommandés par le GIEC;
- Les facteurs d'émission utilisés pour les inventaires annuels officiels approuvés par les pouvoirs publics et transmis aux Nations Unies, élaborés à partir des facteurs du GIEC avec des corrections pour tenir compte des spécificités nationales;
- Les facteurs d'émission utilisés dans le cadre des protocoles internationaux (protocole de Kyoto), du guide communautaire de reporting des émissions pour la directive quota, divers travaux ISO en cours, etc.

Un des aspects importants à considérer est le contenu carbone du kWh électrique qui peut varier considérablement en fonction du mixte énergétique (charbon, gaz, nucléaire) utilisé et des processus mis en œuvre pour générer cette électricité. La Belgique avec son important parc nucléaire (55% de la production) a un contenu moyen en carbone pour l'électricité assez faible, de l'ordre de 250 g CO₂/kWh. La moyenne européenne étant d'environ 340 g CO₂/kWh. La Région wallonne avec près de 75% de production d'électricité d'origine nucléaire (78% en France pour comparaison) a un contenu en carbone pour l'électricité encore plus faible : de l'ordre de 135 g CO₂/kWh en tenant compte des données de l'ICEDD pour l'Etat de l'environnement wallon. Il est toutefois signalé que si la production d'électricité nucléaire ne rejette quasi pas de polluants atmosphériques, elle produit toutefois des déchets radioactifs dont la gestion à long terme pose encore problème.

Enfin, un des écueils supplémentaires à éviter ou à évaluer correctement est celui des filières au sein des activités ou de leurs secteurs. Dans bien des cas, les Analyses du Cycle de Vie (ACV ou LCA) sont nécessaires pour définir précisément les impacts des activités au travers de leurs émissions de GES (cette réalité est identique pour d'autres impacts environnementaux).

3. EMISSIONS DE CO₂ ET CONSOMMATIONS ÉNERGÉTIQUES LIÉES AUX DÉPLACEMENTS DOMICILE-TRAVAIL

Quel est l'impact de la structure du territoire wallon sur les comportements de mobilité de ses habitants ? Quels en sont les conséquences en termes de dépenses énergétiques et d'émissions de CO₂ ? Pour appréhender ces questions, nous nous sommes penchés sur les déplacements domicile-travail. Deux raisons majeures sont à l'origine de ce choix. D'une part, le travail représente une activité dite « structurante » dans les emplois du temps des ménages (Hubert et Toint 2002, p169). Bon nombre d'activités tels que les achats, l'accompagnement, les loisirs, etc. ont tendance à s'organiser à partir de ces déplacements. D'autre part, les déplacements domicile-travail sont généralement les plus longs au cours d'une semaine (Hubert et Toint 2002) et donc potentiellement les plus émetteurs de GES. En Wallonie, ces déplacements constituent 38% des distances parcourues un jour ouvrable scolaire et 27,6% un jour moyen (IWEPS 2008).

3.1 CADASTRE DES ÉMISSIONS DE GES LIÉES AUX DÉPLACEMENTS DOMICILE-TRAVAIL EN WALLONIE

Afin de dresser un diagnostic sur 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. Cet indicateur peut ainsi également apporter un éclairage sur la performance environnementale du système économique dans sa globalité. Nous l'appellerons « indice de performance environnementale » (IPE) pour évoquer à la fois les consommations énergétiques et les émissions de GES.

3.1.1 Calcul d'un 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'un secteur donné, par la population active totale de ce secteur. L'énergie consommée et les GES émis dépendent à la fois des distances parcourues, de la part modale et du facteur de consommation ou de 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. A l'inverse, au plus l'indice est faible, au plus les déplacements sont performants. Formellement, nous avons réécrit l'indice de K. Boussauw et F. Witlox (2001) comme suit :

$$IPE_s = \frac{D_s \cdot \sum \bar{E}_m \cdot C_{m,s}}{N_s}$$

Où :

IPE_s = Indice de Performance Environnementale des déplacements domicile-travail pour le secteur statistique « s »

D_s = total des distances parcourues

\bar{E}_m = consommation énergétique moyenne/émission d'équivalent CO₂ moyenne par passager pour le mode de transport « i »

$C_{m,s}$ = facteur de correction

N_s = total des travailleurs

Le facteur de correction $C_{m,s}$ permet de lier le mode et la distance parcourue. Il varie de 0 à 1 selon l'importance relative de chacun des modes au sein d'un secteur statistique donné. La somme des valeurs pour chacun des modes vaut 1. Il est calculé comme suit :

$$C_{m,s} = \frac{S_{m,s} \cdot \bar{D}_m}{\sum S_{m,s} \cdot \bar{D}_m}$$

Où :

$C_{m,s}$ = facteur de correction du mode de transport « m » pour le secteur statistique « s »

$S_{m,s}$ = part modale

\bar{D}_m = moyenne des distances parcourues

a) *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.

Rappelons également que ces répondants représentent des travailleurs qui se déplacent et qui ont un lieu de travail fixe. Les actifs ayant un lieu de travail variable (représentants commerciaux, infirmières à domicile, etc.)¹⁸, ou travaillant à domicile (agriculteur, profession libérale, etc.), n'ont pas dû répondre aux questions des enquêtes relatives à la mobilité. C'est pourquoi nous utiliserons, à partir de ce point, le terme « navetteur » lorsque nous cherchons à qualifier ces travailleurs en particulier.

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 :

¹⁸ Ces personnes représentaient 9,2% de la population active belge en 1991 et 1,2 en 2001 (Beelen *et al.* 2009).

Classe ESE 1991	Distance estimée (de)
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

Le total des distances parcourues (D_s) pour un trajet aller (simple) pour un secteur statistique donné est donc déduit comme suit :

$$D_s = \sum (n_c \times de_c)$$

Où :

n_c = Nombre de répondants par classe

de_c = Distance estimée par classe

La part modale ($S_{m,s}$) équivaut à :

$$S_{m,s} = (n_{ms} / N_s) \times 100$$

Où :

n_{ms} = nombre d'utilisateur d'un mode donné

N_s = nombre total de répondants par secteur

La moyenne des distances parcourues pour un mode donné est considérée comme étant :

$$\bar{D}_{m,r} = D_s / N_s$$

D_s = Total de distances parcourues par secteur

N_s = Nombre total de répondants par secteur

Notons que, contrairement à K. Boussauw et F. Witlox (2001), nous avons choisi d'introduire au dénominateur le nombre total de répondants et non pas la population active totale par secteur. Cela ne nous permet pas de tenir compte des répondants ayant un lieu de travail variable et ceux travaillant à domicile. Cependant, est-il bien judicieux de tenir compte de ces derniers ? Ne représentent-ils pas deux types de comportement distincts ? En effet, dans le premier des cas, prendre en compte les travailleurs à domicile permet d'améliorer, à juste titre, la performance énergétique du secteur considéré. Mais dans le deuxième cas, prendre en compte les travailleurs qui ont un lieu de travail variable a tendance à surestimer, à tort, la bonne performance du secteur : l'actif se déplace et donc consomme tout de même de l'énergie.

De plus, à l'échelle des secteurs statistiques, le nombre total d'actif par secteur peut varier fortement en fonction du taux de réponse. Ce dernier pouvant être parfois très faible en Wallonie, nous avons préféré éviter d'extraire de l'enquête des chiffres absolus à une échelle aussi désagrégée.

Au vu de ces biais, les enquêtes de 1991 et de 2001 sont considérées comme étant deux échantillons représentatifs fins (à l'échelle des secteurs statistiques) de la population active et de leurs comportements de mobilité. Ces échantillons nous permettent de calculer un indice qui est une *valeur relative* de la performance énergétique des déplacements domicile travail.

Par ailleurs, 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. Cela explique la présence de zones sans valeurs sur les cartographies (principalement dans les zones peu peuplées de la province du Luxembourg et du sud de la province de Namur). Bien que ces derniers ne représentent que 0,81% du nombre total de répondants, ils couvrent tout de même 45,9% de la superficie totale de la Wallonie.

b) Emissions et consommations spécifiques (\bar{E}_m)

Afin d'adapter l'indice de K. Boussauw et F. Witlox (2001) au cas spécifique de la Wallonie, les consommations énergétiques moyennes sont calculées sur base de chiffres de mobilité propre à la Région. De plus, des émissions en grammes d'équivalent CO₂ (g eq. CO₂) sont également mesurées afin d'évaluer l'« impact carbone » des déplacements domicile-travail.

Conformément à l'approche détaillée au point 2,3 de ce rapport, les émissions et les consommations spécifiques sont calculées en multipliant, d'une part, la quantité relative d'une activité (le transport terrestre de personnes) et, d'autre part, le facteur d'émission (ou de consommation) relatif à l'activité en question. Ces derniers varient en fonction du mode de transport considéré (voir tableau 7 ci-dessous).

Tableau 7. Consommations énergétiques et émissions de CO₂ moyennes pour le transport terrestre de voyageurs en Wallonie en 2007

Mode	kWh/pkm	geq. CO ₂ /pkm
Voiture	0,45	118,3
Moto, scooter	0,41	105,0
Bus ¹⁹ , tram, métro	0,35	79,5
Train	0,15	35,7
Vélo	-	-
Marche à pied	-	-

c) Exemple

En guise d'exemple, le tableau 8 repris ci-dessous détaille les valeurs intervenant dans le calcul de l'indice de performance énergétique du quartier statistique Saint-Lambert à Liège en 1991.

¹⁹ Chiffres pour 2008

Tableau 8. Exemple de calcul de l'IPE : quartier statistique Saint-Lambert (Liège)

Mode	Nombre de répondants (N_s)	Total des distances parcourues en km (D_s)	Moyenne des distances parcourues en km (\bar{D}_m)	Part modale en % ($S_{m,s}$)	Facteur de correction ($C_{m,s}$)	Consommation énergétique moyenne en kWh/pkm (\bar{E}_m)	Emission de GES moyenne en kgeq. CO_2 /pkm (\bar{E}_m)
Voiture (conducteur + passager)	101	1995,5	19,8	37,5	0,535	0,45	118,3
Moto, scooter	0	0	0	0	0,000	0,41	105,0
Bus	61	592,5	9,7	22,7	0,159	0,35	79,5
Train	15	891,5	59,4	5,6	0,239	0,15	35,7
Vélo	3	7	2,3	1,1	0,002	-	-
A pied	86	139	1,6	31,9	0,037	-	-
Total	266	3732	13,9	100	1	-	-

Le total des distances parcourues (D_s) est de 3732 kilomètres. Il représente la somme des trajets (aller simple) de chaque travailleur qui a répondu correctement à l'enquête.

La moyenne des distances parcourues (\bar{D}_m) en un mode donné consiste à diviser le nombre total de kilomètres parcourus par le nombre de personnes ayant déclaré utiliser ce mode.

La part modale est calculée en divisant le nombre de répondants du mode considéré par la somme totale des répondants. En d'autres termes, il s'agit du pourcentage d'utilisateur du mode de transport considéré.

Le facteur de correction s'obtient en multipliant ces deux dernières variables pour un mode donné (la voiture par exemple) divisé par la somme de cette même opération effectuée pour chacun des modes :

$$= 0,535$$

Une fois le facteur obtenu, celui-ci est multiplié par la consommation énergétique moyenne par passager du mode de transport considéré (\bar{E}_m). Dans le cas de la voiture, il s'agit de 0,48 kilowattheure par passager-kilomètre (kWh/pkm). L'indice de performance énergétique journalière des déplacements domicile-travail pour le quartier statistique St-Lambert équivaut donc à :

$$= 4,7 \text{ kWh/pers.}$$

En termes de CO_2 , l'indice vaut :

$$= 1,2 \text{ kgeq. } CO_2/\text{pers.}$$

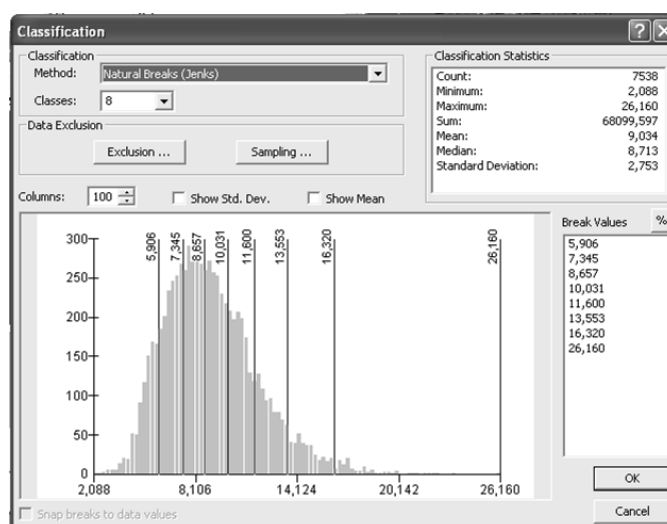
Ces valeurs montrent que le quartier Saint Lambert à Liège accueillait en 1991 des résidents dont les déplacements domicile-travail consommaient peu d'énergie et dégageaient peu de GES : la part des utilisateurs des transports en commun y est très élevée (22,7%) et les distances moyennes parcourues en voiture ne dépassent pas la moyenne wallonne (20 km).

3.1.2 Cartographie

L'indice de performance « CO₂ » et « kWh » est cartographié pour 1991 et 2001 à trois échelles complémentaires: les secteurs statistiques, les anciennes communes et les communes.

Au vu de leur distribution, les valeurs sont classées selon la méthode des « classes naturelles » (*natural breaks*) disponible dans le logiciel ArcMap (voir figure 1). Les valeurs sont réparties de telle sorte que la moyenne de chaque classe soit la plus proche possible de chacune des valeurs de cette classe. De cette manière, les catégories sont bien représentées par leur moyenne. Cartographiquement, chacune des catégories est mise en évidence pour que les valeurs faibles et les valeurs fortes se distinguent visuellement sur l'entièreté du territoire étudié.

Figure 9. Extrait de ArcMap pour la classification de l'IPE en kWh



La cartographie 10 illustre les résultats obtenus pour l'ensemble des secteurs statistiques de la Région wallonne en 2001. Ces derniers sont représentés sous forme de points afin de ne pas biaiser l'interprétation des cartes en désavantageant des secteurs de petite superficie (en centre ville par exemple) et en avantageant des secteurs de grande superficie (en milieu rural par exemple). Le principal avantage de la cartographie par secteur statistique est qu'elle permet, en milieu urbain, de différencier la performance énergétique de différents quartiers au sein d'une même ville. En milieu rural, elle permet de distinguer la performance énergétique de différents villages au sein d'une même commune.

Afin d'obtenir une couverture complète du territoire, une deuxième cartographie à l'échelle des anciennes communes est également présentée (cfr figure 13). Elle facilite l'interprétation des dynamiques territoriales étant donné que les résultats, agrégés à une échelle plus petite, laissent transparaître une continuité spatiale quasi complète de l'indice.

Finalement, la cartographie à l'échelle des communes (cfr figure 11) synthétise l'indice pour un commentaire général sur les performances des déplacements domicile-travail à l'échelle régionale.

Figure 10. Emissions de GES moyennes des déplacements domicile-travail en Wallonie par secteur statistique (2001)

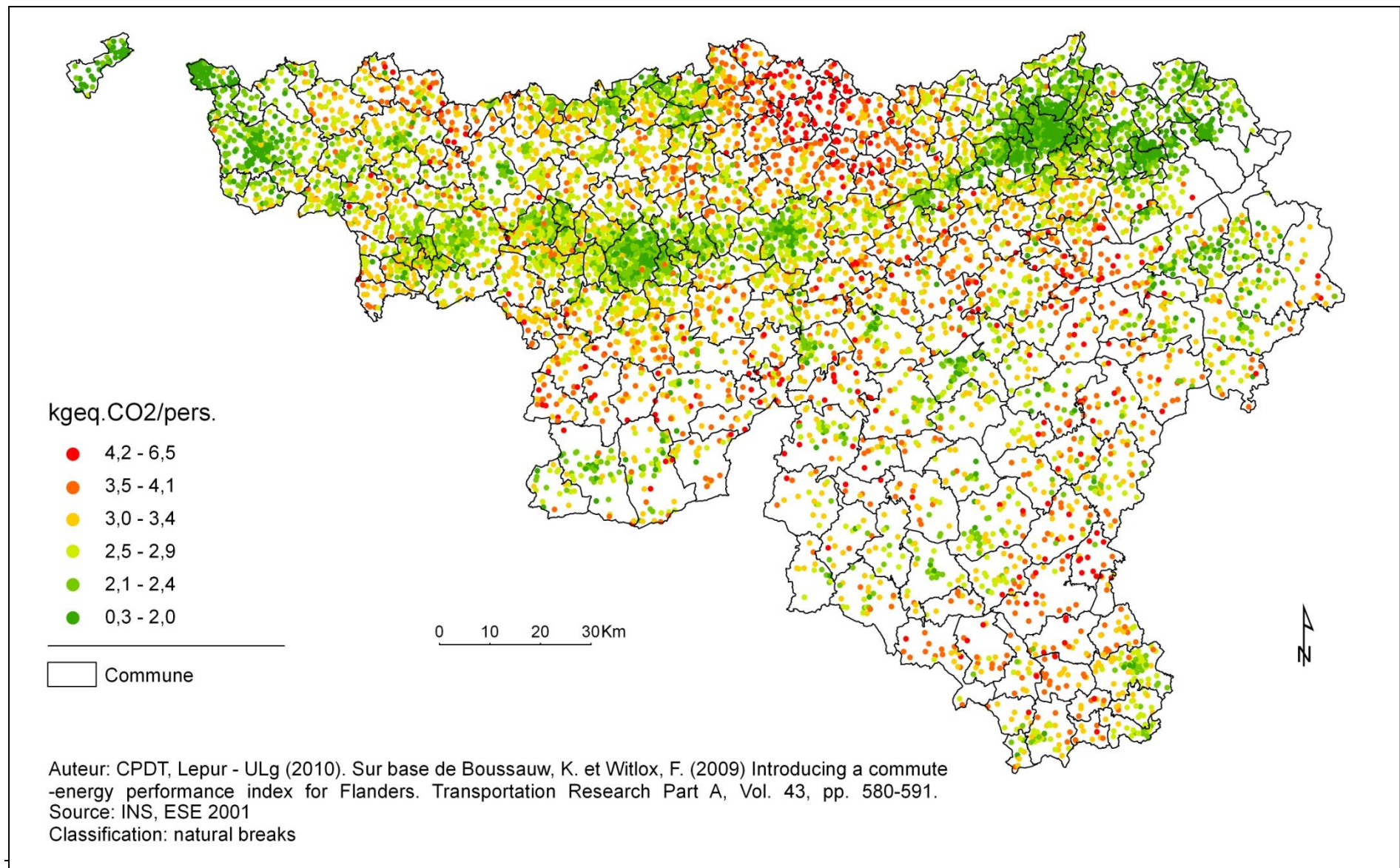
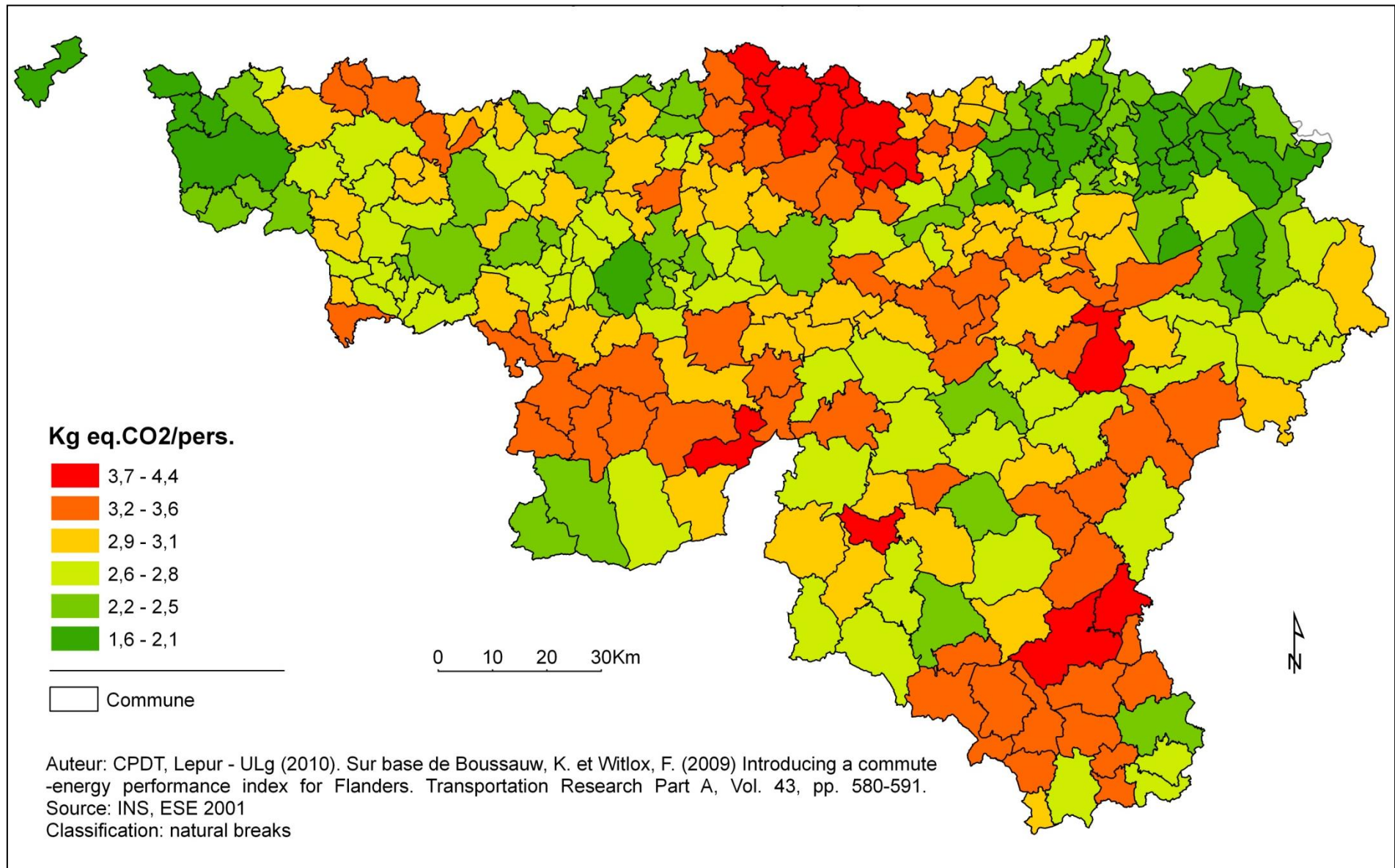


Figure 11. : Emissions de GES moyennes des déplacements domicile-travail en Wallonie par commune (2001)



3.1.3 Commentaire des résultats

A l'échelle régionale, on constate de bonnes performances dans les communes les plus peuplées de Wallonie. C'est essentiellement dans le sillon Haine-Sambre-Meuse-Vesdre (de Mouscron à Eupen) que les déplacements domicile-travail sont les moins émetteurs de GES. La commune d'Eupen est la plus performante avec 1,550 kg eq. CO₂/pers. Le total des kilomètres moyens parcourus pour un déplacement ne dépasse pas les 14,1 km contre 24,0 km pour l'ensemble du territoire wallon. Parmi les 20 communes les plus performantes (cfr tableau 9), 7 appartiennent à l'agglomération liégeoise. La commune de Liège détient une part modale pour les transports en commun (bus et train) de 19,7% (contre 68,1% pour la voiture), ce qui est très élevé comparé à la moyenne wallonne (11,3 %). De faibles émissions par actif s'observent également dans les pôles secondaires du sud du sillon (communes de Marche-en-Famenne, Chimay, Arlon, Bastogne) et au sud-ouest de la périphérie bruxelloise (communes de Tubize, Nivelles, Braine-l'Alleud, Wavre). Les communes de Spa et Malmedy constituent des pôles importants du Nord Est de l'Ardenne et sont également performantes et proches de Verviers et de la Communauté Germanophone.

Les communes qui accusent les moins bonnes performances énergétiques sont généralement situées dans les espaces « périphériques » ou « ruraux », souvent moins peuplés, de la Wallonie. Parmi les 20 communes où les déplacements domicile-travail génèrent le plus d'émissions par travailleur, un premier regroupement de 12 communes fortement émettrices de GES s'observe en périphérie sud-est de Bruxelles à la limite entre le Brabant wallon, la province de Liège et celle de Namur. Dans ces communes, un très grand nombre d'habitants font de longues distances en voiture pour aller travailler. A Ramillies, les actifs parcourent en moyenne 40,8 km, et émettent en moyenne 4,396 kgeq. CO₂/pers.. La part modale des transports en commun y est faible (9,7%) comparée à celle de la voiture (88,0%) car aucune ligne de chemin de fer ne dessert ce territoire. Une autre région où se concentrent les communes peu performantes est le Condroz. Dans sa partie occidentale, Hastière, Froidchapelle, et Doische par exemple sont des communes pour lesquels les actifs émettent en moyenne plus de 3 kgeq. CO₂/pers. Dans la partie orientale, Havelange et Ouffet figurent également parmi les communes les plus émettrices. Plus à l'est, Manhay comptabilise 3,867 kgeq. CO₂/pers., ce qui confirme son rattachement à la zone résidentielle de migrants alternants de Liège dans l'actualisation des régions urbaines de Van Hecke (2001). La part modale de la voiture (91,4%) et les distances moyennes parcourues (33,6 km) dépassent largement la moyenne wallonne. Dans la province du Luxembourg, un ensemble de communes situées dans l'orbite de Luxembourg-Ville se démarquent clairement en termes d'émissions. Elles se situent généralement à une distance importante de la capitale Grand-Ducale ainsi que des petits pôles urbains du sud de l'Ardenne et de la Lorraine. Par exemple, les actifs de Fauvillers parcourent des distances encore plus importantes que ceux de Manhay (37,3km), malgré une part modale de la voiture similaire.

Une telle répartition spatiale des performances laisse présager l'importance de l'occupation du sol (y compris la densité de population et d'emploi) dans l'explication des déplacements des actifs. L'éloignement relatif du lieu de résidence par rapport aux pôles d'emplois majeurs tel que Bruxelles, Liège, Namur, Charleroi et Luxembourg créent des « effets auréolaires » bien marqués à l'échelle régionale. Plus on s'écarte des grandes villes, plus les émissions de GES par navetteur ont tendance à augmenter. L'analyse à l'échelle des secteurs statistiques montre que, dans une moindre mesure, cet effet se produit également à l'échelle locale. Si dans certains cas, cet effet de réduction locale de l'indice à proximité immédiate d'un petit pôle urbain est limité (surtout dans le Brabant Wallon et à proximité des grandes villes wallonnes), en Ardenne, ce gradient est beaucoup plus marqué. Un petit pôle rural, tel que La Roche-en-Ardenne par exemple, attire des travailleurs sur une distance relativement courte (10 km environs), ce qui a pour effet de diminuer les émissions des actifs malgré une part modale de la voiture élevée dans chacune des localités considérées. Par ailleurs,

l'analyse à l'échelle des anciennes communes montre également que, malgré la mauvaise performance de la commune dans sa globalité, la présence d'un pôle urbain (généralement la ville ou le village-centre de la commune) suffit pour diminuer les émissions. C'est le cas de Hannut et Jodoigne par exemple. Pour ce dernier, 3,2 kgeq. CO₂/pers. sont émis par les navetteurs contre 4,2 kgeq. CO₂/pers. en moyenne pour les anciennes communes voisines.

Cependant, à l'influence de la densité de population et d'emploi s'ajoute l'influence de la proximité à l'offre ferroviaire la fréquence qui l'accompagne. Ceci s'observe notamment à l'échelle des anciennes communes. A ce degré de précision, des meilleures performances s'observent le long de l'axe Bruxelles-Namur-Luxembourg (Ligne 161), ainsi que l'axe Bruxelles-Charleroi (Ligne 124), Bruxelles-Mons (Ligne 94) et Bruxelles-Tournai (Ligne 96). Le long de ces couloirs de transport, les anciennes communes où se situent les gares sont généralement les plus performantes. Ceci laisse présager une influence positive des voies de chemin de fer à haute fréquence sur les comportements de mobilité des navetteurs. Par exemple, les navetteurs des anciennes communes de Ath, Soignies, Nivelles, Ottignies, Ciney, Libramont n'émettent en moyenne que 2,2 kg eq. CO₂/pers.. Malgré les longues distances parcourues en trains par une part importante de ces actifs (18 % en moyenne), les émissions moyennes apparaissent moins importantes au final étant donné que l'impact environnemental de ce mode de transport est environ trois fois moins important que celui de la voiture. A l'échelle des secteurs statistiques les effets liés à la proximité du chemin de fer peuvent également impacter les émissions de GES. Dans le cas de la commune d'Yvoir et de Wanze, par exemple, les quartiers de haut de vallée proches des grands axes autoroutiers (l'E411 et l'E25) sont moins performants que ceux de fond de vallée mieux desservis en transport en commun (train et bus).

Un « effet frontière », ou plus exactement un effet « frontière linguistique » est également à envisager dans l'interprétation du cadastre énergétique des déplacements domicile-travail, particulièrement dans le cas des communes de Comines-Warneton, Mouscron, Verviers, Dison, Limbourg, Welkenraedt, La Calamine, Eupen et Baelen qui font partie des 20 communes wallonnes les plus performantes. Le fait d'aller chercher un travail de l'autre côté de la frontière peut s'avérer parfois difficile pour des raisons administratives ou linguistiques, ce qui induit une certaine réticence aux longs déplacements. Les travailleurs ont donc tendance à trouver du travail localement, et donc parcourent de moins longues distances. En plus de cet effet frontière, ces communes sont fort éloignées de Bruxelles et de Luxembourg tout en étant de petits pôles urbains.

Par ailleurs, l'interprétation des performances des déplacements domicile-travail passe également par la prise en compte de variables socio-économiques. Dans le cas de la Corbeille de Namur par exemple, les navetteurs du quartier nord-est des « Casernes » émettent 2,3 kgeq. CO₂/pers. alors que les navetteurs des autres quartiers émettent 25% de GES en moins en moyenne (1,7 kgeq. CO₂/pers.). Cependant, la part modale de la voiture et les distances parcourues élevées de ces actifs ne peut s'expliquer par une différence en termes d'infrastructure de mobilité et de densité de population et d'emploi qui sont relativement similaires dans l'hyper-centre namurois. Dès lors, les revenus et le nombre de voitures par ménages sont visiblement également à prendre en compte dans ce cas.

Si on se réfère au maximum et au minimum de la cartographie de l'IPE par secteur statistique en 2001, l'indice met en évidence une forte variabilité de la performance énergétique des déplacements domicile-travail au sein du territoire wallon (de 1 à 22 environs selon le quartier de résidence). Par ailleurs, l'écart entre le percentile 10 et le percentile 90 de la distribution des valeurs est de 1,9. C'est cette variation « du simple au double » de l'IPE que nous retiendrons pour décrire l'amplitude de variation de l'IPE car cette méthode est plus fiable et est davantage représentative de l'ensemble de l'échantillon de valeurs. Dans le cas de la cartographie de l'IPE par ancienne commune en 2001, l'écart entre le percentile 10 et le percentile 90 est de 1,8, ce qui est sensiblement inférieur à l'écart observé dans la cartographie à l'échelle des secteurs statistiques. A l'échelle communale, la variabilité est encore moins forte. Ces diminutions de l'amplitude entre les valeurs extrêmes de l'indice s'expliquent par l'agrégation des données selon un maillage plus grossier. Nous devons être attentifs par rapport à ce problème de modification des unités de superficie (*Modifiable areal unit problem*) dans nos prochaines analyses car il a pour conséquence de lisser les valeurs réelles observées et donc d'effacer les disparités locales.

Tableau 9. Classement des communes wallonnes selon la performance des déplacements domicile-travail

Ordre croissant				Ordre décroissant			
	Commune	kWh/pers.	kgeq.CO2/ pers.		Commune	kWh/pers.	kgeq.CO2/ pers.
1	EUPEN	5,974	1,552	1	RAMILLIES	16,944	4,396
2	MOUSCRON	6,200	1,606	2	ORP-JAUCHE	16,930	4,390
3	DISON	6,751	1,748	3	FAUVILLERS	16,579	4,320
4	COMINES	6,776	1,757	4	LINCENT	16,367	4,221
5	HERSTAL	6,822	1,759	5	HELECINE	16,291	4,206
6	SAINT-NICOLAS	6,855	1,770	6	DAVERDISSE	15,409	4,017
7	VERVIERS	6,946	1,793	7	BURDINNE	15,317	3,982
8	LIMBOURG	6,953	1,803	8	WASSEIGES	15,106	3,921
9	LIEGE	7,084	1,816	9	LEGLISE	14,880	3,877
10	SERAING	7,163	1,849	10	MANHAY	14,827	3,867
11	WELKENRAEDT	7,141	1,852	11	INCOURT	14,705	3,828
12	BAELEN	7,315	1,903	12	JODOIGNE	14,653	3,803
13	BEYNE-HEUSAY	7,389	1,906	13	HANNUT	14,320	3,702
14	ANS	7,552	1,942	14	DOISCHE	14,234	3,702
15	KELMIS/LA CALAMINE	7,589	1,966	15	BEAUVECHAIN	14,208	3,698
16	PEPINSTER	7,685	1,988	16	BRAIVES	14,199	3,680
17	TOURNAI	7,746	1,996	17	HERON	13,894	3,610
18	SPA	7,718	2,005	18	FERRIERES	13,842	3,605
19	MALMEDY	7,733	2,015	19	HASTIERE	13,712	3,558
20	GRACE-HOLLOGNE	7,816	2,022	20	SILLY	13,692	3,530

3.1.4 Evolution 1991 – 2001

Cette section décrit l'évolution diachronique de l'indice de performance des déplacements domicile-travail entre 1991 et 2001. Les distances moyennes parcourues sont ensuite détaillées étant donné le rôle important de ce paramètre dans l'explication de l'évolution des émissions de GES des actifs wallons.

a) Evolution de l'indice

Une comparaison des résultats obtenus pour 1991 et 2001 par ancienne commune met en évidence une augmentation et une diffusion spatiale généralisée sur l'ensemble du territoire Wallon des valeurs élevées d'émissions de GES liées aux déplacements domicile-travail (cfr figure 12 et 13). Entre 1991 et 2001, les zones émettrices de moins de 2,0 kg de CO₂ équivalent par personne et par trajet se sont réduites très fortement. En 1991, elles constituaient près du quart de la superficie du territoire wallon (3800 km² environs). En 2001, elles n'en constituaient plus que 800 km² environs. Avec les localités de Malmédy, Chimay et Momignies, seuls les pôles principaux du sillon wallon (Mouscron, Tournai, Charleroi, Namur, Liège, Verviers et Eupen) sont restés en dessous de ce seuil. A l'opposé, les zones émettant plus de 4,0 kg de CO₂ équivalent se sont multipliées et étendues en 2001. Les zones concernées sont toutes localisées dans l'orbite de grandes villes wallonnes peu émettrices évoquées ci-dessus ou de Bruxelles. De plus, elles sont généralement au moins à une quarantaine de kilomètres de ces pôles. Elles se situent dans le sud de la province du Luxembourg, la périphérie sud-est de Bruxelles (à l'intersection entre la province Brabant Wallon, de Namur et de Liège), dans la région autour des communes de Froidchapelle, Philippeville et Beauraing, la région de Manhay et Stoumont ainsi que celle de Clavier. Les zones émettant plus de 3,0 kgeq. CO₂ représentent quasi la moitié de la superficie du territoire (7300 km² environs).

A l'échelle des communes, l'indice de performance évolue également de manière positive sur la quasi totalité du territoire. Sur les 20 communes ayant connu les plus fortes augmentations, 18 sont situées en Province de Luxembourg. Il s'agit systématiquement de communes ayant connu une forte croissance des travailleurs transfrontaliers se rendant au Grand Duché durant la période de 1991 et 2001. De plus, les 8 communes ayant connu les croissances les plus fortes (pouvant aller jusqu'à 920 geq. CO₂/pers.) sont toutes situées entre 40 et 70 km de Luxembourg-Ville. Notons que Manhay est la seule commune de l'arrondissement de Marche (arrondissement le plus éloigné de Luxembourg-Ville) à être repris dans les 20 communes où la distance moyenne a très fortement augmenté. Dans ce cas particulier, à l'accroissement des navetteurs se rendant au Grand-Duché s'ajoute une forte croissance du nombre de navetteurs en direction de la région Liégeoise située à près de 50 kilomètres mais accessibles facilement par l'E25. A l'exception de Namur, les grandes villes du sillon wallon présentent une augmentation des émissions par actif importante (de 400 à 600 geq CO₂/pers.). Cependant, on observe également des diminutions qui laissent apparaître des changements dans les comportements de mobilité des navetteurs entre 1991 à 2001. Sur les 20 communes ayant connu la croissance la plus faible, 14 sont situées dans le Brabant wallon. Les 6 autres sont situées dans la Province de Liège, dont trois dans la Communauté germanophone. Les trois communes concernées par une diminution de l'indice de performance sont Lasne, Chaumont-Gistoux et Amblève. Au vu des très faibles évolutions de l'indice (moins de 150 geq. CO₂/pers.) dans les communes de Grez-Doiceau, Wavre, La Hulpe, Rixensart, Waterloo, Ottignies-Louvain-la-Neuve et Walhain, une stabilisation, voire une amélioration, des performances semble s'être généralisée dans le centre du Brabant wallon entre 1991 et 2001.

Le calcul de l'indice pour la Wallonie en 1991 et 2001 montre que la tendance globale est à la hausse (cfr Tableau 10). L'indice est passé d'une moyenne de 2,1 à 2,5 kg de CO₂ équivalent par personne et par déplacement. Comparé à 1991, les navetteurs ont donc émis en moyenne 0,426 kgeq. CO₂/pers supplémentaires en 2001, soit une augmentation de 20,6%. En termes de dépenses énergétiques, la tendance est identique. 1,6 kWh/pers. sont dépensés en plus par trajet (aller simple) et par actif, ce qui représente une augmentation de 20,3%. Une telle évolution de l'impact environnemental des navetteurs wallons peut s'expliquer par la variation des différents facteurs qui composent l'indice de performance. Rappelons en effet que ce dernier varie en fonction du mode de transport utilisé (y compris la part modale et le facteur d'émission/consommation spécifique à ce mode) et de la moyenne des distances parcourues par les navetteurs. Dès lors, l'augmentation de 20% de la moyenne des distances parcourues en voiture et l'augmentation de 4,6% de la part modale de la voiture (contre un recul de 11,4% pour les transports en communs²⁰ et de -35,2% pour les modes doux²¹), permet d'expliquer la diminution généralisée des performances (cfr figure 12 et 13). Une description de l'évolution des distances parcourues par les navetteurs permet néanmoins d'affiner un tel constat, ainsi que d'avancer quelques facteurs explicatifs.

Tableau 10. Evolution de l'indice pour la Wallonie

	1991	2001	Evolution (2001 - 1991)	Evolution (%)
Total des répondants (Milliers de navetteurs)	798	966	168514	21,1
Total des distances parcourues (Mkm)	19,8	24,4	4,6	23,0
Moyenne des distances parcourues en voiture (km)	20,1	24,1	4,0	20,0
Moyenne des distances parcourues à moto ou en scooter (km)	13,2	12,1	-1,0	-8,0
Moyenne des distances parcourues en bus, tram ou métro (km)	12,9	14,4	1,5	11,4
Moyenne des distances parcourues en train (km)	47,7	50,7	3,1	6,4
Moyenne des distances parcourues en vélo (km)	5,6	4,7	-1,0	-17,2
Moyenne des distances parcourues à pied (km)	1,8	1,8	0,0	1,1
Moyenne des distances parcourues (tous modes confondu)	20,6	24,0	3,3	16,1
Part de navetteurs utilisant la voiture	76,7	80,2	3,5	4,6
Part de navetteurs utilisant la moto ou le scooter	0,4	1,9	1,5	354,1
Part de navetteurs utilisant le bus, tram ou métro	4,9	4,1	-0,8	-16,6
Part de navetteurs utilisant le train	7,8	7,2	-0,6	-8,1
Part de navetteurs utilisant le vélo	3,1	1,2	-1,9	-62,3
Part de navetteurs utilisant la marche à pied	7,0	5,4	-1,6	-23,1
Indice de performance des déplacements domicile-travail (kWh/pers.)	8,0	9,6	1,623	20,3
Indice de performance des déplacements domicile-travail (geq. CO ₂ /pers.)	2,1	2,5	0,426	20,6

Source: INS, ESE2001; AWAC 2010; IWEPS 2007; SRWT 2010; ICEDD 2009; Electrabel 2006, 2007

²⁰ Train, Bus, Métro, Tram

²¹ Vélo et marche à pied

Figure 12. Emissions de GES des déplacements domicile-travail en Wallonie par ancienne commune (1991)

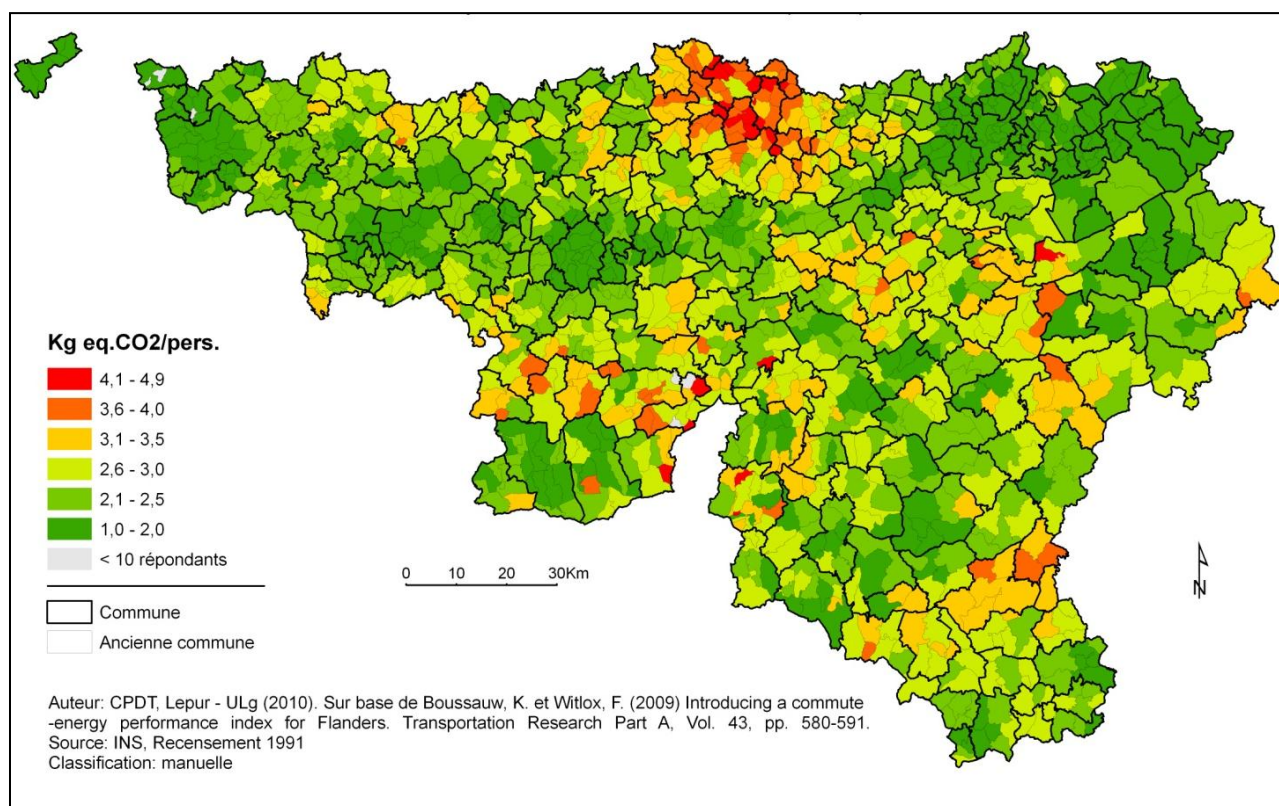


Figure 13. Emissions de GES des déplacements domicile-travail en Wallonie par ancienne commune (2001)

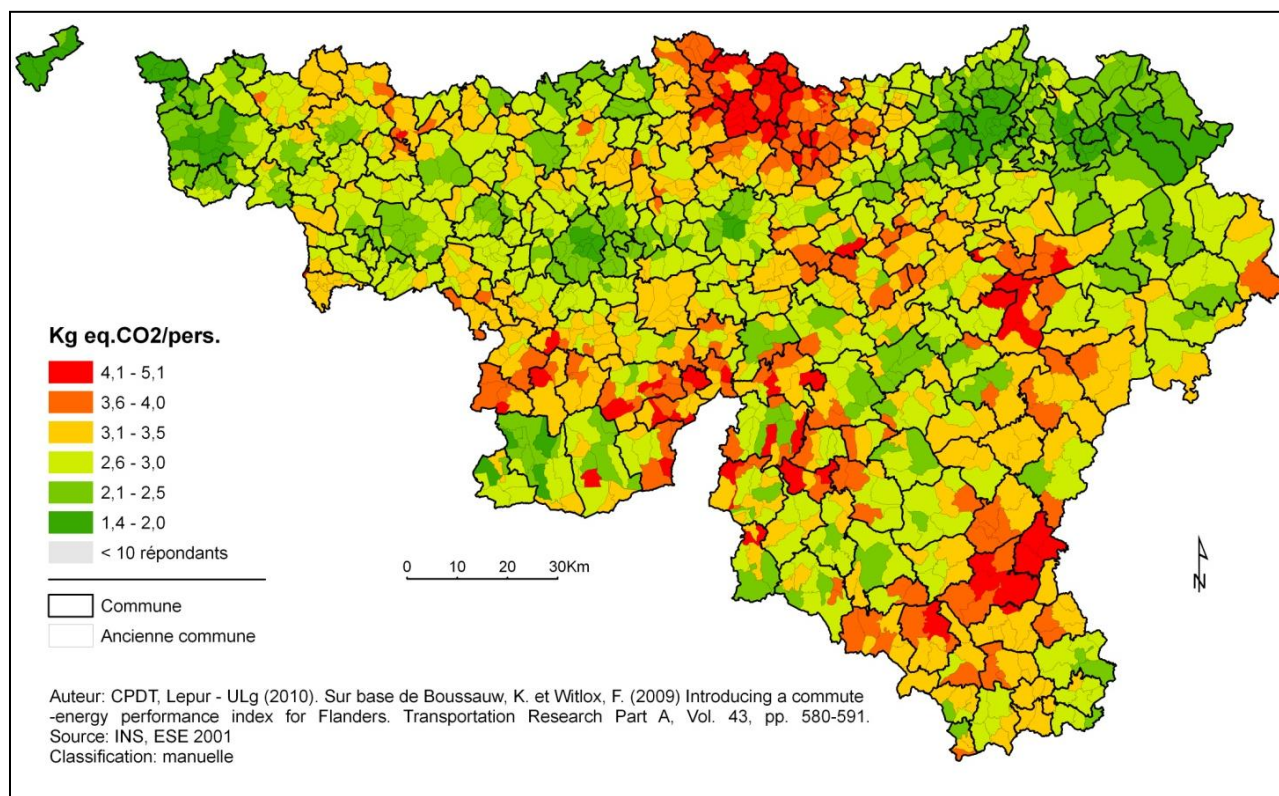
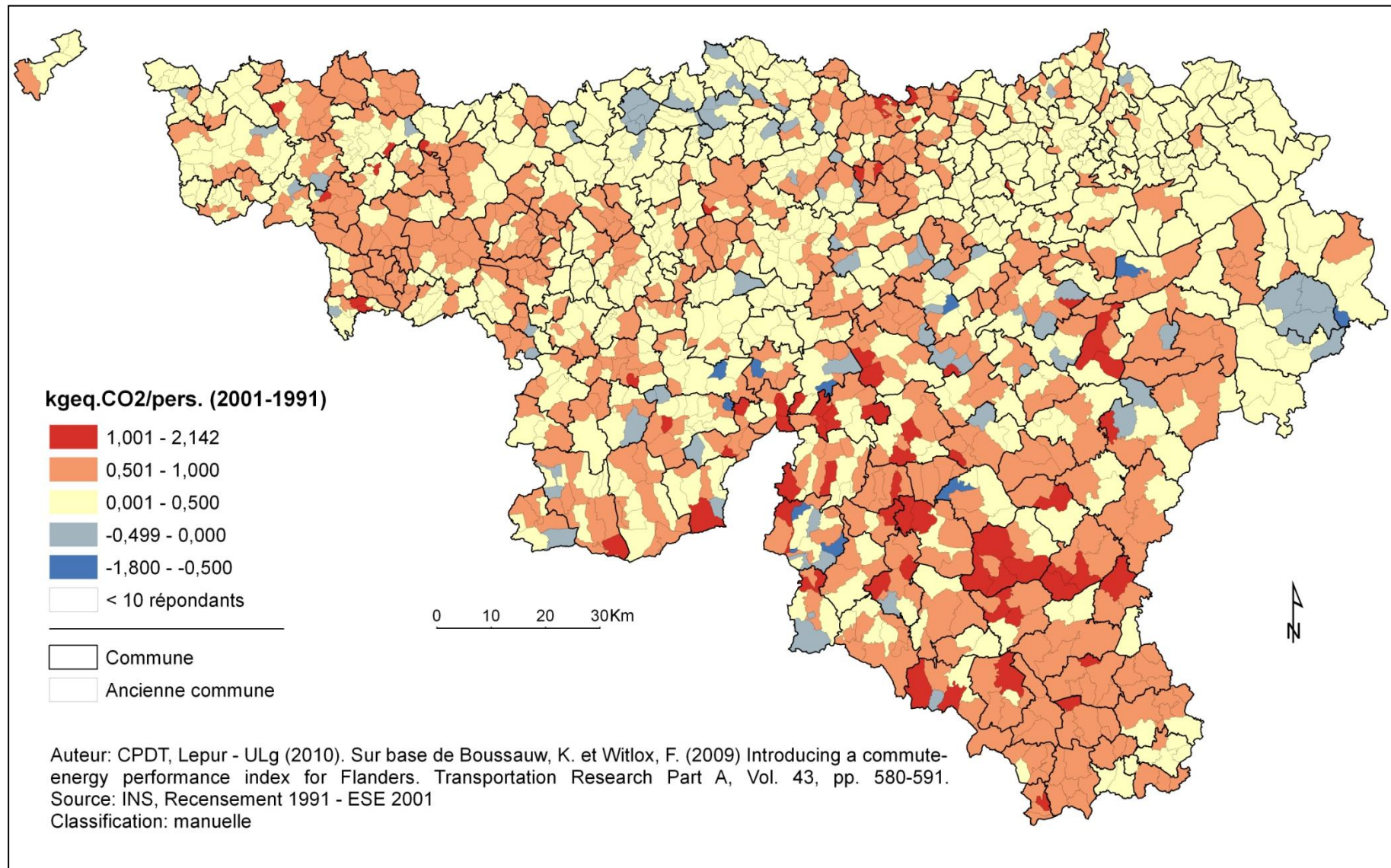


Figure 14. Evolution 1991-2001 des émissions de GES liées aux déplacements domicile-travail en Wallonie par commune



b) Evolution de la moyenne des distances parcourues

Par rapport à 1991, les distances ont augmenté dans la majorité des anciennes communes d'avant fusion en 2001 (cfr figure 17). Les zones qui accusent des augmentations importantes sont principalement concentrées dans la province du Hainaut, de Namur et du Luxembourg avec généralement des augmentations des distances parcourues allant de 4 à 8 km supplémentaires. Dans le sud de la Wallonie, les distances moyennes augmentent jusqu'à 18 km supplémentaires par trajet (Daverdisse). A l'opposé, les zones où s'observent les augmentations des distances les plus faibles (de 0 à 4 km) se concentrent dans la province de Liège et le Brabant wallon. Par ailleurs des diminutions, pouvant aller jusqu'à une réduction de 15 km (Verlée), s'observent également localement. Celles-ci se concentrent principalement dans des localités rurales peu peuplées essentiellement concentrées en Ardenne. Ces diminutions ne sont guère significatives étant donné qu'elles bordent d'autres localités marquées parfois par de très fortes croissances. Elles n'ont donc de signification particulière que dans deux sous espaces : à proximité d'Amel dans le sud de la Communauté germanophone et dans le centre du Brabant wallon. A l'échelle communale, le tableau 11 présente un classement des 20 communes avec l'évolution des distances moyennes parcourues la plus faible et la plus importante. Une opposition se confirme entre l'évolution des distances au nord (province du Brabant wallon) et au sud (province du Luxembourg) de la région.

Une telle évolution des distances est attribuable principalement à deux phénomènes étroitement liées que sont la périurbanisation et la métropolisation. Dans le cas de la province du Luxembourg, le pouvoir d'attraction du Grand-duché du Luxembourg et les prix plus élevés des terrains dans ce pays a pour conséquence qu'un nombre sans cesse croissant de communes éloignées de la frontière accueillent la résidence d'un nombre important de personnes travaillant au Luxembourg (Vanneste 2007). En effet, elles possèdent en général de bien plus grandes disponibilités foncières en zone d'habitat et les niveaux de prix des terrains y sont plus bas. Ceci explique leurs fortes croissances démographiques, l'augmentation des distances parcourues par les actifs étant donné que peu d'emploi local existe et, par conséquent, la forte augmentation des émissions de GES dans cette partie de la Wallonie. Le même phénomène s'observe également avec Bruxelles et les communes de l'ouest de la province de Liège (Berloz, Braives, Burdinne, Faimés, Geer et Hannut). Une telle déconcentration de l'habitat couplée à une concentration de l'emploi à l'échelle inter-urbaine a donc tendance à augmenter les distances parcourues pour les déplacements domicile-travail ainsi que les émissions de GES.

Cependant, lorsque la déconcentration de l'habitat est couplée à une concentration de l'emploi, les distances parcourues augmentent plus faiblement, voir même décroissent. C'est le cas notamment dans la province du Brabant wallon. Les communes de cette province très proches de Bruxelles ont en effet connu durant la période 1991-2001 une diminution des flux sortants (c'est-à-dire en réalité des flux vers Bruxelles et vers sa périphérie flamande). Cette tendance s'observe sur un espace centré sur Wavre et Ottignies – Louvain-la-Neuve, où l'on assiste à un développement économique important. Ce dernier résulte de l'extension du pôle universitaire de Louvain-la-Neuve, de la croissance d'entreprises orientées vers les hautes technologies (dont GlaxoSmithLine Biologicals), du développement de grands parcs d'activités (par exemple Wavre-Nord) et également du succès de parcs d'affaires récemment installés dans cette périphérie sud de Bruxelles. Qu'il s'agisse de transferts en provenance directe du territoire de Bruxelles ou d'autres formes de développement, cette zone connaît une expansion qui est indissociable de la dynamique métropolitaine bruxelloise (Lambotte J.-M., Rouchet H. et Halleux J.-M., 2010, p143). Pour autant que cela s'opère à proximité immédiate de (petits) pôles urbains ou de gros bourgs ruraux qui comptent un grand volume de travailleurs effectuant de longs trajets de déplacements, le développement de l'emploi bénéficiant à la population locale, peut donc parfois localement contribuer à limiter la longueur des navettes, et donc les émissions de GES liés aux déplacements des travailleurs.

La situation économique et le manque de travail dans certaines parties de la Wallonie poussent les travailleurs à parcourir de plus grandes distances pour trouver de l'emploi. À l'inverse, le dynamisme économique d'une région joue un rôle important dans la limitation de la hausse, voire la baisse, des distances parcourues par les travailleurs. Deux causes majeures sont à souligner dans l'explication d'un tel phénomène : la périurbanisation de l'emploi et de l'habitat dans des espaces périphériques ainsi que la concentration de l'emploi dans les agglomérations en dehors de la Wallonie (Bruxelles, Luxembourg). Ces deux phénomènes de déconcentration à l'échelle intra-urbaine et de concentration à l'échelle interurbaine, laissent présager des pistes d'action en vue de la diminution des distances parcourues pour les déplacements domicile-travail, et donc pour la réduction des émissions de GES des navetteurs.

Finalement, notons que l'évolution des émissions est également associée au report modal. Pour illustrer ce phénomène, le cas de La Hulpe est éloquent. Entre 1991 et 2001, la commune atteste une très faible augmentation des émissions (105 geq. CO₂/pers.) et des distances moyennes parcourues (1,4 km en moyenne). Parallèlement, la part modale de la voiture a diminué de 4,6% (contre + 4,6% en moyenne en Wallonie) et la part du train a augmenté de 3,1% (contre une diminution de 8,1% en Wallonie). Un tel report modal de la voiture vers les trains, couplé à un usage de la voiture limité, peut donc engendrer des gains significatifs.

Tableau 11. Classement des communes selon l'évolution 1991-2001 des distances moyennes parcourues pour les déplacements domicile-travail

Ordre croissant			Ordre décroissant		
	Commune	km		Commune	km
1	AMBLEVE	-0,4	1	VAUX-SUR-SURE	8,3
2	LASNE	-0,2	2	DAVERDISSE	7,9
3	CHAUMONT-GISTOUX	-0,03	3	LIBRAMONT-CHEVIGNY	7,8
4	ENGHIEN	0,6	4	FAUVILLERS	7,7
5	OTTIGNIES-LOUVAIN-LA-NEUVE	0,8	5	VIRTON	7,7
6	RIXENSART	0,9	6	NEUFCHATEAU	7,6
7	CHASTRE	1,0	7	MEIX-DEVANT-VIRTON	7,3
8	WATERLOO	1,0	8	TENNEVILLE	7,0
9	WALHAIN	1,1	9	HABAY	6,7
10	WAVRE	1,1	10	ETALLE	6,7
11	GREZ-DOICEAU	1,2	11	HASTIERE	6,7
12	FEXHE-LE-HAUT-CLOCHER	1,3	12	VIELSALM	6,6
13	LA HULPE	1,4	13	SAINTE-ODE	6,5
14	BRAINE-L'ALLEUD	1,4	14	SAINT-LEGER	6,2
15	GENAPPE	1,6	15	BURDINNE	6,2
16	LA CALAMINE	1,6	16	ATTERT	6,1
17	BEAUVECHAIN	1,8	17	MANHAY	6,1
18	DALHEM	1,8	18	FLORENVILLE	6,0
19	BUTGENBACH	2,0	19	ROUVROY	6,0
20	NANDRIN	2,1	20	ARLON	5,9

Figure 15. Moyenne des distances parcourues pour les déplacements domicile-travail en Wallonie par ancienne commune (1991)

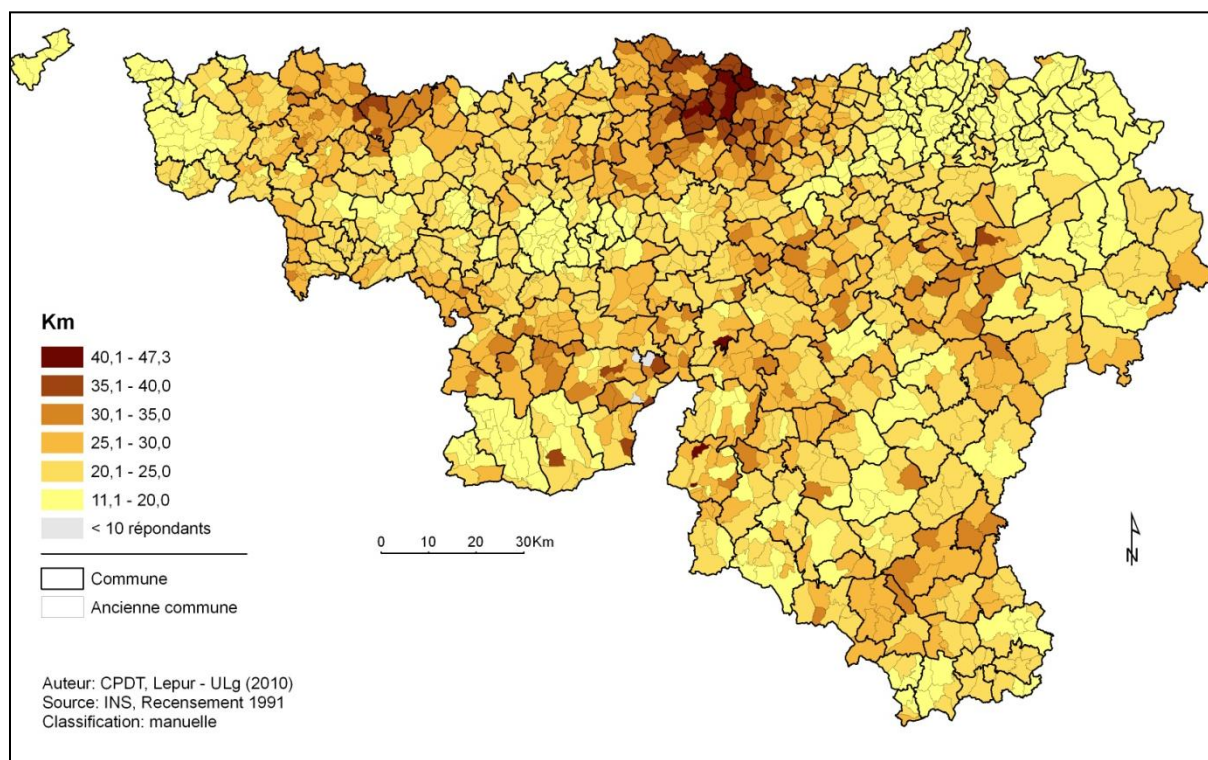


Figure 16. Moyenne des distances parcourues pour les déplacements domicile-travail en Wallonie par ancienne commune (2001)

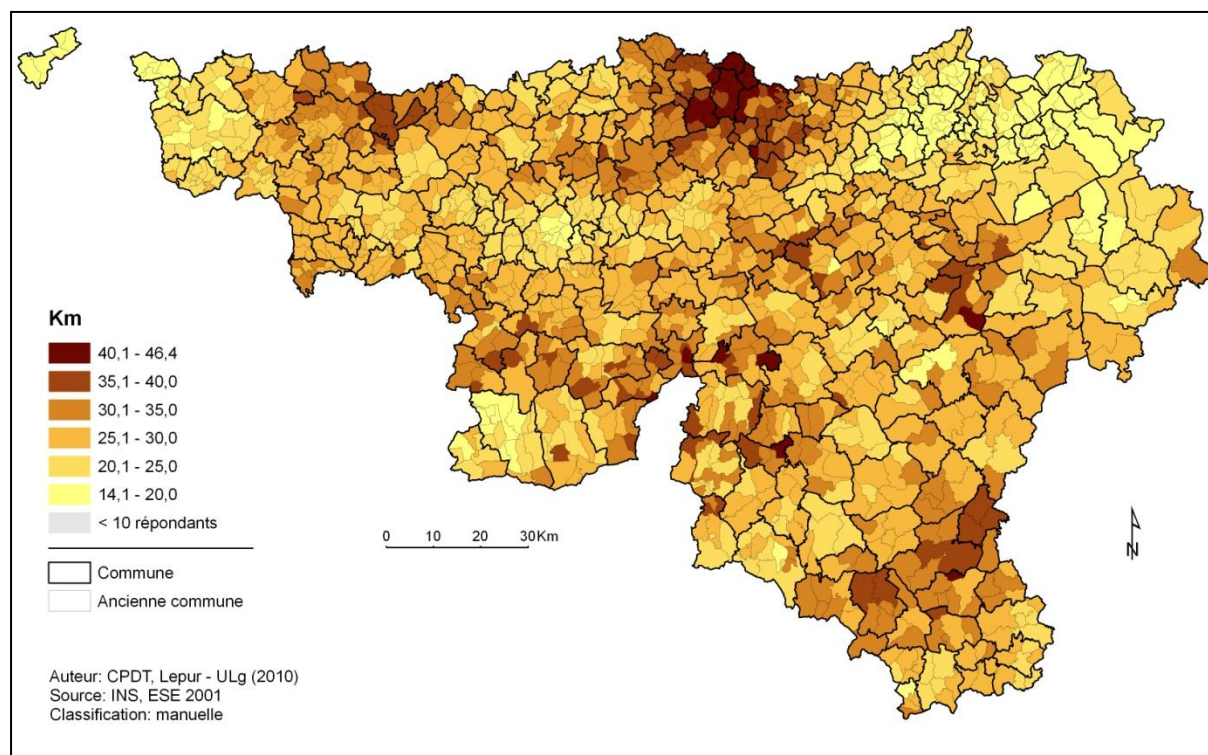
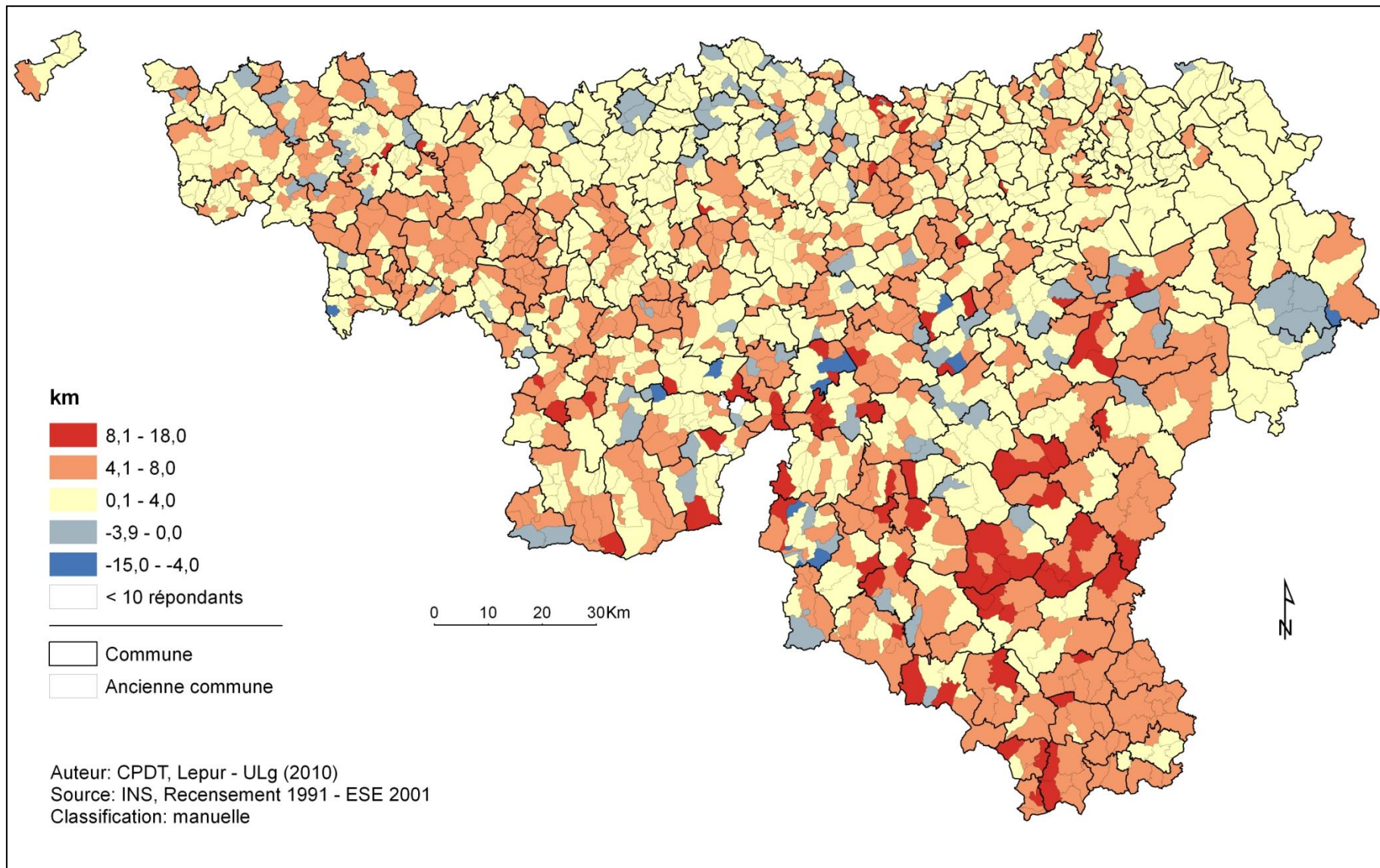


Figure 17. Evolution 1991-2001 des distances moyennes parcourues pour les déplacements domicile-travail en Wallonie par commune

3.1.5 Consommations et émissions globales

La quantité d'énergie totale consommée pour les déplacements domicile-travail des navetteurs wallons se calcule en multipliant l'indice de performance énergétique par le nombre d'actifs qui se déplacent et qui ont un lieu de travail fixe. Le même mode opératoire est suivi pour les émissions totales de GES.

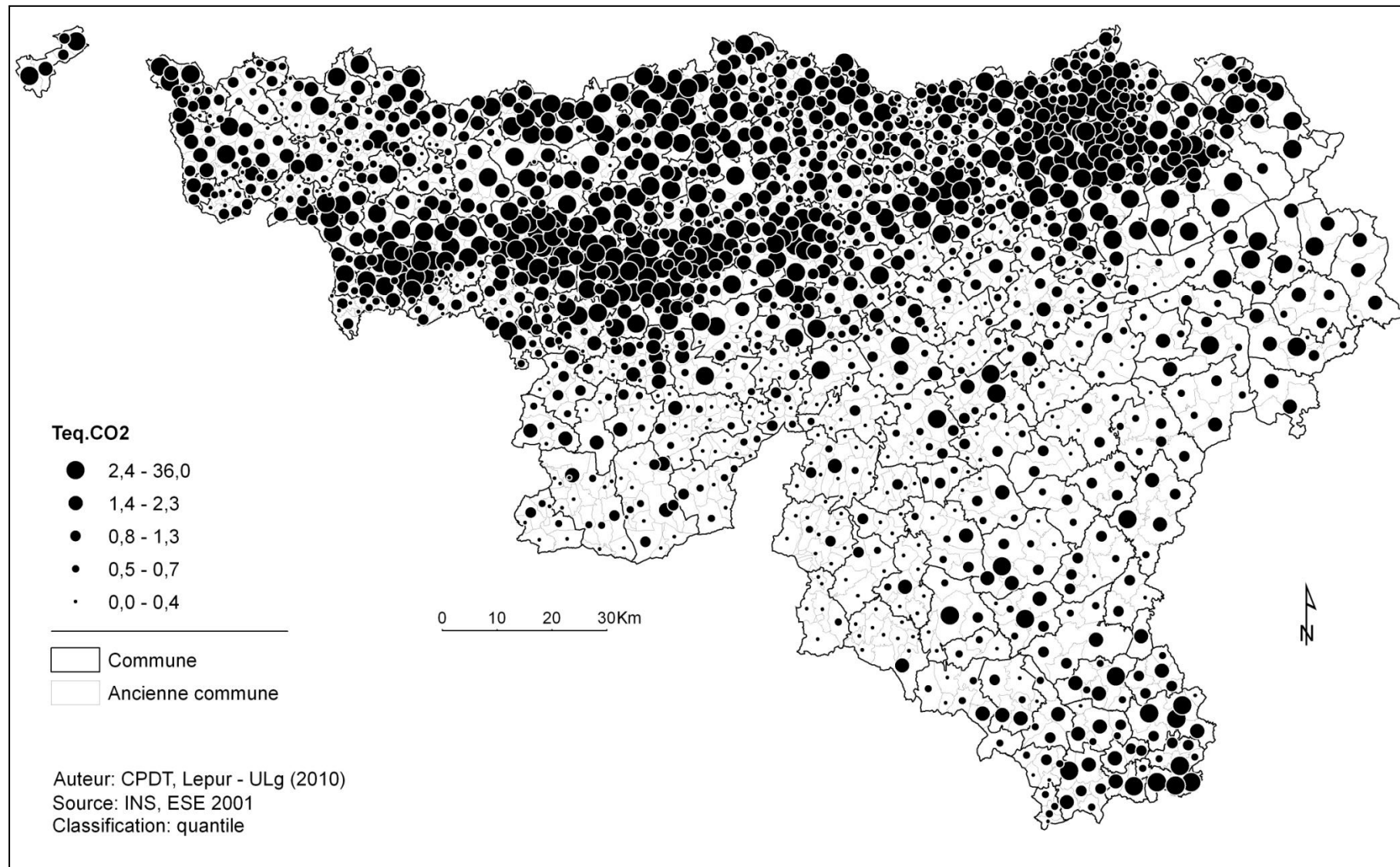
La cartographie par ancienne commune ci-dessous (cfr figure 18) illustre un renversement des tendances observées sur les cartographies des émissions de GES par navetteur. Les fortes émissions sont étroitement corrélées aux zones densément peuplées du territoire wallon. Ces résultats ont l'avantage de souligner l'importance des agglomérations comme étant des zones où le potentiel de réduction des émissions de GES est important. Des mesures localisées dans le sillon wallon par exemple permettraient d'obtenir des gains nets plus rapidement car elles toucheraient un volume de population important. N'oublions cependant pas que les zones les plus faiblement peuplées restent généralement les plus énergivores en termes de comportements de mobilité, mais aussi les plus vulnérables en cas d'un éventuel pic du pétrole (cfr T2A, section Logement et Mobilité).

En 2001, la somme des émissions dues aux déplacements domicile-travail de tous les actifs wallons s'élève à 2,5 Teq. CO₂ (9,8 GWh). Or, d'après nos calculs des émissions spécifiques détaillés au chapitre 2 (cfr tableau 6), 5.157 kTeq CO₂ ont été émises en 2007 pour le transport terrestre de voyageurs en Wallonie. Dès lors, si on considère un trajet aller-retour pendant une période de 253 jours ouvrables (Hubert & Toint 2002, p35), les déplacements annuels des navetteurs wallons ont émis 1.280 kTeq. CO₂/an en 2001. Ce chiffre correspond à 24,8% des émissions totales évaluées, soit approximativement la part des déplacements domicile-travail (27,6% des distances parcourues pour un jour moyen en 2004 selon l'IWEPS 2008). La différence entre ces deux pourcentages s'explique principalement par l'augmentation de la consommation énergétique, et donc des émissions, du transport terrestre de voyageurs entre 2001 (données de l'enquête socio-économique) et 2007 (données disponibles pour le calcul des émissions/consommations spécifiques). Un tel cadrage de nos résultats nous permet donc de conforter l'exactitude de nos chiffres concernant les consommations énergétiques et les émissions de GES globales en Wallonie.

Tableau 12. Évolution des consommations énergétiques et des émissions totales liées aux déplacements domicile-travail en Wallonie

	1991	2001	Evolution (%)
Consommations totales d'énergie (GWh)	7,7	9,8	27,5
Emissions totales de GES (kTeq. CO ₂)	2,0	2,5	27,8

Figure 18. GES émis pour les déplacements domicile-travail en Wallonie par ancienne commune



3.1.6 Synthèse

L'élaboration d'un cadastre des émissions de GES liées aux déplacements domicile-travail a permis de mettre en évidence les caractéristiques de la structure du territoire wallon responsables de la distribution spatiale actuelle des émissions de GES. Nous retiendrons les éléments suivants dont les analyses de régressions devront tenir compte dans l'identification des facteurs structurants permettant de réduire les émissions de GES (cfr chapitre 5) :

1. Les comportements de mobilité des navetteurs résultent de dynamiques territoriales multi-scalaires qui doivent être approchées de manière complémentaires aux trois échelles étudiées (communes, anciennes communes et secteurs statistique).
2. L'occupation du sol (y compris la densité de population et d'emploi) et les infrastructures de mobilité apparaissent comme des facteurs explicatifs majeurs pour l'interprétation du cadastre des émissions de GES. Cependant, les caractéristiques socio-économiques peuvent elles aussi apporter une part d'explication aux émissions de GES des actifs wallons.
3. Entre 1991 et 2001, on observe en Wallonie une augmentation de la moyenne des distances parcourues pour les déplacements domicile-travail de 16%, ce qui entraîne une augmentation des émissions de GES par navetteur de 20%. Cette augmentation des émissions résulte également d'une augmentation généralisée de l'utilisation de la voiture au détriment des transports en communs (bus et trains) et plus encore de la marche à pied.
4. La moyenne des distances parcourues est un facteur explicatif prépondérant dans l'explication de l'évolution des consommations énergétiques et des émissions de GES. Notons également qu'à distance moyenne parcourue égale, le report modal permet sensiblement d'améliorer les performances environnementales des déplacements domicile travail.
5. La périurbanisation de l'emploi et de l'habitat et la métropolisation sont à la fois responsable de la diminution et de l'augmentation quasi généralisée de la performance environnementale des navetteurs wallons. Dans le sud Luxembourg, l'attractivité du Grand Duché du Luxembourg et le faible coût des terrains urbanisables dans cette partie de la Wallonie engendre de longues distances de déplacements. A l'opposé, le dynamisme économique du Brabant Wallon, profitant de la proximité de Bruxelles, a pour conséquence de diminuer localement, pour les résidents de quelques communes, les distances moyennes parcourues.
6. En termes de consommations et d'émissions totales, celles-ci ont tendance à se concentrer dans les zones fortement peuplées de la Wallonie (sillon wallon et Brabant wallon). Des mesures localisées dans ces zones permettraient d'obtenir des gains énergétiques nets rapidement car elles toucheraient un volume de population important. Notons cependant que les zones peu peuplées consomment généralement plus d'énergie par habitant et sont les plus vulnérables en cas d'un éventuel pic du pétrole (cfr T2A).

3.2 VILLE COMPACTE ET GAINS ÉNERGÉTIQUES POTENTIELS : UNE POLITIQUE D'AMÉNAGEMENT RÉALISTE ?

3.2.1 Introduction et objectifs

Au cœur des investigations sur la contribution de l'aménagement du territoire à la réduction des émissions de GES réside la question de la densité. Une ville compacte permet de contenir l'urbanisation, de favoriser les transports en commun, de limiter l'usage de la voiture, et donc de réduire les consommations de carburant et par conséquent les émissions de GES (Owens 1986). A ce sujet, les travaux des deux chercheurs australiens Newman P., Kenworthy J. (1989) apparaissent sans équivoque : densité des agglomérations et consommation de carburant pour les transports de personnes sont intimement liés. Cependant, que se serait-il passé si la périurbanisation n'avait pas eu lieu ? Quel sont les gains potentiels qu'une politique de la ville compacte aurait pu permettre de réaliser ? Dans cette section, nous nous sommes penchés sur la quantification des effets attendus d'une politique de ville compacte visant à réduire les consommations énergétiques liées à la mobilité des ménages.

Dans un premier temps, nous effectuons une analyse de type *ex post* à l'échelle régionale en se basant sur les travaux de M. Breheny (1995) en Angleterre ainsi que sur la hiérarchie des communes de Van Hecke (1998). L'objectif de cet exercice est de répondre à la question : quels sont les comportements de mobilité qui ont un impact environnemental limité ? Le principe général est donc de confronter les consommations « réelles » et les consommations « idéales » à différentes échelles afin de déterminer, *in fine*, les économies de CO₂ qui auraient pu être réalisées. La première analyse, « évolution uniforme », estime les gains d'énergie dans l'hypothèse où la croissance démographique avait évolué de manière constante sur l'ensemble du territoire wallon. La deuxième, « taux le plus faible », évalue la consommation énergétique totale des déplacements domicile-travail en Wallonie si chacune des entités consommait autant d'énergie que l'entité la plus économe.

Dans un deuxième temps, nous démontrons que l'analyse de M. Breheny selon le découpage régional d'E. Van Hecke ne tient pas compte des particularités locales qui, pourtant, recèlent des gains potentiels importants. Nous proposons un scénario plus réaliste en proposant une analyse locale à l'échelle des secteurs statistiques, puis des noyaux d'habitat.

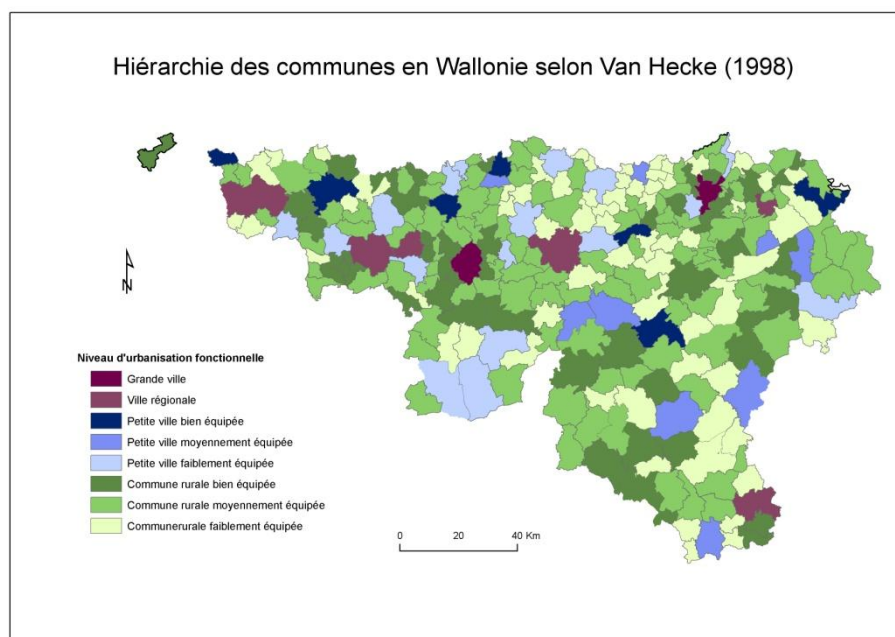
3.2.2 Evaluation ex-post des émissions de GES

3.2.2.1 Analyse « évolution constante »

La démarche de M. Breheny (1995) adaptée pour la Wallonie consiste tout d'abord à découper le territoire wallon en sous-ensembles d'unités administratives caractérisées par une morphologie semblable. Pour effectuer ce zonage, nous avons choisi d'utiliser la hiérarchie des communes de Van Hecke (1991). Cette classification a pour avantages de refléter le niveau d'urbanisation fonctionnelle des communes (carte 1, annexe I). La détermination des catégories se base sur deux méthodes. La première est une enquête auprès des ménages de toutes les communes de Belgique²², sondant leur orientation par rapport aux commerces et services. La deuxième est la détermination d'un niveau d'équipement global en fonction de la présence de fonctions urbaines. Ce dernier repose sur le degré de développement des équipements pour huit fonctions spécifiques, qui est calculé sur la base de plusieurs indicateurs : soins de santé et services sociaux ; sport ; loisirs et horeca ; transports ; services avec guichet ; services publics ; culture ; enseignement ; commerce de détail. Pour être retenue comme ville, il faut que le niveau d'équipement atteint dans une commune soit suffisant, qu'il soit atteint pour un grand nombre de fonctions, et que le noyau urbain soit d'une grande taille. Les flux doivent par ailleurs provenir aussi d'autres communes que la commune en question (Van Hecke et al. 2009). Un tel découpage spatial permet en quelque sorte de regrouper les communes wallonnes de la plus « urbaine » à la plus « rurale ».

Par ailleurs, dans le cadre de cette analyse, on recourt à un découpage en vastes sous-ensembles formé des entités communales. On masque donc une forte hétérogénéité spatiale interne à chaque commune. Or, cette hétérogénéité caractérise également les comportements de mobilité propres à chaque quartier et les évolutions démographiques qui les caractérisent. Dans la présente analyse, on ne s'intéresse donc qu'aux comportements de mobilité moyens de ces vastes sous-ensembles et aux évolutions démographiques moyennes qu'elles ont connues.

Figure 19. Hiérarchie des communes en Wallonie selon Van Hecke (1998)



²² Enquête financée par le FWO, une collaboration entre l'Institut voor Sociale en Economische geografie de la KULeuven et l'Institut de géographie de l'Université de Liège.

Les consommations énergétiques selon le type de région urbaine sont ensuite calculées en se basant sur l'indice de performance énergétique de K. Boussauw et F. Witlox (2001) et le calcul des consommations et des émissions spécifiques présentés au point 3.2 de ce rapport. Nous ne reviendrons donc pas sur les aspects méthodologiques du calcul des performances environnementales des déplacements domicile-travail. Rappelons cependant que nos chiffres représentent des consommations énergétiques ou des émissions d'équivalent CO₂ moyennes pour un navetteur effectuant un trajet aller simple de son domicile vers son lieu de travail (cfr tableau 13). Les tableaux 14 et 15 mettent en évidence la moyenne des distances parcourues et la part modale (deux facteurs essentiels dans l'évaluation des performances des navetteurs) selon le type de région considérée.

Tableau 13. Performance environnementale des déplacements domicile-travail en Wallonie selon le type de régions (2001)

	kWh/pers.	kgeq. CO ₂ /pers.
Grande ville (GV)	7,5	1,9
Ville régionale (VR)	8,7	2,2
Petite ville bien équipée (PVBE)	8,1	2,1
Petite ville moyennement équipée (PVME)	9,5	2,4
Petite ville faiblement équipée (PVFE)	9,7	2,5
Commune rurale bien équipée (CNUBE)	9,5	2,4
Commune rurale moyennement équipée (CNUME)	10,6	2,7
Commune rurale faiblement équipée (CNUFE)	11,8	3,1
Wallonie	9,6	2,5

Calculé sur base de: INS 2001; AWAC 2010; IWEPS 2007; SRWT 2010; ICEDD 2009; Electrabel 2006, 2007; Van Hecke (1998)

Tableau 14. Distances moyennes parcourues par navetteur et par trajet en Wallonie selon le mode de transport et le type de région (2001)

	Voiture individuelle	Moto, scooter	Bus, tram, métro	Train	Vélo	Marche à pied	TOTAL
GV	19,6	11,4	10,6	60,6	5,4	1,9	19,2
VR	22,1	11,1	11,6	56,5	5,1	1,9	22,5
PVBEa	20,9	10,8	16,5	48,4	4,3	1,9	21,3
PVMEb	24,9	10,3	23,2	46,3	3,5	1,7	24,4
PVFEc	24,5	12,0	16,3	44,1	4,5	1,8	24,3
CNUBEA	23,6	11,9	15,0	49,3	4,7	1,8	23,5
CNUMEB	25,7	12,9	18,0	50,4	4,7	1,7	25,6
CNUFEC	28,4	14,6	22,4	54,1	4,8	1,7	28,6
Wallonie	24,1	12,1	14,4	50,7	4,7	1,8	24,0

Calculé sur base de: INS 2001; AWAC 2010; IWEPS 2007; SRWT 2010; ICEDD

2009; Electrabel 2006, 2007; Van Hecke (1998)

Tableau 15. Part modale des navetteurs wallons selon le mode de transport et le type de région (2001)

	Voiture individuelle	Moto, scooter	Bus, tram, métro	Train	Vélo	Marche à pied
GV	72,8	1,7	11,3	5,4	0,9	7,9
VR	76,3	1,9	5,6	8,1	1,3	6,7
PVBEa	75,6	2,5	1,9	9,7	2,4	7,9
PVMEb	75,4	1,8	1,7	10,6	1,5	9,1
PVFEc	79,2	2,0	3,3	9,2	1,2	5,2
CNUBEA	80,6	1,9	4,2	7,1	1,1	5,1
CNUMEB	84,6	2,0	2,7	5,9	1,0	3,8
CNUFEC	86,2	1,6	1,8	6,3	1,1	3,1
Wallonie	80,2	1,9	4,1	7,2	1,2	5,4

Calculé sur base de: INS 2001; AWAC 2010; IWEPS 2007; SRWT 2010; ICEDD 2009; Electrabel 2006, 2007; Van Hecke (1998)

Ensuite, les régions sont classées en fonction de leurs consommations et mise en relation avec l'évolution de la population entre 1970 et 2001.

Une période de 30 ans se justifie par le fait que l'aménagement du territoire agit généralement sur le moyen terme. Une telle durée semble donc raisonnable si on prend en compte le temps nécessaire à la mise en place d'une politique de densification de l'urbanisation.

La période choisie correspond à une époque charnière de la périurbanisation. L'exode rural se stabilise dans les communes rurales les plus isolées et les communes au passé industriel se voient peu à peu désertées de leurs habitants en faveur de communes périphériques aux grandes villes du sillon wallon (Mons, Charleroi, Liège, Verviers) ou plus rurales. L'évolution de la population selon la hiérarchie des communes de Van Hecke (1998) confirme cette tendance. Liège et Charleroi déclinent et les villes régionales (Namur, Verviers, Tournai, etc.) stagnent alors que les villes de taille moyenne et les communes rurales sont en forte croissance (jusqu'à 31% pour les petites villes moyennes moyennement équipées comme Braine l'Alleud ou Malmedy par exemple).

Tableau 16. Changement de la population 1970 - 2001

	POP 70	POP 01	2001 - 1971	%
GV	479762	384993	-94769	-19,8
VR	418669	417908	-761	-0,2
PVBEa	161514	187257	25743	15,9
PVMEb	94752	124739	29987	31,6
PVFEc	340630	374600	33970	10,0
CNUBEA	741769	760294	18525	2,5
CNUMEB	704909	834331	129422	18,4
CNUFEC	217220	270589	53369	24,6
Wallonie	3159225	3354711	195486	6,2

Source: INS 2001, 2010

L'analyse « évolution constante » consiste à répartir la croissance de la population observée entre 1970 et 2001 de manière uniforme dans chaque type de région. Une fois que cette population « idéalement répartie » sur le territoire est obtenue, les navetteurs et leurs consommations respectives sont déduits sur base de la proportion d'actifs qui se déplacent vers un lieu de travail fixe en 2001. Il nous reste alors à comparer les gains énergétiques potentiels qui auraient pu être réalisés si les différences dans les taux moyens d'évolution de la population par sous-ensembles liées à la périurbanisation n'avaient pas existé.

Tableau 17. Part des actifs occupés qui se déplacent vers un lieu de travail fixe (navetteurs) en 2001

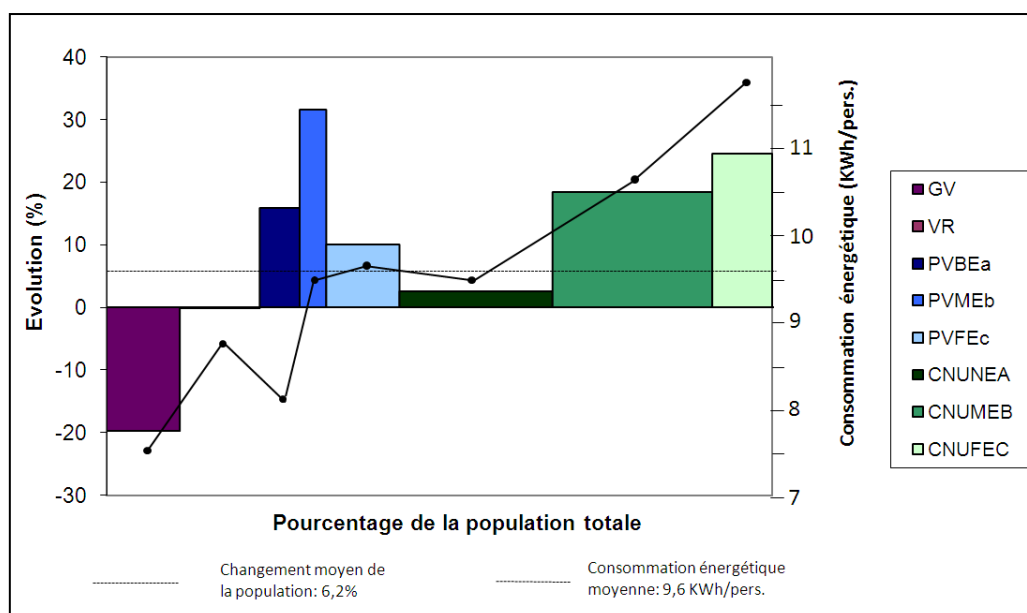
	Navetteurs	Part de la population active (%)
GV	100061,1	26,0
VR	124036,7	29,7
PVBEa	61986,0	33,1
PVMEb	40351,4	32,3
PVFEC	112059,7	29,9
CNUBEA	224970,6	29,6
CNUMEB	263481,0	31,6
CNUFEC	89618,7	33,1
Wallonie	1016565,3	30,3

Source: INS 2001

Résultats

Le croisement de la croissance de la population entre 1970 et 2001 avec les consommations énergétiques moyennes par navetteur met tout d'abord en lumière que les régions accusant les plus fortes croissances démographiques sont aussi caractérisées par de fortes consommations énergétiques liées aux longs déplacements en voiture. Les petites villes faiblement équipées et les communes rurales moyennement et faiblement équipées sont tout particulièrement touchées par ce phénomène. Soit périphériques aux agglomérations, soit rurales, ces communes accueillent des travailleurs parcourant des distances supérieures à la moyenne régionale (respectivement 24,5, 25,7 et 28,4 km contre 24,1 km pour la Wallonie) et utilisant en plus forte proportion qu'ailleurs la voiture (la part modale de la voiture atteint 86,2 pour les communes rurales faiblement équipées).

Figure 20. Changement de la population entre 1970 et 2001 en Wallonie selon la hiérarchie des communes de Van Hecke (1998) et consommations énergétiques liées aux déplacements domicile-travail



Auteur : CPDT, Lepur – ULg. Calculé sur base de: INS 2001, 2010; AWAC 2010; IWEPS 2007; SRWT 2010; ICEDD 2009; Electrabel 2006, 2007; Van Hecke (1998)

L'analyse « évolution constante » démontre qu'une faible quantité d'énergie aurait pu être économisée si la population totale de chaque région avait évolué de manière similaire dans chacune des régions du territoire wallon. En effet, en appliquant le taux de croissance démographique moyen de la Région wallonne (6,2%) à chaque commune, la différence entre les consommations idéales et les consommations réelles ne s'élève qu'à 209,1 TWh par trajet, soit une diminution 2,1% par rapport à la quantité totale d'énergie consommée par les navetteurs pour les déplacements domicile-travail en 2001.

Tableau 18. Estimation des gains énergétiques si la croissance démographique de chaque région avait été similaire au taux de croissance régional entre 1970 - 2001²³

	1. Navetteurs en 2001	2. Consommation énergétique (kWh/pers /trajet)	3. Total de l'énergie consommée (kWh)	4. Navetteurs en 2001 "non périurbanisés" depuis 1970	5. Total de l'énergie consommée par les navetteurs "non périurbanisés" (kWh)	6. Différence entre consommation réelle et consommation idéale	7. Différence en %
GV	100061,1	7,5	748640,0	132407,6	990650,8	242010,8	32,3
VR	124036,7	8,7	1074117,9	131951,7	1142658,9	68541,1	6,4
PVBEa	61986,0	8,1	502388,5	56772,8	460136,2	-42252,4	-8,4
PVMEb	40351,4	9,5	381764,8	32547,7	30733,2	-73831,6	-19,3
PVFEc	112059,7	9,7	1084825,3	108203,0	1047489,0	-37336,3	-3,4
CNUBEA	224970,6	9,5	2128724,6	233070,6	2205368,4	76643,8	3,6
CNUMEB	263481,0	10,6	2786250,7	236384,3	2499708,8	-286541,9	-10,3
CNUFEC	89618,7	11,8	1059896,0	76394,6	903498,6	-156397,4	-14,8
Wallonie	1016565,3	-	9766607,8	1016565,3	9557444,0	-209163,8	-2,1

Auteur : CPDT, Lepur – ULg. Calculé sur base de: INS 2001, 2010; AWAC 2010; IWEPS 2007; SRWT 2010; ICEDD 2009; Electrabel 2006, 2007; Van Hecke (1998)

En termes d'émissions de CO₂, si la croissance démographique de chaque région avait été similaire au taux de croissance régional entre 1970 et 2001, cela aurait permis d'économiser en moyenne au total 27,7 kteq.CO₂ par an²⁴, soit 0,5% de la quantité de GES émise par les le transport terrestre de voyageurs en 2007 (5157,5 kteq. CO₂).

Rappelons que ce chiffre ne mesure que la périurbanisation des habitants et son impact par rapport aux déplacements domicile-travail uniquement. Les effets de la périurbanisation de l'emploi, du commerce, des lieux de loisirs et de certaines écoles et leurs impacts sur les autres motifs de déplacements, ne sont pas pris en compte dans l'analyse.

Par ailleurs, l'évaluation présentée ci-dessus considère les comportements de mobilité comme étant constants dans le temps. Or, les comportements de mobilité étaient très certainement moins énergivores en 1970, ce qui aurait pour conséquence d'atténuer l'impact CO₂ des comportements de mobilité des navetteurs.

²³ Les opérations effectuées dans chacune des colonnes sont les suivantes :

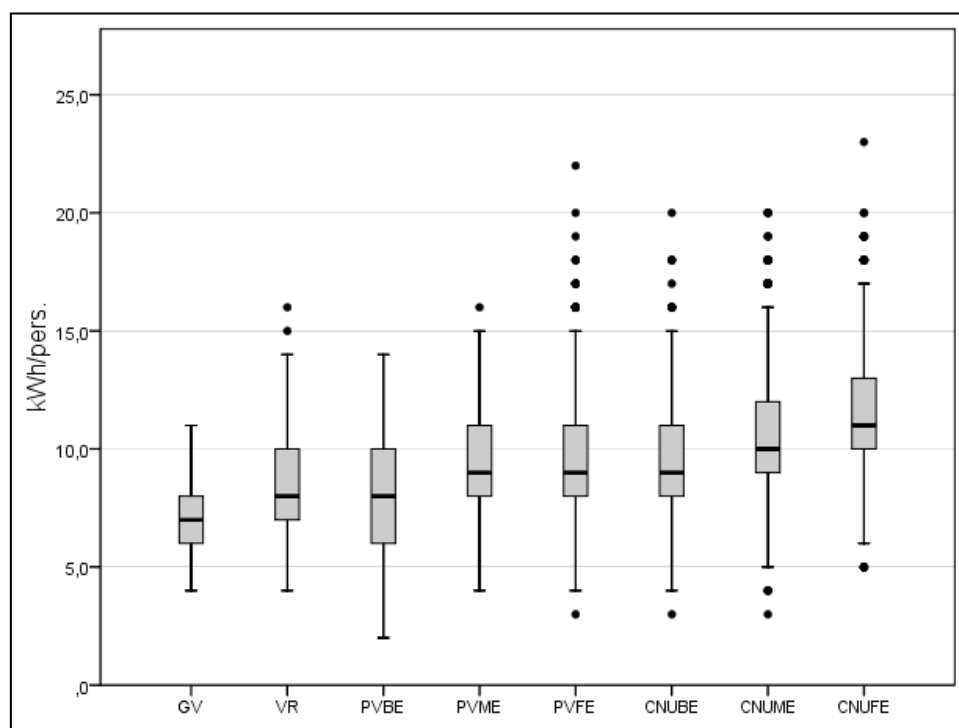
1. Population active occupée qui se déplace vers un lieu de travail fixe en 2001
2. Données issues du tableau 13
3. [Colonne 1] x [Colonne 2]
4. Population en 1970 multipliée par le taux de croissance régional (+ 6,2 %) et la part de navetteurs dans chaque type de région (cfr tableau 16) ; c'est-à-dire une estimation de la population si il n'y avait pas eu de périurbanisation.
5. [Colonne 1] x [Colonne 4]
6. [Colonne 5] - [Colonne 3]
7. [Colonne 6] / [Colonne 3] *100

²⁴ 54,8 Teq.CO₂ * 2 (trajet aller-retour) * 253 (jours ouvrables en Wallonie – Hubert et Toint 2002)

De plus, les résultats de l'analyse sont fortement dépendants du découpage spatial sur base duquel les données ont été agrégées. Découper le territoire wallon selon la hiérarchie urbaine de Van Hecke (1998) revient à regrouper dans une même catégorie des communes qui ont des caractéristiques géographiques fort différentes. Dans le cas des communes non urbaines bien équipées par exemple, des communes rurales éloignées des grands centres urbains tels que Durbuy ou Bertrix sont considérées au même titre que des communes d'agglomération telles que Herstal ou Chatelet. Or, les comportements de mobilité peuvent varier fortement en fonction de la distance à un grand centre urbain. Dès lors, une analyse à plus grande échelle et une révision des classifications des entités spatiales à étudier sont absolument nécessaires afin d'évaluer les variations spatiales des émissions de gaz à effet de serre de manière pertinente.

Le diagramme suivant met en évidence la variation de l'indice de performance énergétique par secteur statistique selon la hiérarchie des communes de Van Hecke (1998). Malgré l'augmentation régulière de la moyenne pour chaque région, l'écart entre le 5^e et le 95^e centile reste élevé. De telle manière qu'un secteur statistique au sein d'une commune rurale (CNUBE, CNUME, CNUFE) peut avoir une meilleure performance qu'un secteur statistique d'une ville régionale (VR) malgré son positionnement dans la hiérarchie de Van Hecke (1998). Au sein de chaque région, il existe donc systématiquement des quartiers où résident des travailleurs ayant des comportements de mobilité peu consommateur d'énergie.

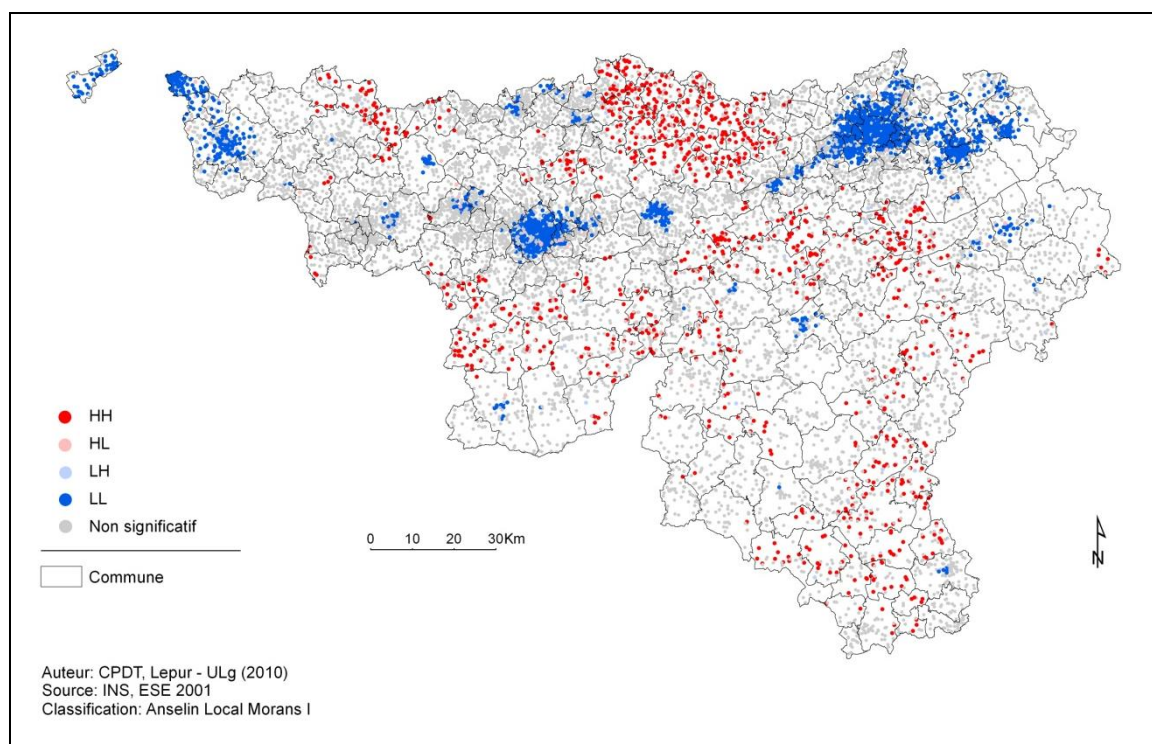
Figure 21. Variation de l'indice de performance énergétique des secteurs statistiques selon la hiérarchie des communes de Van Hecke (1998)²⁵



²⁵ Trait noir = moyenne ; rectangle gris = écart-type ; trait = écart entre le 5^e et 95^e centile ; point = valeurs max/min

En complément, la figure 22 met en évidence des groupements locaux de secteurs statistiques (convertis en points) où peu de kWh sont consommés par navetteur. LL, pour *low-low*, signifie qu'un secteur de valeur significativement faible (bonne performance énergétique) est entouré d'un ou plusieurs secteurs avec une valeur également significativement faible. HH, pour *high-high*, signifie qu'un secteur ayant une mauvaise performance est entouré d'un ou plusieurs secteurs également peu performants. HL signifie qu'un secteur peu performant est entouré d'un ou plusieurs secteurs très performants, et inversement pour LH. Les secteurs statistiques avec de bonnes performances énergétiques ne sont donc pas anecdotiques. Des groupements de secteurs statistiques performants existent et cela bien au-delà des limites du découpage de la hiérarchie de Van Hecke. Dans la région de la basse Meuse par exemple, on observe une continuité de secteurs performants d'Amay à Visé. Ceci souligne donc que la hiérarchie de Van Hecke (1998) ne permet pas de juger à elle seule de la bonne ou la mauvaise performance environnementale des comportements de mobilité des travailleurs. En effet, la proximité d'un logement par rapport à une infrastructure de transport (ou à de l'emploi) et la densité d'un quartier au sein d'une ville sont des paramètres qui influencent ces performances, mais ils se mesurent généralement à l'échelle du quartier. Une analyse fine est donc nécessaire afin de déceler les gains potentiels à l'échelle locale.

Figure 22. Agrégation de secteurs statistiques dont les déplacements domicile-travail sont peu performants ou très performants



3.2.2.2 Analyse « taux le plus faible »

a) Approche régionale

L'analyse « taux le plus faible » permet d'évaluer les gains énergétiques potentiels dans l'hypothèse où les navetteurs adoptaient des comportements de mobilité faiblement émetteurs de GES. Dans cette première analyse, les comportements de référence sont ceux correspondant à la moyenne des navetteurs des grandes villes de Liège et de Charleroi. Comme détaillé dans le tableau 14 ci-dessus, les distances parcourues en voiture y sont moins élevées que la moyenne régionale. La part modale de la voiture y est réduite en faveur du bus et du métro.

L'indice diminue de 9,6 kWh/pers.-trajet (moyenne régionale) à 7,5 kWh/pers.-trajet, ce qui permet d'améliorer les performances énergétiques de 21,9%. En ce qui concerne la quantité totale d'énergie dépensées, des économies de 22,1% auraient pu être réalisées si les navetteurs s'étaient comportés comme dans les villes de Liège et Charleroi. Etant donné la faible performance des communes rurales, ce sont ces régions qui feraient les gains les plus importants (jusqu'à 36,7% d'économie pour les communes rurales faiblement équipées).

Tableau 19. Estimation des gains énergétiques si toutes les régions avaient un taux de consommation égal à celui de la région au taux de consommation le plus faible²⁶

	1. Navetteurs en 2001	2. Consommation énergétique (kWh/pers-trajet)	3. Total de l'énergie consommée (kWh/trajet)	4. Taux de consommation le plus faible (kWh/pers-trajet)	5. Total de l'énergie consommée sur base du taux de consommation le plus faible (kWh/trajet)	6. Différence entre consommation réelle et la consommation la plus faible	7. Pourcentage de différence entre la consommation réelle et idéale
GV	100061,1	7,5	748640,0	7,5	748640,0	0,0	0,0
VR	124036,7	8,7	1074117,9	7,5	928021,2	-146096,7	-13,6
PVBEa	61986,0	8,1	502388,5	7,5	463768,4	-38620,1	-7,7
PVMEb	40351,4	9,5	381764,8	7,5	301902,4	-79862,3	-20,9
PVFEc	112059,7	9,7	1084825,3	7,5	838411,0	-246414,2	-22,7
CNUBEA	224970,6	9,5	2128724,6	7,5	1683190,5	-445534,1	-20,9
CNUMEB	263481,0	10,6	2786250,7	7,5	1971318,8	-814931,9	-29,2
CNUFEC	89618,7	11,8	1059896,0	7,5	670511,5	-389384,6	-36,7
Wallonie	1016565,3	9,6	9766607,8	-	7605763,854	-2160844,0	-22,1

Calculé sur base de: INS 2001; AWAC 2010; IWEPS 2007; SRWT 2010; ICEDD 2009; Electrabel 2006, 2007; Van Hecke (1998)

En termes d'émissions de CO₂ cela représente une économie de 288,9 kTeq. CO₂ par an²⁷, soit 5,6% de la quantité de GES émise par les le transport terrestre de voyageurs en 2007 (5157,5 kTeq. CO₂).

Dans la réalité, de tels gains d'énergie impliqueraient de développer partout en Wallonie des infrastructures de transport au moins aussi performante que celles de Liège et de Charleroi, de densifier fortement les zones urbanisées, et d'avoir une offre d'emploi suffisante que pour limiter le besoin des travailleurs de se déplacer. Une analyse locale est donc nécessaire afin de lever toutes ces contraintes quelque peu irréalistes.

²⁶ Les opérations effectuées dans chacune des colonnes sont les suivantes :

1. Population active occupée qui se déplace vers un lieu de travail fixe en 2001
2. Données issues du tableau 16
3. [Colonne 1] x [Colonne 2]
4. Consommation énergétique des navetteurs des grandes villes (minimum)
5. [Colonne 1] x [Colonne 4]
6. [Colonne 5] - [Colonne 3]
7. [Colonne 6] / [Colonne 3] *100

²⁷ 571,0 Teq.CO₂ * 2 (trajet aller-retour) * 253 (jours ouvrables en Wallonie – Hubert et Toint 2002)

Rappelons que ce chiffre ne mesure que la périurbanisation des habitants et son impact par rapport aux déplacements domicile-travail uniquement. Les effets de la périurbanisation de l'emploi, du commerce, des lieux de loisirs et de certaines écoles et leurs impacts sur les autres motifs de déplacements, ne sont pas pris en compte dans l'analyse.

b) Approche locale

L'analyse taux le plus faible à l'échelle locale vise à proposer une hypothèse plus proche de la réalité afin d'évaluer les gains énergétiques potentiels liés aux déplacements domicile-travail. La logique est la suivante : que se serait-il passé si les travailleurs avaient adopté les comportements des navetteurs du quartier (ou du village) voisin moins consommateur en énergie le plus proche?

Méthodologie

Pour effectuer l'analyse « taux le plus faible » à l'échelle locale, nous avons procédé à une classification des secteurs statistiques et des noyaux d'habitat en 10 classes de performance énergétique (cfr tableau 19 et 20). Une fois les valeurs réparties par déciles (10 quantiles), l'objectif est de comparer, par classe de performance, l'indice de chaque secteur statistique avec son voisin plus performant le plus proche. Ainsi, le gain énergétique global peut être réévalué en comparant la situation réelle et la situation idéale. Notons que les gains potentiels pour la première catégorie ne sont pas calculés étant donné que celle-ci ne peut être comparée à une catégorie supérieure plus performante. La classification est importante car elle détermine l'amplitude des gains qui vont être potentiellement réalisés : plus il y a de classes, moins les gains seront importants.

Tableau 19. Classement des secteurs statistiques selon les performances énergétiques des déplacements domicile-travail

	kWh/pers.
C1	1,1 - 7,2
C2	7,3 - 8,1
C3	8,2 - 8,9
C4	9,0 - 9,5
C5	9,6 - 10,2
C6	10,3 - 10,9
C7	11,0 - 11,6
C8	11,7 - 12,5
C9	12,6 - 14,0
C10	14,1 - 24,8

Tableau 20. Classement des noyaux d’habitat selon les performances énergétiques des déplacements domicile-travail

	kWh/pers.
C1	5,2 - 8,4
C2	8,5 - 9,3
C3	9,4 - 10,0
C4	10,1 - 10,6
C5	10,7 - 11,1
C6	11,2 - 11,7
C7	11,8 - 12,3
C8	12,4 - 13,3
C9	13,4 - 14,7
C10	14,8 - 23,9

Deux approches sont proposées. L’une selon le découpage des secteurs statistiques, l’autre selon le découpage des noyaux d’habitat. L’échelle des secteurs statistiques est l’unité spatiale la plus désagrégée à laquelle nous pouvons travailler, ce qui permet de fournir une mesure fine des gains énergétiques. Cependant, un inconvénient subsiste en ce qui concerne la fiabilité des résultats obtenus à cette échelle. En effet, dans de trop nombreux cas, les secteurs performants servant de comparaison présentent un nombre de répondants faible. Dans les quartiers peu peuplés périphériques ou industriels peu peuplés, les performances ont tendance à être surévaluées. Nous avons donc cherché à corriger ce biais en utilisant un découpage territorial fin mais quelque peu plus agrégé : les noyaux d’habitat.

Le découpage en noyaux d’habitat a l’avantage de se rapprocher d’avantage de la forme urbaine wallonne : il délimite les zones urbanisées morphologiquement continues, cela en dépassant les limites administratives (Pour plus de détails, voir Van Hecke *et al.* 2009). De plus, ils consistent en une agrégation des secteurs statistiques en ne prenant en considération que ceux dont la population est au moins supérieure à 150 habitants, ce qui permet d’éliminer les erreurs d’interprétation liées au faible nombre de répondants. Notons par ailleurs qu’ils ont le désavantage d’agréger un très grand nombre de secteurs statistiques dans les grandes zones urbaines telles celles de Liège et de Charleroi.

Résultats

A) Découpage territorial selon les secteurs statistiques

Des gains non négligeables pourraient être réalisés si les navetteurs modifiaient sensiblement la façon dont ils se déplacent. En effet, un navetteur qui adopte les comportements de mobilité des navetteurs habitant dans le quartier voisin, et utilisant des modes de transport moins énergivores (généralement sur des moins longues distances), pourrait contribuer à une diminution des dépenses énergétiques pouvant aller jusqu’à 12,2 %. Dans une telle situation, les kilomètres parcourus diminueraient dans tous les cas. La plus forte diminution porterait sur la voiture (-2,7km). La part modale de la voiture diminuerait également (-2,4%) en faveur du bus et du métro (+0,6%) et des modes doux (+1,7).

L’analyse spatiale montre que pour chaque quartier étudié, il existe un secteur statistique où résident des navetteurs se déplaçant de manière moins énergivore à moins d’un kilomètre en moyenne (818 m). Le secteur statistique le plus éloigné se trouve à 17,8 km (commune de Virton). A l’opposé, celui le moins éloigné jouxte le secteur étudié. Une telle proximité met donc en évidence que des gains énergétiques significatifs peuvent être réalisés à l’échelle locale pour autant que les navetteurs parcourent de moins longues distances et

utilisent les alternatives à la voiture.

Tableau 21. Estimation des gains énergétiques si les navetteurs de chaque secteur statistique se comportaient comme ceux quartier voisin plus performant le plus proche

	Situation réelle	Situation idéale	Différence	Évolution (%)
Moyenne des distances parcourues en voiture (km)	25,2	22,5	-2,7	-10,6
Moyenne des distances parcourues à moto ou en scooter (km)	12,6	11,5	-1,1	-8,8
Moyenne des distances parcourus en bus, tram ou métro (km)	15,8	14,4	-1,4	-9,0
Moyenne des distances parcourues en train (km)	50,3	49,0	-1,3	-2,6
Moyenne des distances parcourues en vélo (km)	4,8	4,5	-0,3	-5,8
Moyenne des distances parcourues à pied (km)	1,8	1,8	0,0	-0,4
Moyenne des distances parcourues (tous modes confondu)	25,2	22,4	-2,8	-11,1
Part de navetteurs utilisant la voiture	81,4	79,0	-2,4	-3,0
Part de navetteurs utilisant la moto ou le scooter	1,9	2,1	0,2	12,6
Part de navetteurs utilisant le bus, tram ou métro	3,4	4,0	0,6	18,1
Part de navetteurs utilisant le train	7,6	7,5	-0,1	-1,6
Part de navetteurs utilisant le vélo	1,1	1,3	0,2	18,3
Part de navetteurs utilisant la marche à pied	4,7	6,2	1,5	32,5
Indice de performance des déplacements domicile-travail (kWh/pers.)	10,1	8,9	-1,2	-12,2
Indice de performance des déplacements domicile-travail (geq. CO ₂ /pers.)	2,6	2,3	-0,3	-12,3

A) Découpage territorial selon les noyaux d'habitat

L'analyse « taux le plus faible » à l'échelle des noyaux d'habitat démontre des gains approximativement deux fois plus importants comparés à l'analyse à l'échelle des secteurs statistiques. Mieux encore, ces derniers sont sensiblement meilleurs comparés à ceux observés dans le cas où la population active s'était comportée comme dans les grandes villes de Liège et de Charleroi (21,9%). L'indice de performance énergétique des déplacements domicile travail pourrait diminuer de 23% en Wallonie si les navetteurs adoptaient des comportements de mobilité similaires aux navetteurs des quartiers voisins effectuant des déplacements moins énergivores. A l'échelle régionale toujours, cela impliquerait une diminution de l'utilisation de la voiture (-5,1%). Le bus connaîtrait une forte augmentation des usagers (+5,6%) mais pour des plus petites distances (-7,2km). A l'opposé, le train serait moins souvent utilisé (-2,3%) mais pour des plus grandes distances (+4,7 km). Il existe donc dans chaque commune des noyaux d'habitat où se concentrent de la population et de l'emploi local. Il s'agit de pôles urbains et, en milieu rural, de villages où se concentrent diverses fonctions comme l'administration communale, le commerce, les écoles, etc..

Tableau 22. Estimation des gains énergétiques si les navetteurs de chaque noyau d'habitat se comportaient comme ceux du noyau d'habitat voisin plus performant le plus proche

	Situation réelle	Situation idéale	Différence	Évolution (%)
Moyenne des distances parcourues en voiture (km)	26,4	21,0	-5,4	-20,5
Moyenne des distances parcourues à moto ou en scooter (km)	13,0	11,3	-1,7	-13,0
Moyenne des distances parcourues en bus, tram ou métro (km)	18,8	11,7	-7,2	-38,1
Moyenne des distances parcourues en train (km)	48,0	52,7	4,7	9,7
Moyenne des distances parcourues en vélo (km)	4,6	4,9	0,3	7,4
Moyenne des distances parcourues à pied (km)	1,8	1,9	0,1	6,1
Moyenne des distances parcourues (tous modes confondu)	26,4	20,7	-5,8	-21,8
Part de navetteurs utilisant la voiture	81,1	76,0	-5,1	-6,3
Part de navetteurs utilisant la moto ou le scooter	1,9	1,8	0,0	-1,1
Part de navetteurs utilisant le bus, tram ou métro	2,5	8,1	5,6	225,8
Part de navetteurs utilisant le train	8,7	6,4	-2,3	-26,2
Part de navetteurs utilisant le vélo	1,1	0,9	-0,1	-10,8
Part de navetteurs utilisant la marche à pied	4,7	6,6	1,9	41,0
Indice de performance des déplacements domicile-travail (kWh/pers.)	10,6	8,2	-2,4	-23,0
Indice de performance des déplacements domicile-travail (geq. CO ₂ /pers.)	2,7	2,1	-0,6	-23,3
Densité (hab/ha)	9,3	15,3	6,0	64,9

Dans l'hypothèse où la densité joue un rôle prépondérant dans la réduction des consommations énergétiques, nous avons cherché à évaluer la manière dont évolue la densité brute de population entre la situation réelle et la situation idéale. Ainsi, pour chaque secteur statistique et pour l'ensemble de la Wallonie, nous avons calculé la superficie « idéale » dans laquelle aurait dû se trouver la population. Celle-ci est calculée de manière proportionnelle à la densité brute de population du secteur servant de comparaison:

$$SUP_i = POP_r / DBP_r = POP_r \times SUP_i / POP_r$$

$$DBP_i = POP_r / SUP_i$$

Avec :

SUP_i = Superficie idéale

POP_r = Population réelle

DBP_r = Densité brute de population réelle

DBP_i = Densité brute de population idéale

POP_r = Population réelle

En effectuant cette opération, la densité brute de population wallonne passe de 9,3 hab./ha à 15,3 hab./ha, soit une augmentation de la densité de 65,9% (1,6x la densité actuelle). Bien que certains noyaux d'habitat ont de meilleures performances énergétiques alors qu'ils sont comparés à des noyaux moins denses, la densité des noyaux augmente en moyenne de 35,0%. De tels chiffres laissent présager qu'une politique de densification à l'échelle régionale est nécessaire afin de parvenir à des réductions d'émissions de GES significatives.

c) Comparaison

Finalement, l'analyse *ex post* « taux le plus faible » démontre que des gains énergétiques non négligeables sont réalisables, que ce soit à travers une analyse à l'échelle régionale ou à l'échelle locale (voir tableau 23).

À l'échelle régionale des gains importants sont réalisables si les travailleurs wallons se comportaient comme dans les grandes villes de Liège et de Charleroi. Cependant, malgré l'importance de la densité, des infrastructures de transport et de la présence d'emploi local, pour permettre de réduire les consommations, l'analyse à l'échelle des noyaux d'habitat permet d'argumenter que de petits changements de comportement de mobilité dans un contexte local permettraient d'obtenir des gains aussi importants que ceux réalisables si les navetteurs se comportaient comme dans les deux grandes agglomérations wallonnes.

Les gains moins importants obtenus à l'échelle des secteurs statistiques, alors qu'il s'agit de l'échelle d'analyse la plus fine, s'expliquent par différentes raisons. D'une part, la bonne continuité spatiale de l'indice à cette échelle et la faible agrégation des résultats font que l'amplitude entre deux valeurs est plus faible comparée à l'analyse par noyaux d'habitat où l'amplitude entre les valeurs de l'indice est généralement plus importante. D'autre part, le faible taux de répondants dans certains secteurs engendre des résultats erronés allant à l'encontre de gains potentiels importants. Un seuil supérieur à 10 répondants devrait donc être considéré pour pouvoir valider cette méthode.

Tableau 23. Comparaison des analyses « taux le plus faibles » selon 3 échelles

	Découpage territorial	Evolution de l'indice de performance énergétique des déplacements domicile-travail
Régionale	Hiérarchie urbaine de Van Hecke (1998)	-21,9%
Locale	Noyaux d'habitat	-23,0%
	Secteurs statistiques	-12,2%

3.2.3 Synthèse

La présente section avait pour but de quantifier les effets attendus d'une politique de ville compacte visant à réduire les consommations énergétiques, et donc les émissions de GES, liées des déplacements domicile-travail. Les principaux enseignements retenus sont les suivants :

1. Sur trente ans (1970 – 2001), on observe que les entités ayant une forte croissance de population (petites villes et communes rurales moyennement et faiblement équipées) accusent de fortes consommations énergétiques liées aux déplacements domicile-travail (de 9,7 à 11,8 kWh/pers.-trajet, soit 2,5 à 3,1 g eq. CO₂/pers.-trajet). Ensemble, ces communes au faible niveau d'urbanisation fonctionnelle représentaient en 2001 plus de la moitié du volume total de la population.
2. Par ailleurs, si toute la population active wallonne avait la possibilité de se déplacer, pour ses déplacements domicile-travail, comme dans les grandes villes de Liège et de Charleroi, plus d'un quart des émissions de CO₂ aurait pu être économisé. En termes d'émissions de CO₂, ces gains représentent une économie de 288,9 kT eq. CO₂ par an²⁸, soit 5,6% de la quantité de GES émise par les le transport terrestre de voyageurs en 2007 (5157,5 kT eq. CO₂). Etant donné cette analyse ne tenant compte que de 27 % des distances parcourues de la population wallonne (IWEPS 2008), cela laisse présager d'avantage de gains pour les autres motifs de déplacements. L'échelle régionale de cette analyse ne permet cependant pas de mettre en évidence les gains potentiels à l'échelle locale.
3. A l'échelle des noyaux d'habitats, l'indice de performance énergétique des déplacements domicile travail pourrait diminuer de 23% en Wallonie si les navetteurs adoptaient des comportements de mobilité similaires aux navetteurs des quartiers voisins effectuant des déplacements moins énergivores. Cela impliquerait une diminution des distances moyennes parcourues. La part modale de la voiture serait fortement diminuée (-5,1%). Le bus connaîtrait une forte augmentation des usagers (+5,6%) mais ceux-ci parcourraient des plus petites distances (-7,2km). A l'opposé, le train serait moins souvent utilisé (-2,3%) mais pour des plus grandes distances (+4,7 km). Une intervention à l'échelle locale donnant la possibilité aux navetteurs de changer sensiblement leurs comportements de mobilité permettrait donc de contribuer de manière significative à la réduction des émissions de GES.
4. Dans l'hypothèse où la densité joue un rôle prépondérant dans la réduction des consommations énergétiques, la densité brute de population wallonne, calculée sur base du découpage des noyaux d'habitat, passerait de 9,3 hab./ha à 15,3 hab./ha. La densité augmenterait donc de 65,9%, soit 1,6x la densité actuelle. De tels chiffres laissent présager qu'une politique de densification à l'échelle régionale est nécessaire afin de parvenir à des réductions d'émissions de GES significatives.

²⁸ 571,0 Teq.CO₂ * 2 (trajet aller-retour) * 253 (jours ouvrables en Wallonie – Hubert et Toint 2002)

4. EMISSIONS DE CO₂ ET CONSOMMATIONS ÉNERGÉTIQUES LIÉES AU STOCK BÂTI RESIDENTIEL

4.1 MÉTHODOLOGIE GÉNÉRALE

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 dans l'évaluation des émissions des GES :

- La performance thermique des constructions. Un bâtiment ancien présentera un taux de déperdition énergétique plus élevé qu'une construction récente, en raison des matériaux utilisés et de leur mise en œuvre. Plusieurs paramètres qui influent sur l'aire de la surface de déperdition peuvent néanmoins compenser de manière significative cette faible performance thermique constructive : c'est le cas du taux de mitoyenneté et du taux de surface vitrée. Les mouvements de rénovation, notamment des vitrages, ont également une influence positive sur le parc ancien : un vitrage simple transmet 4 fois plus d'énergie qu'un double vitrage haute résistance.
- La morphologie et 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 équipements et les énergies utilisées : un système de chauffage ancien peut consommer jusqu'à deux fois plus qu'un système récent. Les différents vecteurs énergétiques utilisés n'ont pas la même contribution aux émissions de GES.
- 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 impacte directement les consommations énergétiques.
- L'environnement : les températures extérieures ont une influence directe sur les besoins énergétiques des bâtiments. L'insolation, qui dépend de la localisation et de l'orientation des tissus construits influencent 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 à 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. On construit ensuite les variables dont on présuppose l'influence sur ces besoins en Wallonie. Les consommations énergétiques et les émissions de GES dépendent du croisement des besoins de régulation thermique et d'un système de production, de vecteurs d'énergie. Nous n'intégrons pas les comportements des occupants.

4.1.1 Modélisation des besoins et consommations des stocks résidentiels

4.1.1.1 Revue de la littérature

Comme évoqué ci-dessus, les dépenses énergétiques domestiques sont fonction des caractéristiques du bâtiment, mais pas seulement. Il est également important de tenir compte de la forme du quartier urbain (densité, type de bâtiment), ainsi que d'autres paramètres non-énergétiques dans l'évaluation de la performance environnementale du stock bâti. La consommation d'énergie du stock bâti est sensible à la forme urbaine, ce qui influence de façon significative les émissions de GES totales. Ce rôle de la forme dans la consommation

du stock bâti a été théorisé dans les années 60' et 70' par Lionel March et Philip Steadman, et a été récemment démontré empiriquement.

L'efficacité énergétique de la forme urbaine a tout d'abord été étudiée sous l'aspect des flux de chaleur naturels. Un bâtiment énergétiquement efficient se définit alors selon le rapport entre sa surface exposée au soleil en hiver et sa surface exposée au soleil en été, selon des projections orthographiques à partir du soleil. L'ombrage mutuel des blocs est évoqué et sous-entendu comme variable en fonction de la largeur et du tracé des rues. La forme urbaine constructible qui minimise les pertes de chaleur nettes (après déduction des gains solaires), hors maisons mitoyennes, est celle dont l'image thermique est un cube. Par ailleurs, il est suggéré un agencement des fonctions au sein des blocs en fonction de leur demande/production énergétique (RICKABY 1987). Cependant, il faut signaler que ces impératifs ne tiennent pas compte d'autres contraintes de localisation des activités au sein d'un tissu urbain. La surface exposée du bâtiment a par ailleurs été étudiée en fonction du type de logement (maison mitoyenne, individuelle, appartement, etc.), du rapport superficie de murs extérieurs/superficie au sol, de la superficie du toit et de la superficie vitrée (STEADMAN et BROWN, 1987).

Deux modèles anglais sont destinés à l'estimation de la consommation d'énergie à l'échelle urbaine (BERNAL 2007) : Solar Energy Planning (SEP), logiciel développé par l'université de Montfort, Barnet Council et BDSP Partnership et le modèle Energy and Environmental Prediction Model (EEP), qui a été développé par l'Université de Cardiff et l'Engineering and Physical Science Research Council avec la collaboration de l'Université de Monfort.

Ce dernier modèle estime la consommation énergétique et les émissions de CO₂ sur base de données fournies par un Système d'Information Géographique. Il est subdivisé en cinq sous-modèles (usages de l'énergie domestique, non-domestique, industriel, pour le transport, et pollution et santé) dont celui destiné à l'estimation de la consommation du secteur résidentiel utilise les logiciels testés par le BRE (Building Research Establishment), créateur de la méthode BREEAM évoquée plus haut. La méthode a été appliquée sur la ville de Leicester (JONES *et al.*, 2001). Après collecte des informations existantes et leur complétion par des enquêtes de terrain, les bâtiments ont été classés en fonction de leur consommation d'énergie, qui dépend de :

- leur *forme* : surfaces du rez-de-chaussée, de la façade, rapport des surfaces murs/fenêtres, nombre et hauteur des étages, surface exposée, type de maison (isolées, semi-isolées, d'extrémité et mitoyennes) ;
- leur *âge* : avant 1919, 1919-1944, 1945-1964, 1965-1980 et après 1980.

En ce qui concerne le sous-modèle non-domestique, les bâtiments ont aussi été classés selon leur usage (bureaux, hôpitaux, hôtels, écoles, etc.). Les déperditions de chaleur sont ensuite calculées d'après la géométrie (dérivée des variables de forme) et le coefficient de transmission U des parois (dérivé de l'âge du bâtiment). Les hypothèses de calcul sont que tous les logements ont des chaudières à gaz, que l'énergie électrique est utilisée pour l'éclairage et les appareils ménagers, et que cette dernière est estimée sur base de moyennes nationales (JONES *et al.*, 2001).

4.1.1.2 Les approches bottom-up récentes

Typologie de quartiers et consommation énergétique – étude de cas : l'Île-de-France (MAÏZIA 2008):

En 1995, une typologie des quartiers urbains a été réalisée spécifiquement pour la région Île-de-France (BORDES-PAGES 1995). Ces derniers sont caractérisés par trois valeurs : La hauteur moyenne (exprimée en nombre de niveaux), le Coefficient d'Emprise au Sol (CES) : (Il peut être assimilé au rapport entre la superficie bâtie au sol et la superficie totale de l'îlot) et la densité (la densité se calcule ici en multipliant le CES par le nombre de niveaux). Les résultats ont montré que la densité ne permet pas à elle seule de classer chacun des échantillons dans une catégorie précise, et que les trois indicateurs chiffrés décrits ci-dessus ne traduisent pas la qualité et la diversité des caractéristiques propres à chaque quartier (BORDES-PAGES 1995).

Sur la base de ces travaux typologiques, remis à jour par l'APUR en 2006, les travaux de l'équipe de recherche dirigée par Maizia (MAÏZIA 2009) ont pu développer une approche des besoins thermiques et des consommations du stock bâti parisien. Les deux volets (besoins et consommations) sont clairement dissociés, afin de mettre en avant premièrement les impacts thermiques des caractéristiques physiques des tissus puis les impacts des systèmes de production d'énergie. Ces deux volets sont en effet deux leviers distincts d'action.

Les échantillons des travaux de l'APUR ont fait l'objet d'études de cas poussées, afin d'en caractériser les morphologies physiques des édifices et urbaines des tissus. La datation des bâtiments a permis, sur la base des recherches d'Energie-demain, d'appliquer des performances thermiques typiques à chaque tissu. Ces performances sont différenciées suivant le type de parois. L'impact de la forme urbaine en termes de masque solaire, les déperditions par ponts thermiques et par ventilation sont également informés par l'analyse des échantillons.

Cette recherche se base sur les données de l'INSEE pour caractériser le stock bâti global de la région parisienne. Les statistiques INSEE peuvent en effet être analysées à l'échelle des logements. Des enquêtes de terrains menées par l'INSEE permettent de procéder à une validation par échantillonnage des réponses des recensés. Il faut souligner que le parc parisien est essentiellement composé de bâtiment collectif.

Modélisation des potentiels de diminution des consommations énergétiques du stock résidentiel danois (WITTCHEN, 2006) :

Dans le cadre du programme européen ENPER, l'objectif de cette recherche danoise est d'évaluer les potentiels d'économies de consommation énergétique dans le stock résidentiel. La méthodologie employée est de type bottom-up.

Les connaissances nécessaires au calcul de ces potentiels d'économies sont mobilisées à partir de deux bases de données. La première est le registre des constructions (Danish building stock register) qui rassemble pour chaque construction les informations de localisation, de superficie, d'âge du bâtiment, d'usage principal, de matériaux de construction, de systèmes et vecteurs énergétiques principaux. Cette base de données est mise à jour par les collectivités et intègre les informations complémentaires fournies par les propriétaires. Elle est à visée d'imposition. La seconde source est issue des procédures d'étiquetage énergétique obligatoire des bâtiments existants, exploitées au Danemark depuis 1997 (energy labelling scheme for small building : rapports EM). Les informations disponibles sont relatives aux caractéristiques de l'enveloppe (coefficient de déperdition des parois type : murs, toits, planchers et fenêtres), aux consommations quantifiées d'eau et d'énergie. Les informations tirées de l'analyse des rapports EM, sur une période de 10 ans, sont utilisées pour créer des modèles de bâtiments pour sept périodes constructives. Chaque modèle est la résultante moyenne des performances de l'ensemble des bâtiments d'une typologie par période constructive.

Les sept classes d'âges sont : avant 1930, 1931-1950, 1951-1961, 1961-1972, 1973-1978, 1979-1998, 1999-2003. Elles ont été bornées suivant l'évolution connue des modes constructifs d'une part et les dates de mises en œuvre successives des réglementations thermiques au Danemark d'autre part. Ainsi, à chaque groupe sont attribués des valeurs de U (parois et toit), les caractéristiques des vitrages, les systèmes de chauffage, les exigences de ventilation et les combustibles utilisés. Les typologies sont au nombre de 4 : maison individuelle, maison en rangée, maisons de ferme, maison multifamiliale de moins de 1500 m².

Cette modélisation se base donc sur une connaissance fortement désagrégée du stock résidentiel. Les résultats obtenus nous semblent extrêmement pertinents par rapport aux objectifs visés par la région wallonne. En effet une telle recherche permet d'identifier de manière différenciée les leviers d'actions les plus pertinents pour chaque morphologie résidentielle présente sur le territoire. Ainsi au Danemark réduire les consommations énergétiques du stock ancien se révèle être synonyme d'amélioration des qualités d'isolation structurelle, notamment au niveau des murs extérieurs. Autre exemple pour les bâtiments construits entre 1960 et 1970 : les performances énergétiques constructives apparaissent suffisantes. L'amélioration de l'isolation ne sera pas le levier le plus pertinent d'amélioration des consommations énergétiques. En effet le haut taux de consommation énergétique des bâtiments de cette classe d'âge apparaît directement lié à la prédominance du type maison individuelle et donc à la grande superficie chauffée. Une amélioration significative de ce segment se trouve particulièrement dans une diminution de la surface chauffée, ce qui implique un renouvellement immobilier de cette morphologie à favoriser vers l'immeuble collectif

L'application des méthodes bottom-up à la région wallonne pose la question des sources à notre disposition. Une évaluation fine et suivie de l'état des lieux énergétiques du stock bâti, qu'il soit résidentiel ou non, nécessaire à une évaluation future des impacts d'une politique de rénovation ou de structuration territoriale nouvelle, doit être soutenue par une volonté de production de données scientifiques à l'échelle de la région wallonne. Il est sans aucun doute pertinent que les modes de production de ces données soient partagés avec les autres régions. La mise en œuvre récente des étiquetages PEB (performances énergétiques de bâtiment) peut s'avérer une occasion d'élaborer un inventaire normalisé du bâti, basé sur un nombre croissant « d'individus ». Un minimum d'information doit dans ce sens être récolté. Nous renvoyons ici au bilan proposé par K. Wittchen pour l'amélioration des bases de données en vue de l'application des exigences européennes et d'étiquetage des performances des bâtiments

Figure 23. Evaluations futures des potentiels d'économies d'énergie dans les bâtiments existants, propositions d'indicateurs.

Building part	Minimum information to record
Building	Build-up area and heated floor area, number of floors Construction year and year for major renovations Location of the building (climate zone) Recorded energy and water consumption (for comparison with calculations)
Thermal envelope	Type, area and U-value for each opaque construction type Area, U-value and solar energy transmission factors for each transparent element incl. any shading objects Thermal bridges (length/size, transmission coefficient) Thermal storage capacity of the building
Systems	Primary and secondary heating system (incl. efficiencies and location) Ventilation system including an estimate of the ventilation rate Cooling system (incl. efficiencies and location) Heating and cooling distribution systems (pipe length, insulation level, location) Domestic hot water production (incl. location and distribution)
Default values	Internal loads (persons, equipment, lighting, etc) Domestic hot water consumption (based on persons and/or floor area)

Source: Kim B. Wittchen (2006) Heating energy savings in dwellings, Sbi, Danish Building Research Institute, Denmark

4.2 LA DATE DE CONSTRUCTION : UNE INFORMATION CLEF POUR LA MODÉLISATION DES BESOINS ÉNERGÉTIQUES DU STOCK BÂTI RÉSIDENTIEL

Pour évaluer les émissions de GES des bâtiments wallons, nous avons choisi de répertorier chacun d'entre eux dans une famille de référence basée sur un découpage historique. En effet la datation des constructions permet de renseigner une partie des paramètres nécessaires à la modélisation du stock en vue de l'évaluation des émissions de GES. Grâce à la connaissance des modes de mises en œuvre, nous pouvons associer à une période de construction d'un bâtiment, des caractéristiques techniques : chaque époque est caractérisée par des modes constructifs, des matériaux dominants, des types et taux de vitrages spécifiques. Autant de paramètres structurants dans l'analyse des performances thermiques. Cette méthode place l'âge du bâti comme information clef du diagnostic énergétique et diffère des études déjà réalisées en Wallonie.

Notons en effet qu'une approche par typologie de bâtiment, dans le cadre d'un diagnostic énergétique, a déjà été menée spécifiquement pour la Région wallonne. Cette étude, réalisée par le laboratoire LEHR, discerne quatre types de logement (maison unifamiliale, appartement, bâtiment divisé et ensemble collectif) et caractérise le type « maison unifamiliale » par 7 sous-types: maison vernaculaire ancienne, maison villageoise d'entre-deux-guerres, villa des premières extensions urbaines, maison urbaine moyenne, maison ouvrière modeste et maison de type « lotissement ». Cette typologie est une base intéressante de compréhension des évolutions morphologiques de l'habitat en Wallonie.

Au sein de la CPDT, une approche des consommations du chauffage résidentiel²⁹ en Wallonie a précédemment été menée (2005). La méthodologie suivie pour l'évaluation de la consommation au mètre carré des logements est basée ici sur la modélisation, grâce au logiciel Opti-maison, de 3072 types virtuels d'habitations. Ces modèles schématiques théoriques d'habitations reprennent les variations possibles des différentes caractéristiques renseignées par l'Enquête socio-économique de 2001 : 8 catégories d'isolation, 4 catégories de vecteur énergétique, 4 typologies d'habitation, 6 régions climatiques, 2 environnements (urbain ou rural) et 2 tailles (grande ou petite en fonction de la moyenne communale).

Dans la présente recherche, nous n'intégrons pas ces types de classification par typologie morphologique ou échantillonnage théorique non spécifiquement daté, au sein de nos critères de segmentation du parc. Nous avons en effet choisi de développer une méthodologie bottom-up similaire aux travaux récents de Maïzia et Wittchen. Dans ces derniers, les caractéristiques constructives, liées notamment à l'âge du bâti, sont considérées comme déterminantes dans l'évaluation des déperditions énergétiques spécifiques liées à l'enveloppe : déperditions par parois et par ventilation. Pondéré par les variables liées à la morphologie urbaine, à l'environnement climatique, l'ensemble de ces paramètres constitue l'armature de l'évaluation des besoins en régulation thermique du stock résidentiel. Cette évaluation est une étape nécessaire au calcul des émissions de GES du secteur et la mise en place d'un monitoring pertinent. Par une approche bottom-up, nous nous intéressons donc plus particulièrement à un diagnostic du stock bâti en « familles constructives » dans lequel l'âge du bâtiment est le paramètre déterminant de ses caractéristiques thermiques. La méthodologie retenue permet d'identifier des leviers structurants et semble à même d'être un support pertinent de scénarii prospectifs.

4.2.1 Méthode de datation

Nous avons opéré une segmentation du stock de logements par classe d'âge. La datation des bâtiments wallons a été effectuée sur base des informations du cadastre de 2009. En effet au cadastre, à chaque bâtiment est associée une date de construction.

²⁹ CPDT (2005), Contribution du développement territorial à la réduction de l'effet de serre.

Nous n'avons pas ici intégré les changements d'années de constructions informés dans cette base de données. Il est en effet difficile d'évaluer si les travaux effectués sur un bâtiment, et qui ont donné lieu à une actualisation de la date de construction, ont eu des impacts structurels au niveau thermique. La date originale a été conservée comme seule information. Le traitement est réalisé à l'échelle des secteurs statistiques.

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 diffèrent des classes d'âges de l'enquête socio-économique de 2001 ou de l'enquête qualité logement de 2006. 5 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 scandés par l'application des réglementations thermiques en Région wallonne (1985, puis 1996). Les plus récentes réglementations thermiques datent de 2004 et 2006. Nous avons choisi de les intégrer à la dernière classe d'âge, au vu du peu de poids du nombre de logements construits après ces normes par rapport à l'ensemble du stock. Une segmentation dans un second temps de la dernière classe d'âge est rendue aisée par la structure même de la base de données.

4.2.2 Analyse de l'âge du bâti en Wallonie suivant les données cadastrales

Une fois les critères de segmentation historique du parc défini, nous avons analysé le poids relatif de chaque classe dans le stock. Suivant les données cadastrales de 2009, 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).

Tableau 24. Répartition du nombre de logements par classe d'âge en Wallonie.

Périodes constructives	Nombre de logements par période (2009)	Pourcentage de logements par période	Nombre de logements cumulés	Pourcentage de logements cumulés
Avant 1945	786547	52,10 %	786547	52,10 %
1945-1970	280543	18,58 %	1067090	70,69 %
1971-1985	232092	15,37 %	1299182	86,06 %
1985-1996	89254	5,91 %	1388436	91,97 %
1997-2009	121149	8,03 %	1509585	100,00 %

Source : Données extraites de la matrice cadastrale de 2009

Les cartes ci-dessous synthétisent le travail de datation des logements wallons et la répartition spatiale de l'âge des bâtiments sur l'ensemble du territoire wallon. Pour chaque classe d'âge retenue, chaque secteur statistique est nuancé en fonction de la proportion de logements appartenant à ces différentes périodes de construction. Comme le montre les cartes ci-dessous, la répartition spatiale des logements en fonction de leur époque de construction n'est pas homogène. Elle est fortement liée aux différents processus d'urbanisation de la région.

Ainsi, les secteurs statistiques présentant le plus fort taux de logements construits avant 1945 se situent de manière prépondérante dans l'ouest de la région. De manière attendue, 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.

D'après l'atlas du logement, dans les pôles d'urbanisation ancienne, il s'agit principalement de maisons ouvrières à deux travées et deux niveaux, les zones rurales sont caractérisées par l'architecture vernaculaire. L'ouest de la région concentre à cette époque la majorité des logements. On voit nettement se détacher les zones à fort passé industriel.

Figure 24. Répartition spatiale des logements construits avant 1945 : 52,10 % des logements wallons

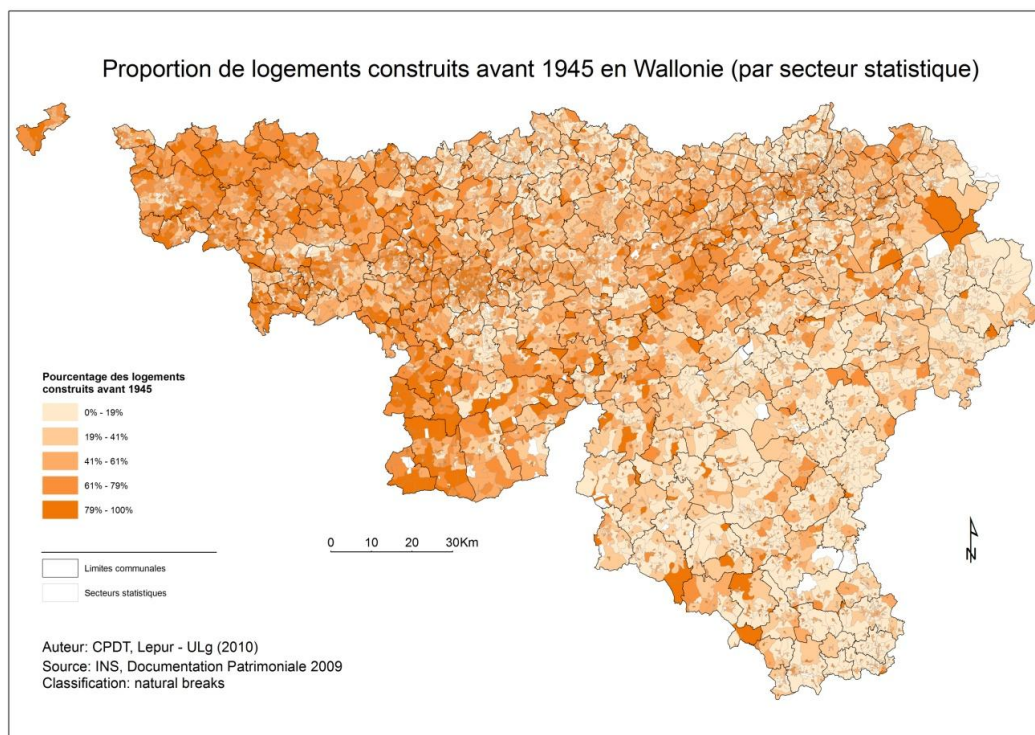
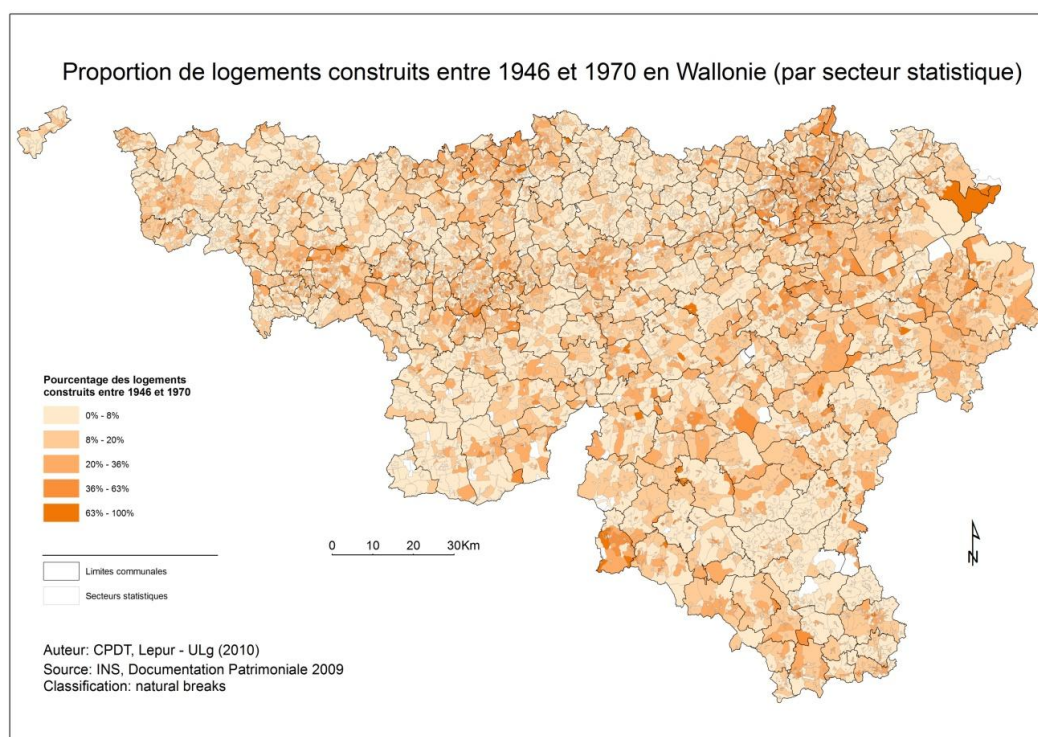


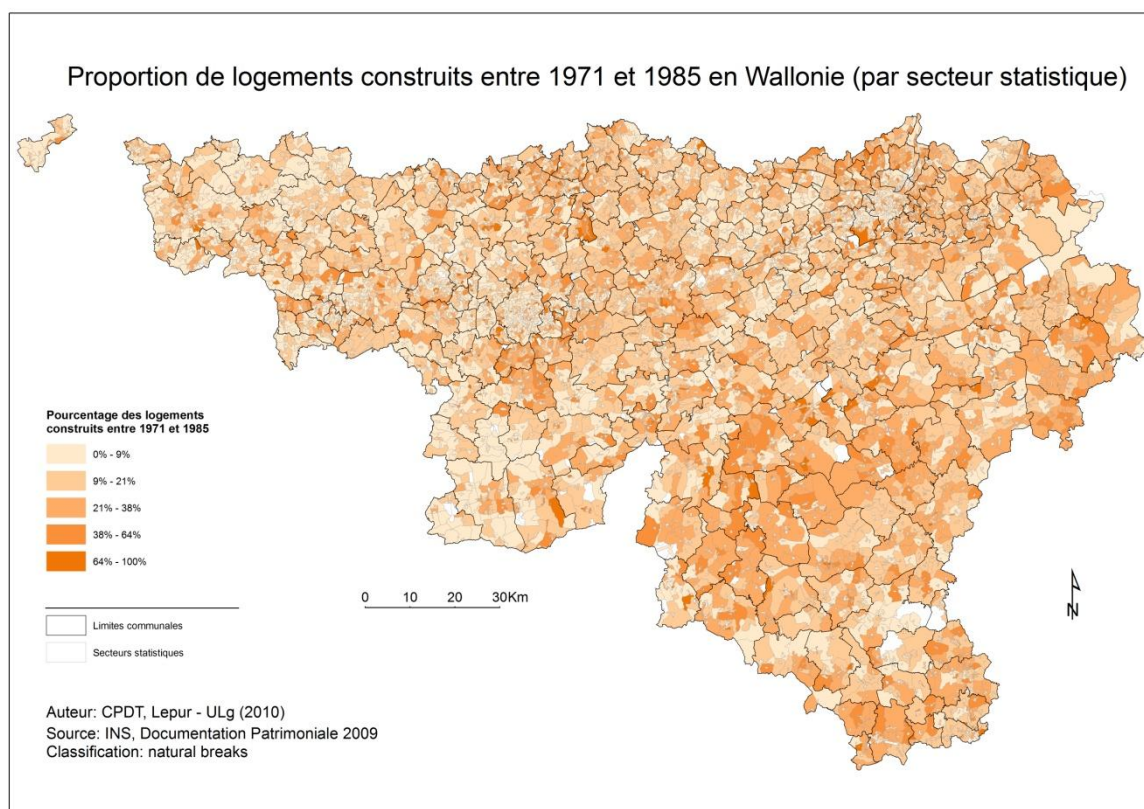
Figure 25. Répartition spatiale des logements construits de 1945 à 1970 18,58 % des logements wallons



La période de 1945 à 1970 est marquée par des dynamiques de construction - reconstruction relativement intenses au sein des agglomérations et en première couronne. L'urbanisation extensive du Brabant wallon, Charleroi, de Namur, de Liège et plus généralement du sillon Sambre-Meuse s'intensifie à cette époque. Il s'agit de la première vague de suburbanisation.

Les informations relayées par ces cartes sont issues de la base de données de 2009. Les zones historiquement bâties de longue date demeurent donc encore aujourd'hui avec un stock résidentiel très ancien.

Figure 26. Répartition spatiale des logements construits de 1971 à 1985 : 15,37 % des logements wallons



La localisation des logements construits après 1970 jusqu'en 1985 traduit le processus d'extension urbaine. Le sud de la région semble héberger fortement la dynamique immobilière de cette période. Les zones traditionnelles d'habitat dont les agglomérations voient se développer leur aire d'urbanisation grâce au phénomène de lotissement dispersé. Les bâtiments de cette époque sont localisés plus loin des pôles centraux.

La carte ci-dessus, comme celles qui suivent soulignent la faiblesse du processus de construction sur elles-mêmes des zones bâties : le renouvellement des logements à l'ouest du pays est très peu marqué, les secteurs statistiques qui présentent le plus fort taux de logements construits après 1970 se situent soit en deuxième couronne des agglomérations, soit en péri urbain.

Après 1985, l'urbanisation diffuse touche l'ensemble du territoire wallon : développement important du brabant wallon, le long de l'axe de périurbanisation de Bruxelles Namur et vers Luxembourg. Le sud-est du pays concentre le plus faux taux de bâtiments construit après la première réglementation thermique. Les effets frontaliers se marquent nettement.

Figure 27. Répartition spatiale des logements construits de 1986 à 1996 : 5,91 % des logements wallons

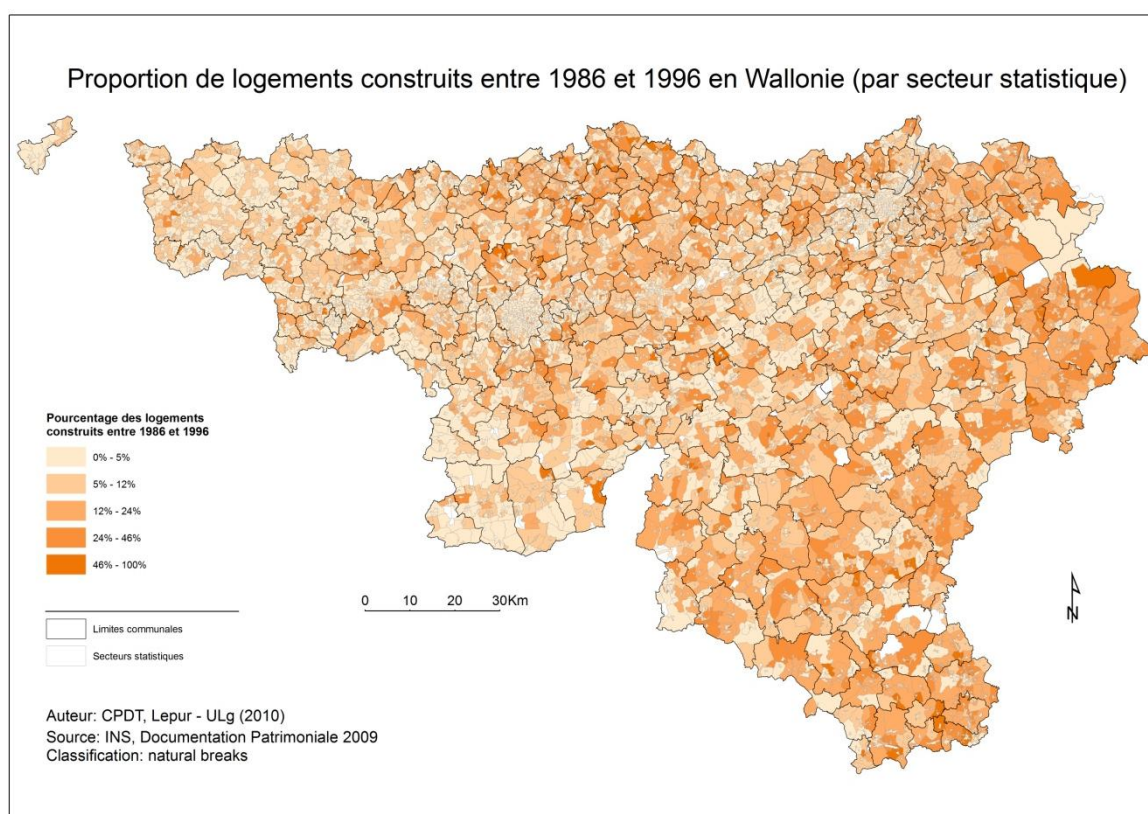
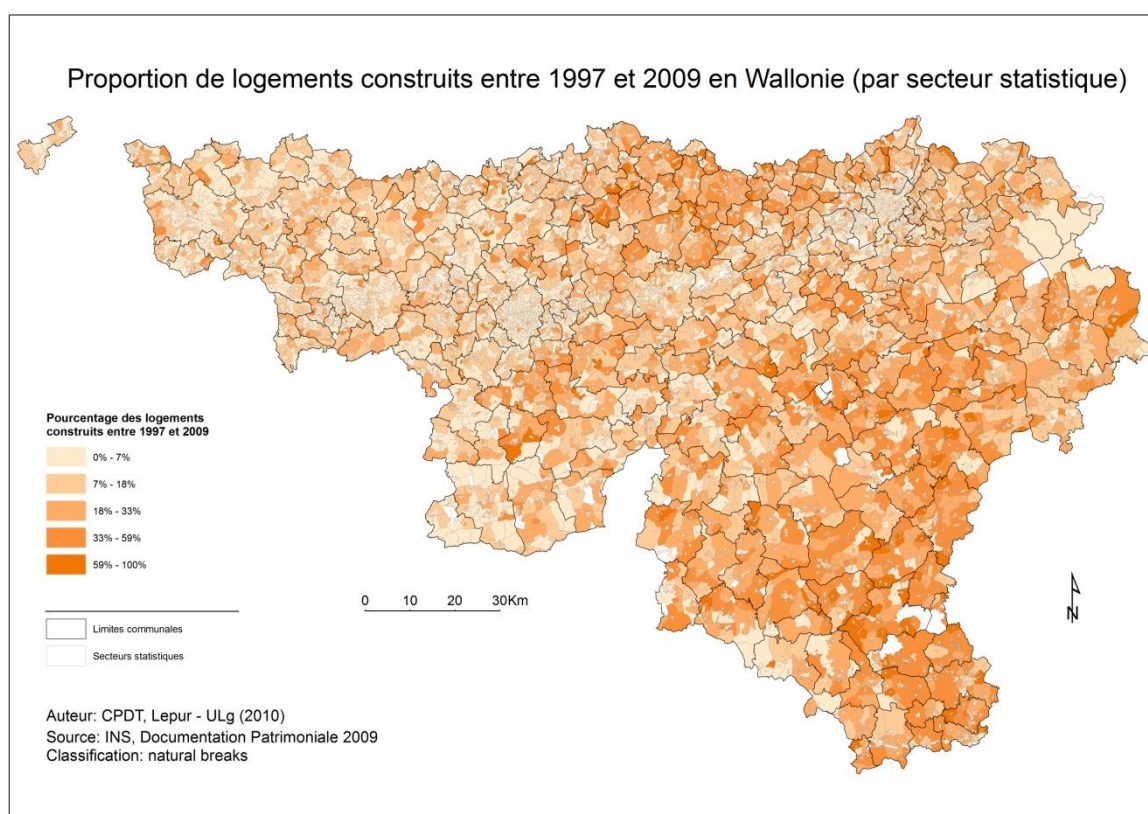


Figure 28. Répartition spatiale des logements construits après 1996 : 8 % des logements wallons



La carte des bâtiments construits après 1996, est très nettement la négative de la carte des logements construits avant 1945. Ces logements représentent 8 % du parc résidentiel. Cette proportion révèle une relance de la dynamique de construction immobilière ces 10 années, par rapport aux dix précédentes. C'est de bonne augure vis-à-vis de l'amélioration des qualités thermiques du parc. Cependant au vu des caractéristiques d'urbanisation, urbanisation en juxtaposition, la problématique du parc ancien demeure préoccupante.

La répartition des logements suivant leurs âges de construction souligne des vulnérabilités intrarégionales fortement spatialisées. Celles-ci peuvent être potentiellement croisées avec les profils socio-économiques des habitants de ces différentes zones.

4.2.3 Les archétypes constructifs

En Belgique, il n'existe pas véritablement d'inventaire des modes constructifs et des matériaux utilisés à chaque époque, à l'image des inventaires de Energie-demain ou de l'équipe ELIOH réalisés sur base des travaux sur les formes urbaines de l'APUR, pour l'Île-de-France. Pour les informations relatives à l'isolation, l'évaluation PEB, obligatoire désormais à chaque vente ou mise en location d'un logement, est trop récente pour constituer un ensemble cohérent de données. Peu de données réelles et fines sont dès lors susceptibles d'alimenter un état des lieux du stock bâti.

Afin de mener à bien une caractérisation du stock par familles constructives, nous avons élaboré des « archétypes constructifs théoriques ». La caractérisation des archétypes est réalisée suivant la caractérisation de 4 éléments structurels (mur extérieur, 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 PEB.

La composition des parois de chaque archétype ne découle pas seulement des modes constructifs initiaux. Une tentative de modélisation des besoins énergétiques du parc ne pourrait être pertinente sans l'intégration des variables de transformations et d'amélioration du stock. Les paramètres d'isolation de chaque type de paroi (murs, vitrages, toitures, planchers) sont intégrés pleinement à cet état des lieux constructifs du stock bâti wallon.

Les informations nécessaires à la caractérisation des archétypes sont issues du croisement de plusieurs sources :

- à l'échelle du secteur statistique, l'enquête socio-économique de 2001 renseigne sur le nombre de logements par typologie d'isolation pour : les murs (isolés ou non), les fenêtres (isolées, isolées partiellement, non isolées), les toitures (isolées ou non) ;
- sur la base d'un échantillon de logements, l'enquête qualité logement de 2006, renseigne pour chaque logement enquêté : l'âge, le niveau d'isolation et l'épaisseur d'isolant de chacun des 4 éléments structurels, de même pour les matériaux et la mise en œuvre ;
- l'expérience et les savoirs liés aux modes constructifs historiques sont aussi convoqués.

Après une première analyse des données du recensement de 2001, il apparaît difficile d'utiliser cette source de manière préférentielle compte tenu de la méthodologie bottom-up retenue dans cette étude. En effet les informations de l'INS ne relient pas les variables de l'âge des bâtiments aux autres informations sur la qualité du logement (isolation, système de chauffage, etc.). L'âge étant une variable structurante pour qualifier le stock bâti, l'enquête qualité logement (EQL) de 2006 est la base de données majeure convoquée pour l'élaboration des archétypes. L'EQL n'étant qu'une enquête partielle de l'ensemble des constructions, l'enquête socio-économique (ESE) de 2001 a été utilisée pour borner les résultats.

4.2.3.1 Hypothèses préalables

- A l'intérieur de chaque classe d'âge, les bâtiments sont considérés comme homogènes.
- Au vu du manque de données reliant le type de bâtiment (bâtiment unifamilial, bâtiment de 2-4 logements, bâtiments de plus de 5 logements) aux modes constructifs dans l'Enquête qualité logement, nous considérons que les modes constructifs sont identiques pour les trois typologies d'habitat (unifamilial, multifamilial < 5logts, multifamilial). Nous appliquons dans un premier temps les caractéristiques des maisons unifamiliales (cette typologie représente plus de 80 % des logements wallons) à l'ensemble du stock.
- Sous la dénomination « murs double » de l'enquête qualité logement, nous entendons « mur massif composite » pour les bâtiments antérieurs à 1945 et « mur creux » pour les bâtiments postérieurs à 1945.
- Nous avons interprété les informations enregistrées sous « béton » de manière différente suivant les classes d'âge : moellon, béton de tout-venant, bloc béton plein, bloc béton creux.
- Les épaisseurs des murs ne sont pas renseignées. Elles ont été définies suivant les habitudes constructives connues des différentes époques.
- Nous avons opté pour l'application d'un coefficient fixe de transmission thermique des linéiques des ponts thermiques (Ψ_j), soit 0,7 (valeur par défaut du logiciel Comfie).
- Pour déterminer les paramètres liés à la ventilation des bâtiments (taux de renouvellement d'air) nous n'avons pu récolter aucune donnée permettant d'évaluer la sensibilité de celui-ci aux périodes constructives. Or la ventilation des logements dépend de leur période de construction. Nous avons choisi de nous appuyer sur les travaux de Maïzia, mené dans le cadre d'une recherche PUCA sur la région Ile-de-France.

Avant la première réglementation thermique, la ventilation est naturelle grâce à la porosité de l'enveloppe bâtie (mauvaise étanchéité) ou à l'action des occupants (ouvertures de fenêtres et portes). La valeur de base retenue dans les diagnostics thermiques est de 0,75 volume par heure. Cette valeur est la valeur par défaut recommandée par la réglementation thermique en vigueur actuellement en Wallonie. Maïzia considère que cette mesure est de nature à défavoriser les logements anciens.

- Les vitrages renseignés partiellement isolés ont été considérés comme correspondant à 50 % de la surface totale vitrée du bâtiment.
- Concernant le taux de vitrage, devant le manque de donnée à notre disposition nous faisons le choix de nous appuyer sur les résultats de travaux scientifiques récents, notamment les travaux de l'équipe de M.Maïzia sur Paris.

Ce choix implique que pour les besoins de cette recherche nous prenons comme hypothèse qu'il existe de grandes similitudes architecturales entre la Région parisienne et la Wallonie pour l'habitat individuel pour la variable du taux de vitrage.

Considérant que l'habitat individuel représente plus de 80 % des bâtiments existant en Wallonie, cette hypothèse semble de nature à permettre la transposition des résultats de l'étude française. Le taux de vitrage avancé par l'équipe française varie de 11 % pour les bâtis les plus fermés datant d'avant 1914 à 27 % pour les bâtis individuels les plus largement vitrés.

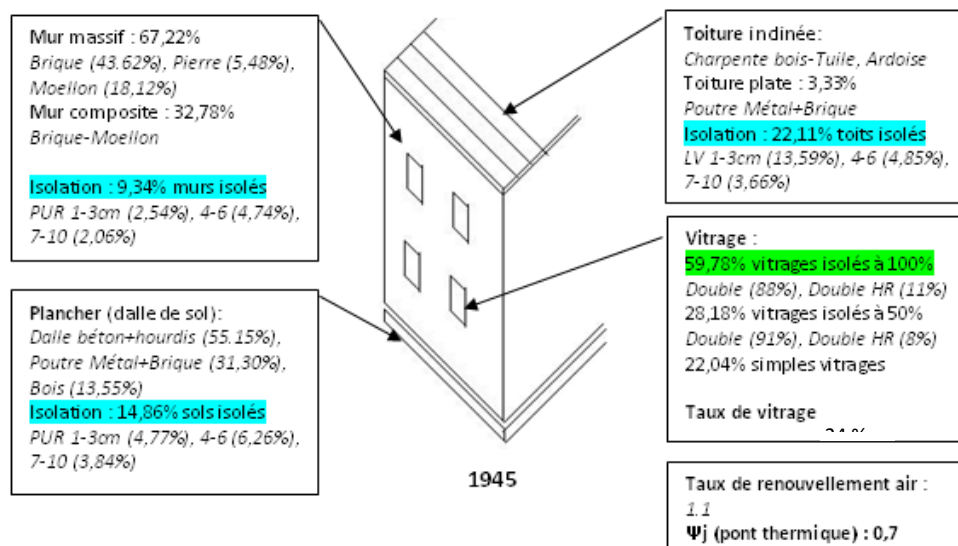
Un approfondissement de ce critère en Wallonie devra être un axe important d'affinement de la présente recherche. Pour ce faire, une étude de terrain semble nécessaire. Celle-ci devra reposer sur un échantillonnage représentatif du parc. Deux méthodes peuvent dès lors être adoptées : soit une analyse à l'échelle de la région wallonne, soit une analyse à l'échelle d'une sous-région dont le parc serait représentatif de l'ensemble du territoire. C'est cette deuxième méthode que Maïzia développe en France, en appliquant à l'ensemble du pays les caractéristiques issues de l'échantillonnage parisien. Soulignons ici qu'un échantillon minimal d'un pour mille correspondrait à la mise en place d'étude de cas sur 1500 bâtiments.

4.2.3.2 Composition des archétypes constructifs suivant les classes d'âges

Les bâtiments, antérieurs à 1945, se caractérisent par une forte dominance de murs massifs en brique, non isolés. Pour les toitures, on observe une très faible présence des toitures plates. Un cinquième des toitures sont isolées de préférence avec une très faible épaisseur d'isolant de laine minérale. Les sols sont principalement renseignés en tant que « dalle béton sur poutrelle hourdis » et très faiblement isolés. Cela peut être soumis à discussion. Etant donné le poids de cette réponse, nous avons choisi de conserver ces caractéristiques dans l'archétype.

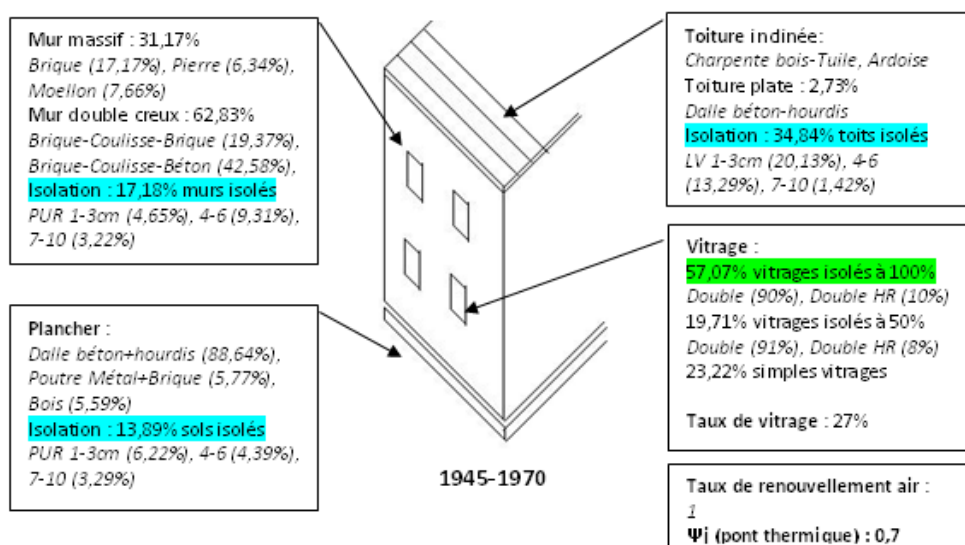
La pénétration des processus de rénovation, bien que soutenue par une politique de prime à la rénovation, demeure faible. Les travaux d'amélioration dans ce segment semblent s'être concentrés sur les vitrages : près de 60 % des vitrages sont isolants, alors que seulement 9 % des murs et 22 % des toitures sont isolés. Après trente ans de prime à la rénovation en région wallonne, ces résultats soulignent une grande inertie du stock ancien en termes d'amélioration énergétique. Durant cette période notons néanmoins que les objectifs des primes à la rénovation n'étaient pas uniquement tournés vers l'amélioration énergétique, mais également sur des questions de salubrité. Les résistances du stock bâti à la rénovation peuvent être expliquées éventuellement par une inadaptation de temps d'investissement vis-à-vis des cycles socio-économiques des ménages ou par la difficulté de mener une rénovation lourde sur des bâtiments occupés. Pour dépasser ce phénomène, une réflexion sur des programmes et donc des processus de financement, réfléchis non plus essentiellement à l'échelle de l'objet, mais à l'échelle des quartiers semblent une voie pertinente. En termes de résultats, il semblerait opportun de mener une évaluation de la pertinence du soutien au processus de rénovation par rapport au processus de substitution. Il nous semble pertinent de mener dans un avenir proche une évaluation des liens entre investissements financiers publics et amélioration du parc privé de logement dans le domaine énergétique.

Figure 29. Caractérisation physique de l'archétype : construction d'avant 1945

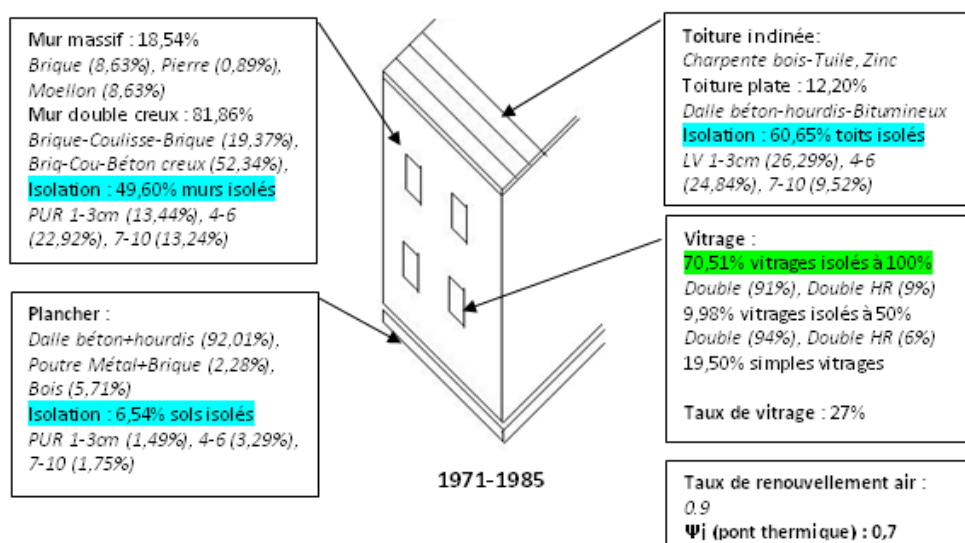


Source : base de données de l'Enquête Qualité logement 2006

Sur la période suivante (1945-1970), on observe une forte diminution des murs de types massifs, et très peu de murs isolés, ce qui corrobore les savoirs historiques : selon eux cette période correspond à la diffusion des premiers murs creux non isolés. Les murs seraient principalement composés d'une paroi de parement en brique, d'une coulisse de 3 à 5 cm et d'une paroi en moellon béton. Les travaux sur ces bâtiments semblent s'être concentrés sur les vitrages : plus de 60 % sont isolants.

Figure 30. Caractérisation physique de l'archétype : construction entre 1945 et 1970

Source : base de données de l'Enquête Qualité logement 2006

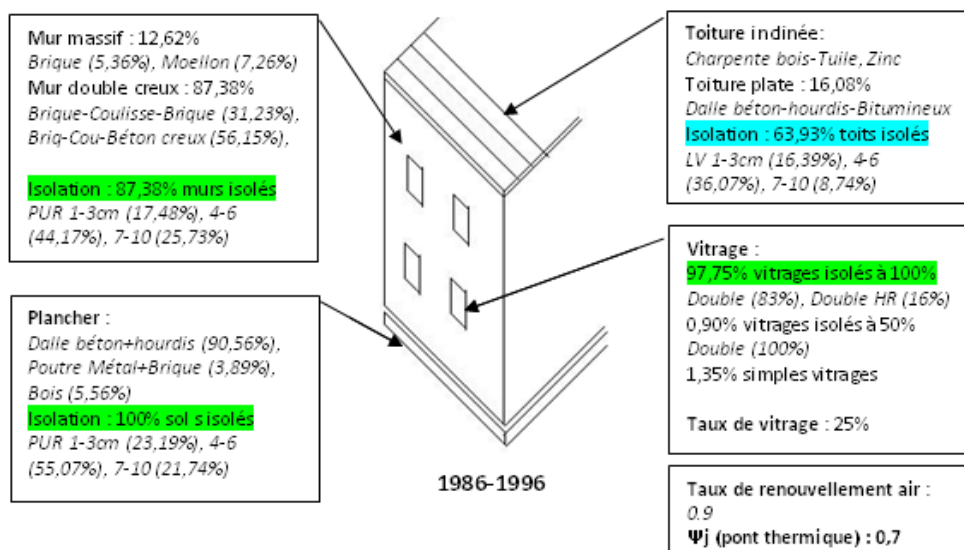
Figure 31. Caractérisation physique de l'archétype : constructions entre 1971 et 1985

Source : base de données de l'Enquête Qualité logement 2006

Pour les bâtiments construits entre 1971 et 1985, les résultats de l'enquête sont là encore cohérents avec les modes constructifs présumés de cette époque : forte présence des murs creux de seconde génération avec une isolation qui commence à largement se diffuser. Les parois vitrées sont plus largement isolantes, mais ceci s'accompagne d'un accroissement significatif des surfaces vitrées. Cet archétype présente le plus grand pourcentage de toiture plate. Ces deux dernières observations sont concordantes avec les styles architecturaux de l'époque. Le peu d'isolation (la plus faible de toutes les classes d'âge) des planchers est un autre trait caractéristique de cet archétype.

Dans les bâtiments construits entre 1986 et 1996, la grande majorité des murs sont de type creux isolé. L'isolation est plus épaisse que dans les archétypes précédents. Cela correspond à l'élargissement de la coulisse. La totalité des vitrages sont isolants et la part des vitrages de haute résistance augmente. Cet archétype et celui qui suit sont caractérisés par une bonne isolation générale. La toiture semble rester le grand point faible suivant les réponses de l'enquête.

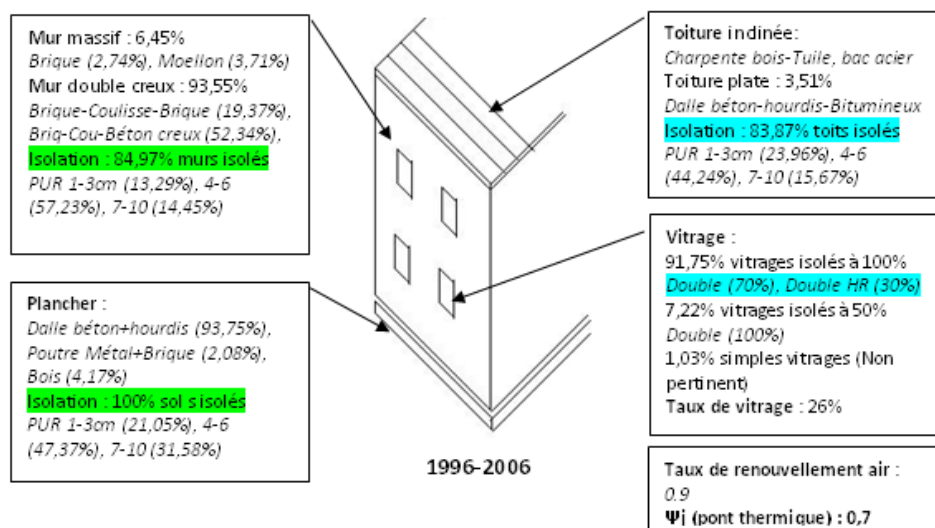
Figure 32. Caractérisation physique de l'archétype : construction entre 1986 et 1996



Source : base de données de l'Enquête Qualité logement 2006

L'archétype qui concerne les bâtiments construits après 1996, se caractérise par des murs creux isolés structurellement de 4 à 6 cm, un fort taux de vitrage, mais des parois vitrées que nous pouvons considérer comme entièrement isolantes, des planchers bétons isolés. Les toitures sont étonnamment la paroi la moins isolée.

Figure 33. Caractérisation physique de l'archétype : construction d'après 1996



Source : base de données de l'Enquête Qualité logement 2006

4.2.3.3 Performances énergétiques des enveloppes de chaque archétype

Sur la base des typologies constructives, il est possible d'évaluer théoriquement les coefficients de déperdition (U) de chaque paroi constituant l'enveloppe des 5 archétypes. En termes de méthodologie, nous avons choisi de modéliser pour chacune des parois, une paroi composite théorique. Celle-ci intègre l'ensemble des compositions matérielles relevées grâce au traitement des données de l'EQL 2006, suivant leurs proportions de représentation dans la classe d'âge.

Cette composition théorique inclut également les différents niveaux d'isolation dans la caractérisation des performances énergétiques de chaque paroi constituant l'enveloppe. Pour exemple, l'archétype constructif de la classe d'âge « avant 1945 » inclut les données de forte rénovation des vitrages dans le calcul du coefficient de déperdition des parois vitrées.

Nous avons utilisé le logiciel Comfie pour modéliser les performances énergétiques des parois composites-types horizontales et verticales des différents archétypes constructifs. Pour les parois vitrées nous avons utilisé les chiffres issus de la littérature. Pour l'isolation, nous avons opté pour l'utilisation d'un seul et même matériau. Pour l'épaisseur des murs, nous nous sommes basés sur une connaissance pratique des modes constructifs.

Les résultats présentés ici sont issus des diverses hypothèses développées dans le cadre du traitement des données de l'EQL. A chaque matériau correspond une performance de transmission énergétique pour un m² 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. Depuis le 1er mai 2010, les valeurs U doivent être calculées selon l'annexe VII de l'AGW du 17 avril 2008.

Tableau 25. Coefficient de transmission thermique des parois (U) suivant la classe d'âge des constructions³⁰

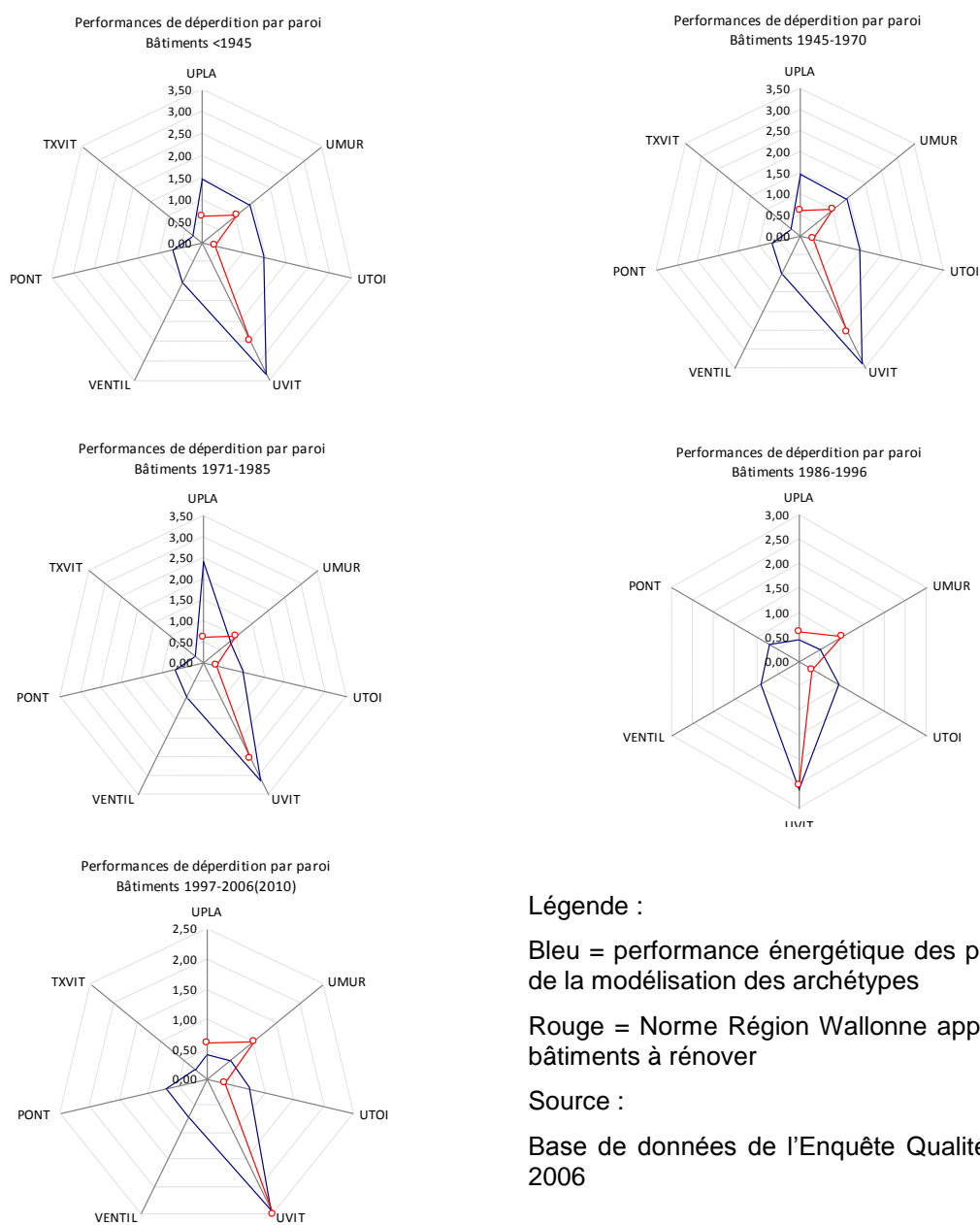
Année de construction	U. MUR (W/m ² .k)	U. VITRE (W/m ² .k)	U. TOITURE (W/m ² .k)	U. PLANCHER (W/m ² .k)	Taux renouvellement d'air (V/h)	% Vitrage
<1945	2,2	3,3	1,6	1,9	1	24
1945-1970	1,4	3,3	1,4	1,5	1	27
1971-1985	0,8	3	1,0	2,4	0,9	25
1986-1996	0,5	2,6	0,9	0,7*	0,9	25
1997-2006	0,5	2,4	0,7	0,7*	0,7	26

Source : base de donnée EQL 2006 et étude Autre, PUCA

³⁰ Note : Les données des Coefficients *U Plancher* suivie d'un (*) sont issues des normes applicables. Les données issues du traitement de l'EQL apparaissant trop optimistes et basée sur un nombre réduit de répondants : respectivement 0,44 W/m².k pour la période 1986-1996 et 0,41 W/m².k pour la période 1997-2006.

Les performances énergétiques de chacune des parois verticales ou horizontales, opaques ou vitrées, sont les résultantes des performances moyennes des parois composites théoriques de chaque archétype. Si l'on considère uniquement les déperditions par l'enveloppe, les niveaux moyens de ces déperditions par m² de façade sont relativement élevés. Les immeubles anciens ont plus de déperditions théoriques dues à leur enveloppe en raison de l'absence d'isolation. Il faut toutefois noter que pour les périodes anciennes, le haut niveau de déperdition des façades peut être compensé par une plus faible surface d'enveloppe déperditive due à un fort taux de mitoyenneté.

Figure 34. Performance énergétique des enveloppes suivant la période de construction des bâtiments



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'art. 548) et Changement d'affectation), la vulnérabilité de certains archétypes est soulignée. Ainsi, l'isolation des vitrages représente un des importants points faibles des trois premières classes d'âge et ce malgré les dynamiques de rénovation. Ceci s'explique par l'écart type important de performance entre les vitrages simples et les double- vitrages (plus du double). Les performances des murs extérieurs des bâtiments construits avant 1971 sont également loin de correspondre à la norme. Ceci est plus problématique car une isolation de ces parois n'est pas forcément aisée à mettre en œuvre. Sur ces segments une attention particulière à la réduction de l'aire de déperdition de ces bâtiments peut s'avérer être une piste d'amélioration plus efficace. Aucun archétype ne semble répondre aux exigences de la norme en vigueur en ce qui concerne l'isolation des toitures. En ce qui concerne la performance des sols ce sont les bâtiments construits entre 1971 et 1985 qui sont le plus pénalisés, avec des performances 4 fois plus mauvaises que la norme.

4.2.3.4 Exemple de sensibilité théorique des performances énergétiques des archétypes à la rénovation

La sensibilité du coefficient de transmission thermique des parois de chaque archétype, c'est-à-dire la déperdition de l'enveloppe, à la rénovation pourra être évaluée théoriquement, par rapport aux résultats obtenus par la classe d'âge la plus récente et aux exigences de la norme relative aux bâtiments à transformer.

Ainsi à partir des archétypes nous pouvons chercher à savoir l'effort théorique nécessaire pour que le parc ancien soit, dans sa globalité, aussi performant que le parc récent, voir atteigne les exigences de la norme. Pour exemple, nous avons ainsi joué, pour la classe d'âge d'avant 1945, soit sur le pourcentage des parois isolées/non isolées soit sur la qualité de l'isolation (épaisseur du matériau pour les parois opaque et niveau de résistance pour les parois vitrées).

Avant 1945 :

- les fenêtres : le parc de logement datant d'avant 1945 bénéficie d'ores et déjà de 70 % de l'ensemble des parois vitrées isolées. L'hypothèse la plus probable est de continuer à isoler les parois vitrées qui ne le sont pas encore. Il y a dès lors deux variantes, soit une isolation avec des doubles vitrages standard, soit avec des doubles vitrages HR, moitié moins transmissifs.

Dans la première variante, l'isolation de l'ensemble des vitrages simples (soit 30 % de l'ensemble des parois vitrées du parc) permet d'atteindre un U théorique de $2,9 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ pour le stock de bâtiments édifiés avant 1945, ce qui pratiquement identique aux performances du parc d'après 1996, mais reste en dessous de la norme. Par contre si on isole les 30 % de vitrage simple existant encore en les remplaçant par un double vitrage HR on atteint $2,4 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; objectif de la norme dépassé.

- les murs : Si on considère une isolation intérieure d'épaisseur moyenne de 4 à 7 cm, il faut isoler 86 % des parois du parc d'avant 1945 pour atteindre les objectifs de performance du parc d'après 1996. Ces 86 % sont en plus du pourcentage de parois actuellement isolées. Si on opte pour un isolant d'épaisseur supérieur (7 à 10cm) il faudra néanmoins isoler 78 % du parc, 78 % de plus que les 9 % actuels. Par contre si on se contente de répondre aux exigences thermiques de la norme visant les réhabilitations soit $1 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$, nous atteignons les objectifs avec seulement 59 % supplémentaires des parois du parc à isoler avec une épaisseur moyenne, ou 51 % avec une épaisseur d'isolant minimale de 7 cm.

Nous avons choisi l'hypothèse d'une isolation intérieure des murs car, d'expérience pratique, on sait que l'isolation extérieure est très difficile à diffusée dans bâtiments d'avant 1945. Les freins sont essentiellement non techniques, nous pouvons citer ici la résistance des communes et des occupants à la modification esthétique des bâtiments, soit pour des raisons de patrimonialisation, soit dans l'optique de ne pas fragiliser une certaine cohérence architecturale héritée.

La mise aux normes des parois opaques verticales du parc d'avant 1945 impose néanmoins un effort énorme et systématique. Il convient de rappeler que ces bâtiments bénéficient généralement d'un fort taux de mitoyenneté. Il serait nécessaire de pondérer l'objectif poursuivi avec cette variable de la surface de déperdition, fortement réduite dans le parc d'avant 1945 par rapport à celui d'après 1996.

- les toitures : 77 % des toitures du parc d'avant 1945 ne sont pas isolées. Si on choisit d'appliquer une isolation d'épaisseur moyenne (4 à 6 cm), on atteint une performance comparable au parc d'après 1996 en effectuant une rénovation de l'ensemble des 77 %. Cependant, le coefficient de transmission obtenu reste deux fois supérieur aux exigences de la norme. Si on opte pour une plus grande épaisseur d'isolant, minimum 7cm, on atteint des performances proches de 0,4 W/m².K. Il faut donc atteindre une isolation moyenne de 10 cm des 77 % des toitures actuellement non isolées pour espérer être dans les bornes de la norme actuelle.

- Planchers : 85 % des planchers du parc résidentiel d'avant 1945 ne sont pas du tout isolés. Une action sur l'ensemble de ces 85 %, avec un isolant d'épaisseur moyen, permettrait facilement d'atteindre les exigences de la norme (on obtient un U théorique de 0,5 pour 0,6 exigé et 0,7 pour le parc d'après 1996). Par contre une campagne d'isolation de seulement 50 % des planchers non isolés dans l'ensemble du parc, avec un isolant d'épaisseur minimale de 7 cm, permettrait d'atteindre un résultat identique.

L'exemple de la classe d'âge d'avant 1945 a été choisi car il correspond à une grande part du stock et ses performances thermiques théoriques sont les moins bonne. Il ne s'agit ici pas d'une estimation des efforts à mener sur chacun des bâtiments de chaque classe d'âge mais bien en moyenne sur l'ensemble des bâtiments de chaque classe.

Des évaluations de ce type pourront être poursuivies dans le cadre des scénarii de structuration du territoire. En effet il sera pertinent de pouvoir évaluer l'impact relatif par exemple d'une densification du tissu par rapport à l'isolation structurelle du bâti.

4.2.3.5 La fragilité des données sources pour une connaissance fine des caractéristiques techniques du stock bâti

L'âge des logements dans l'enquête socio-économique, 2001 : une variable non déterminante.

L'INS informe sur nombre de paramètres relatifs à la qualité des logements. Elle constitue pour cela une base de données très intéressante pour une recherche comme celle-ci. Les classes d'âge utilisées suivent une autre logique que celle développée ici et sont au nombre de 8 : « avant 1914 », « 1914-1945 », « 1946-1960 », « 1961-1970 », « 1971-1980 », « 1981-1990 », « 1991-1995 », « 1996 ou après », suivi de deux critères d'approximation « non connu, plus de 20ans », « non connu, moins de vingt ans ». Ces informations sont transmises par les occupants des logements.

Le fait que l'âge des logements ne soit pas directement lié aux informations relatives aux données d'isolation, de types, de vecteurs énergétiques, etc. est une des grandes difficultés rencontrées avec les données de l'INS dans le cadre de cette recherche. Des approximations sont envisageables mais elles génèrent potentiellement des marges d'erreur importantes. C'est une des raisons pour laquelle nous avons construit notre base de données de manière préférentielle sur les informations émanant de l'enquête qualité logement (EQL). La seconde raison concerne les informations contenues dans l'enquête socio-économique (ESE) relative à l'isolation.

L'isolation dans l'enquête socio-économique, 2001 : plus de 10 % de réponses non pertinentes.

Pour qualifier le stock bâti, nous avons utilisé dans un premier temps les données du dernier recensement de l'INS (ESE2001) informant notamment, par commune, ancienne commune et secteur statistique, sur le nombre d'habitations en fonction de leur isolation (toiture, murs et double vitrage) et le nombre d'habitations en fonction de leur classe d'âge. Cette source nous permet d'avoir une donnée de base reprenant un très grand nombre d'habitations afin d'éviter d'emblée une sous-évaluation liée au manque de données.

Nous avons croisé ces informations afin d'avoir une classification (de C1 à C8) des secteurs statistiques suivant les segments d'âge de construction des logements et le niveau d'isolation des logements pour trois paramètres structurels : mur, vitrage, toiture (Tableau 28). Les huit catégories d'isolation vont du plus isolé (C1) au moins isolé (C8). La typologie, de C1 à C8, la plus représentée a été conservée comme caractéristique du secteur statistique.

Tableau 26. Définition de la classification d'isolation retenue

CLASSES	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
VITRAGE	1	1	1	0	1	0	0	0
MUR	1	1	0	1	0	1	0	0
TOITURE	1	0	1	1	0	0	1	0

Note : (1) : isolé / (0) : non isolé

L'isolation des parois est définie par l'INS suivant les critères « isolé », « non isolé ». L'isolation du vitrage propose un troisième choix « partiellement isolé ». Les logements renseignés dans cette catégorie ont été considérés dans un premier temps comme non isolés. En effet, fréquemment les parois vitrées isolées correspondent dans ces cas là aux bâtiments annexés plus tardivement au bâtiment initial. De plus la proportion des vitrages renseignés isolés ne peut être définie. On ne peut donc pas évaluer leur impact comme prépondérant ou non sur l'ensemble des parois vitrées du bâtiment.

Tableau 27. Répartition des Secteurs statistiques suivant la classe d'âge principale des bâtiments du secteur et leurs niveaux d'isolations.

AGE LOGTS	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
Avant 1945	8.82 %	38.99 %	0.70 %	0.09 %	44.22 %	1.33 %	0.09 %	5.75 %
1945-1970	27.58 %	40.00 %	2.39 %	2.22 %	18.36 %	2.39 %	0.26 %	6.83 %
1971-1980	40.73 %	59.09 %	1.77 %	1.51 %	5.30 %	1.77 %	0.38 %	2.65 %
1981-1996	88.31 %	6.49 %	2.05 %	0.16 %	2.05 %	0.16 %	0.32 %	0.47 %
Après 1996	87.57 %	3.41 %	2.82 %	1.69 %	3.39 %	0.56 %	0.26 %	0.56 %

Source : INS, ESE 2001.

Cette classification (Tableau 27) donne un premier aperçu de l'évolution des différents niveaux d'isolation de logements. Pour exemple, le parc ancien (d'avant 1945) semble avoir bénéficié d'une forte rénovation des vitrages. Cette information permettra de rendre plus adéquates les hypothèses classiques de performance thermique de cette classe d'âge (qui considèrent souvent les parois vitrées comme non isolées pour cette période).

A l'élaboration de cette classification, deux classes sont apparues comme relativement non pertinentes : les classes C4 et C6. En effet, suivant notre connaissance pratique, il est peu probable qu'un logement bénéficie de murs isolés sans que des travaux n'aient été effectués sur les parois vitrées. Le fait que ces classes soient néanmoins présentes dans les données du recensement nous permet d'envisager la marge minimale d'erreur présente dans les réponses des personnes recensées. Sur l'ensemble du parc de logement, il y aurait donc au moins 11.88 % des informations délivrées par l'ESE 2001 qui sont difficilement interprétables.

L'enquête qualité logement, 2006 : des données constructives liées à l'âge du bâti à pondérer par une connaissance experte.

Seules les données issues de l'EQL 2006 renseignent, à partir de l'âge des bâtiments, les modes constructifs d'un échantillon d'un peu plus de 6000 logements wallons. Cependant l'EQL, comme l'ESE est un relevé d'informations issu de savoirs non experts. Il convient de manipuler les résultats issus de l'enquête EQL avec précautions et certaines déclarations issues de l'enquête peuvent être soumises à discussion :

- la déclaration de l'âge du bâtiment : peu d'habitants sont à priori susceptibles de définir précisément la date de construction du bâtiment qu'ils occupent. Or c'est une donnée majeure de notre modélisation du stock résidentiel.

Au vu des incohérences entre l'âge des bâtiments et modes constructifs ou composition des murs déclarés par les répondants, les informations désagrégées issues de l'EQL ont été recoupées avec les informations cadastrales relatives à l'âge des bâtiments. Les aberrations étaient largement présentes pour les bâtiments d'avant 1945. Le recouplement a été effectué par le biais d'une géo-localisation de chaque bâtiment répondant. La date de construction inscrite au cadastre est choisie comme donnée de référence. Plus de 4000 adresses ont ainsi été localisées sur le cadastre, soit 70 % des répondants.

Notons également que l'EQL 2006, comme l'ESE 2001, opère une segmentation temporelle du parc différente de celle retenue dans cette étude : « avant 1945 », « 1945-1970 », « 1971-1980 », « 1981-1990 », « après 1991 ». La manipulation décrite précédemment, nous permet donc d'analyser les informations constructives du parc suivant le découpage temporel défini dans la présente recherche.

- Le niveau d'isolation : l'évaluation de celui-ci par les habitants est grandement fonction des sensibilités individuelles au confort thermique, notamment en ce qui concerne l'isolation du plancher et des murs. Les informations concernant l'isolation des toitures et des fenêtres semblent, à l'inverse, facilement transmissibles par des non-experts. Pour les toitures, cela est plus vraisemblable dans les bâtiments unifamiliaux ou multifamiliaux de moins de 5 logements. L'épaisseur d'isolant présente peut aussi être sujet de supposition.

- La composition des parois horizontales ou verticales : là encore peu d'habitants sont susceptibles de définir précisément la composition des parois du bâtiment qu'ils occupent. De plus des erreurs d'interprétation des termes techniques sont également possibles. Malgré la diffusion dans les documents techniques des préconisations en faveur des murs creux dès le début du 20^{ème} siècle, il est difficile de savoir la pénétration d'une telle pratique dans la réalité concrète des murs des bâtiments d'avant 1945. Les murs informés en murs creux durant cette période sont donc soit véritablement creux soit composites, il ne nous est pas facile de trancher sans études de terrain. Cependant, on trouve renseigné des compositions de « mur double » bien avant 1945 avec, de l'extérieur à l'intérieur, béton / brique. Il s'agit sans doute dans ces cas là non pas d'un mur double mais d'un mur brique enduit de ciment, car le béton en terme de matériau de construction, de plus en parement, n'ai pas usité avant 1945.

La représentation des logements anciens dans les données de l'INS (2001), l'enquête qualité logement (2006), le cadastre (2009) (Tableau 28):

La comparaison des sources INS et EQL sur le poids relatif des classes d'âge les plus anciennes confirme la cohérence des deux enquêtes. D'après l'INS, 42,22 % des logements seraient antérieurs à 1945. L'EQL estime à 44,20 % les logements enquêtés sont référencés comme appartenant à cette classe d'âge. L'EQL est donc cohérent avec l'INS. Lors de la correction des données d'âges à partir du cadastre (voir paragraphe précédent), cette proportion rejoint celle issue du traitement des données cadastrales. L'EQL et L'INS sont deux bases de données qui s'appuient sur des réponses de non-experts.

Tableau 28. comparaison de trois bases de données, proportion des logements pour deux classes d'âge.

	Avant 1945	1945-1970
INS (2001)	42,22 %	22,12 %
EQL (2006)	44,20 %	24,80 %
EQL corrigé	52,10 %	21,02 %
CAD (2009)	52,10 %	18,58 %

Source : INS, ESE 2001, matrice cadastrale 2009, et Enquête qualité logement 2006

Note : Pour l'INS, les logements non répondus n'ont pas été pris en compte. Les logements renseignés en « plus de 20ans » ont été répartis proportionnellement sur les classes d'âges d'avant 1980. Pour l'EQL « corrigé », les datations des logements a été corrigées sur base des données cadastrales, par le biais d'une géo-localisation de 4005 adresses enquêtées sur 6000.

Sur base du cadastre on estime à 52,10 % la part des logements antérieurs à 1945. Les deux sources d'enquête (INS et EQL) sous-évalueraient donc légèrement la part des logements anciens. Notons que l'INS, l'EQL, le cadastre n'enquêtent pas sur un parc de volume similaire. Ces résultats doivent donc être pondérés par les choix que nous avons faits quant à la datation des constructions sur le cadastre (seules les dates originales ont été conservées). De 2001 à 2008, des sorties du parc peuvent aussi avoir eu lieu et diminuer la représentation de cette classe d'âge dans le parc résidentiel. Il est difficile d'évaluer les sorties du parc, soit par destruction soit par changement d'affectation.

Sur la seconde classe d'âge, 1945-1970, les résultats obtenus dans les trois sources sont plus cohérents, vers les 20 %.

Sur l'ensemble de ces deux classes d'âge, l'écart entre les résultats de l'INS et du cadastre est de l'ordre de 6 %, entre l'EQL et sa correction l'écart est de 4 %.

4.3 MODÉLISATION DU PARC DE LOGEMENTS ET DE BÂTIMENTS

Nous abordons successivement les données de population puis les données et hypothèses concernant les mouvements dans le parc de logements et de bâtiments en région wallonne. Il s'agit ici d'identifier les dynamiques à l'œuvre dans le stock existant et tracer les premières tendances lourdes.

Enfin nous analyseront les données et hypothèses concernant la caractérisation physique du stock : c'est-à-dire d'une part les données relatives à la morphologie urbaine (construction des variables clés de mitoyenneté et de hauteur) et d'autre part l'évaluation de la surface chauffée du stock.

4.3.1 Les dynamiques démographiques et l'évolution des ménages

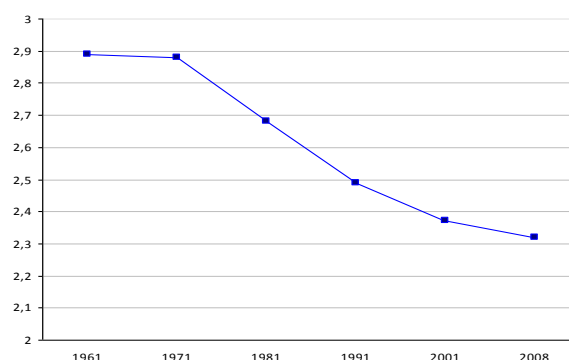
4.3.1.1 Population

La population wallonne comptait 3.435.879 habitants en 2007³¹. Les taux de croissance annuels sont en augmentation depuis 1996, tendance qui devrait se poursuivre jusqu'en 2014 selon les perspectives de population 2007-2060 du Bureau fédéral du plan (2008). En conséquence, Le Bureau estime que le rythme de l'augmentation de la population wallonne sera plus soutenu jusqu'en 2017 (+ 7,1 % de 2007 à 2017) par rapport aux dix précédentes (+ 3,5 % de 1997 à 2007).

4.3.1.2 Évolution du nombre de ménages

En 2007, la Région wallonne comptait 1.473.054 ménages privés³² (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. La taille moyenne des ménages privés diminue donc progressivement ; sur la même période elle a affiché un recul de 6,4 % en passant à 2,33 personnes vivants sous le même toit en 2007. Le nombre de petits ménages d'une ou deux personnes représentait en 2007 64,5 % du nombre total de ménages

Figure 35. Nombre de personnes par ménages de 1961 à 2008 en région wallonne.



Source : 2000 - 2007: observations, DGSIE, 2008

Le taux de croissance de la population est moins élevé que celui du nombre de ménages, en raison de l'érosion progressive de la taille des ménages (Figure 35). Les données liées au nombre de ménages sont des informations qui conditionnent la demande de logements.

³¹ Source: DGSIE (2008), 2000 - 2007: observations ; BFP (2008), 2008 - 2061: Perspectives de population 2007-2060,

³² DGSIE (2008), Op.cit.

4.3.2 Les mouvements dans le parc

Les bases de données convoquées sont d'une part les informations de l'IWEPS transmises par la confédération wallonne de la construction (2010), sur la dynamique de construction neuve dans le secteur résidentiel, et d'autre part les statistiques de l'INS basées sur le cadastre (2009).

D'après la littérature (ETHEL 2010) les multiples mouvements à l'œuvre à l'intérieur du parc, au cours d'une année t , peuvent se résumer à trois actions principales :

- des entrées par construction neuve ($\Sigma t A$) ;
- des sorties par démolition ou affectation à d'autres segments du parc de logements (logements vacants, résidences secondaires) ou du tertiaire ($\Sigma t S$);
- un ensemble d'entrées et de sorties à somme nulle de réaffectation, qui peut être un des moteurs de la réhabilitation ($\Sigma t M = 0$).

Le parc RP au 01/01 de l'année $t+1$ peut ainsi être obtenu à partir des effectifs de l'année précédente par le bilan : $RP(t+1) = RP(t) - \Sigma t S + \Sigma t A$

4.3.2.1 Le taux de renouvellement du parc de logements

Les données régionales fixent les ordres de grandeur. Entre 1992 et 2002 (exclu) :

- la construction neuve (A) représente 117.788 logements, soit une moyenne arrondie de 12.000 logt/an (source IWEPS)
- l'accroissement du parc de logement est de 100.708 logements (source cadastre)

Soit des sorties brutes (S) dont le rythme serait estimé à 17.000 logements sur la période décennale, soit 1.700logt/an.

Pour les effectifs de 2001, le taux de sortie estimé $T(S)$ est de 0,12. Ce taux est assez faible. Il représente le taux de renouvellement du parc, c'est-à-dire la part de logements anciens qui est remplacée par de la construction neuve : 15 % de la construction neuve contribue ainsi au renouvellement du parc ; les 85 % restants assurent la croissance du parc.

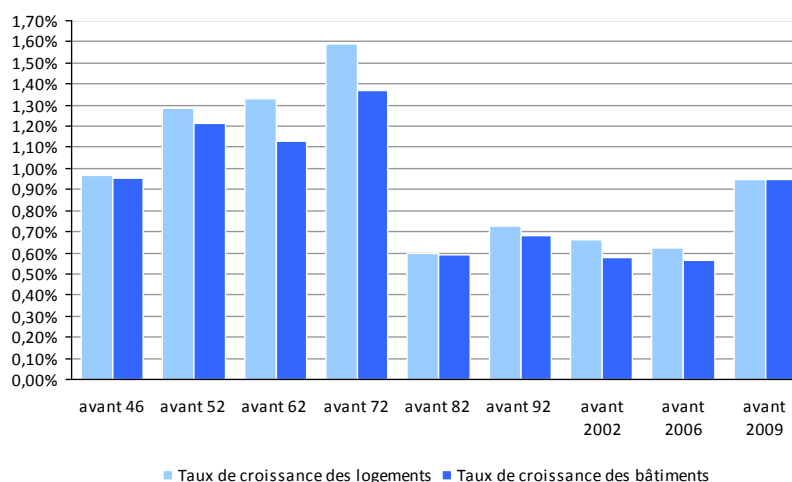
4.3.2.2 Le taux de croissance du parc de logements et de bâtiments

La donnée principale de la dynamique du parc est celle de son taux de croissance annuelle.

Sur la base des données traitées ci-dessus, nous avons mené une première estimation du taux d'accroissement moyen du parc de logement, pour les effectifs de 2001. Le résultat serait de 0,71 % par an sur la période 1991-2001. L'application de ce taux d'accroissement, défini à partir des ratios A et S, à la période 2002-2008 nous livre des résultats très proches du nombre de logements répertorié au cadastre. On obtient ainsi une estimation du nombre de logements presque identique aux données cadastrales, avec une marge d'erreur de 0,03 %.

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 2008 (Figure 36). 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 36. Taux d'accroissement du parc de logement et du stock de bâtiment depuis 1945.



Source : INS – Documentation patrimoniale, 2009

On observe une forte cassure dans la dynamique d'accroissement du parc. Après le boom économique des trente glorieuses, 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 % jusqu'à 2005. Sur une dynamique identique que pour le stock de bâtiments, on note une augmentation du taux d'accroissement du parc de logements entre 2006 et 2009, où il atteint 0,95 %.

L'écart entre le taux de croissance du stock de bâtiments et celui des logements se creuse entre 1952 et 1972. Cette tendance peut être expliquée par deux phénomènes : soit la division de nombreuses maisons unifamiliales urbaines en plusieurs logements, soit une construction neuve marquée par des bâtiments collectifs. Dans les trente dernières années, le taux d'accroissement du stock 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 wallon.

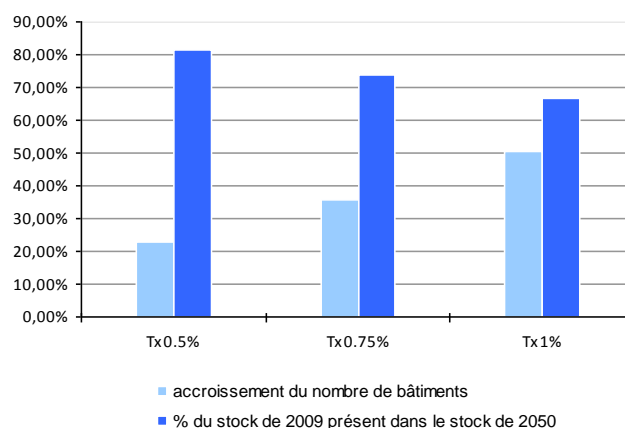
Le taux moyen d'accroissement du parc de logements sur les trente dernières années et jusqu'à 2006 est de 0,65 %. Si nous étendons notre analyse jusqu'à aujourd'hui et compte tenu de l'augmentation du rythme de production de logements ces 4 dernières années, celui-ci atteint 0,71 %. Pour les bâtiments, sur les mêmes périodes ce taux d'accroissement varie de 0,60 % à 0,67 %.

4.3.2.3 Hypothèses de la part du stock des bâtiments existants en 2009 dans le stock projeté en 2050

Cette projection est basée sur trois hypothèses pour le taux d'accroissement du stock de bâtiment entre 2009 et 2050 : 0,5 %, 0,75 % et 1 % (Figure 37).

L'hypothèse des 1 % de croissance annuelle du stock 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 %. A l'inverse l'hypothèse d'un taux d'accroissement 0,5 % par an est pessimiste.

Figure 37. Accroissement du parc de logement entre 2009 et 2050, suivant les 3 hypothèses de taux d'accroissement, et proportion du stock de bâtiment déjà construits dans le stock projeté de 2050.



Source INS – Documentation patrimoniale, 2008

Avec l'hypothèse basse, le volume de bâtiment accusera une augmentation de 22,69 % et jusqu'à 50,38 % pour l'hypothèse haute.

Ce qu'il semble important de souligner ici c'est que, dans la première hypothèse (Tx 0,5 %), les bâtiments d'ores et déjà construits représenteront un peu plus de 80 % du stock de 2050. Ce chiffre se tasse à 73,7 % pour un taux de renouvellement de 0,75 % et 66,5 % pour un taux de renouvellement de 1 %. Ces estimations intègrent le taux de renouvellement du stock 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 stock existant même à une projection à horizon quarante ans.

4.3.3 Morphologie du tissu bâti en région wallonne

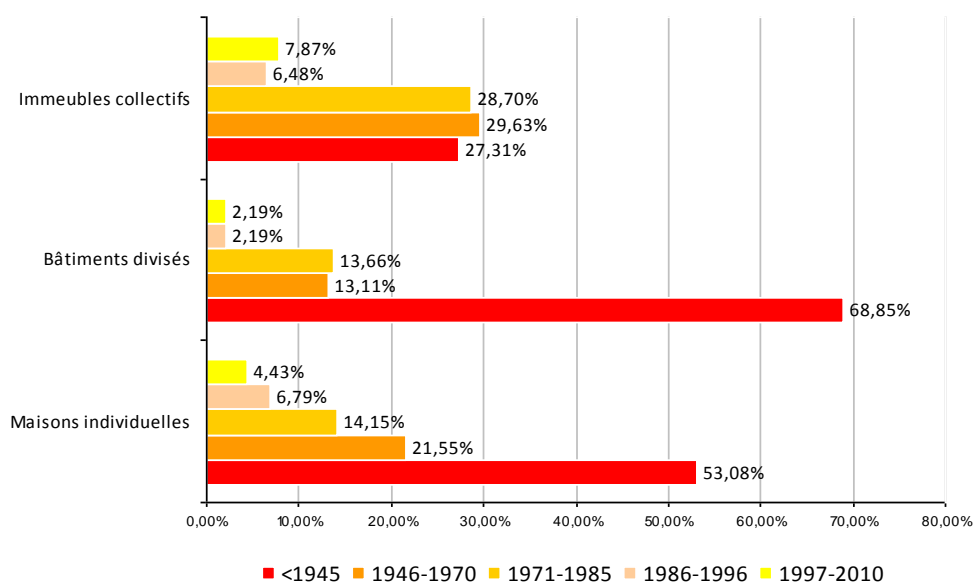
Nous abordons successivement les variables de typologie, mitoyenneté et les variables de hauteurs.

4.3.3.1 Analyse des typologies suivant un échantillon du stock par classe d'âge de construction

Le parc résidentiel wallon est composé à plus de 80 % de maisons unifamiliales. Nous avons cherché à savoir la proportion de logements suivant leur époque de construction pour chaque typologie (bâtiments unifamiliaux, bâtiments divisés, immeubles collectifs) (Figure 38). L'exploitation des statistiques issues du traitement de l'échantillonnage de l'enquête qualité logement de 2006 (EQL) permet de caractériser l'époque constructive suivant les classes d'âge choisies : avant 1945, 1945-1970, 1971-1985, 1986-1996, après 1997. Rappelons que les informations relatives à la date de construction informée dans l'EQL ont été corrigées et recalées sur les informations issues de la base cadastrale de 2009.

Les logements appartenant à la typologie des maisons unifamiliales datent à plus de 50 % d'avant 1945. La proportion de logements décroît plus la date de construction devient récente. Cette situation est encore plus marquée pour les logements appartenant à la typologie bâtiments divisés construits avant 1945. Pour cette typologie on observe une cassure évidente entre les périodes s'étalant de 1946 à 1985 et celle postérieure à 1986. Cette cassure est normale : peu de bâtiments récents sont divisés. Pour les immeubles collectifs, les logements datant des trois périodes constructives d'avant 1986 ont un poids identique avoisinant les 30 % pour chaque période.

Figure 38. Analyse de l'âge des logements suivant la typologie (bâtiments unifamiliaux, bâtiments divisés, immeubles collectifs).



Source : Base de données de l'Enquête qualité logement

Si nous considérons cet échantillonnage représentatif, près de 90 % du stock des maisons individuelles est antérieur à la mise en œuvre de la première réglementation thermique (1985), 50 % datant d'avant 1945, 95 % du stock des bâtiments divisés est également antérieur à toute réglementation, et 70 % date d'avant 1945. Enfin, 85 % du stock des immeubles collectifs est antérieur à la première réglementation, cependant seulement 27 % du stock date d'avant 1945.

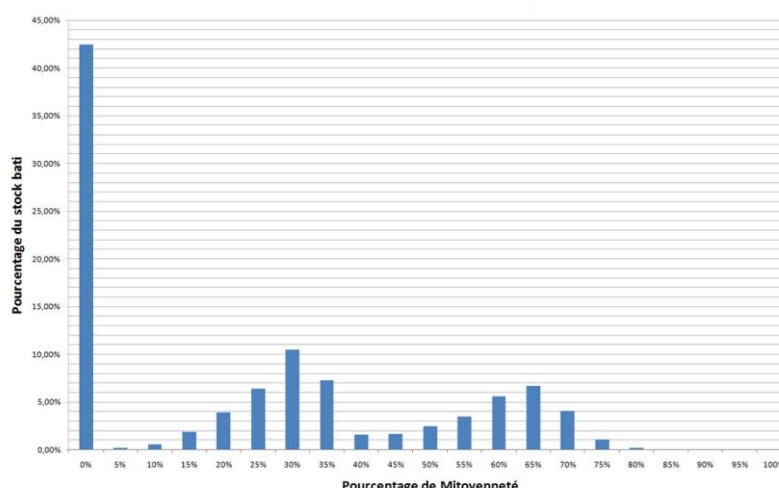
4.3.3.2 Analyse de la mitoyenneté sur l'ensemble du stock bâti par classe d'âge de construction

L'ESE de 2001, l'enquête logement et les données fournies par le cadastre ne permettent la distinction qu'entre bâtiments isolés, semi-mitoyens ou mitoyens. De plus, l'information est, au mieux, agrégée à l'échelle des secteurs statistiques, ce qui rend l'application de notre méthodologie bottom-up impossible.

Il a donc été nécessaire de mesurer le taux de mitoyenneté réel pour le stock bâti que nous étudions. Ce calcul s'est fait sur base des données du PICC. Le calcul consiste à mesurer quel pourcentage du périmètre au sol d'un bâtiment est en commun avec un ou plusieurs autre(s). Nous avons utilisé la fonction intersect dans arcGIS afin d'obtenir les segments communs à plusieurs polygones. Ensuite, nous avons calculé la proportion du périmètre total qu'ils représentaient.

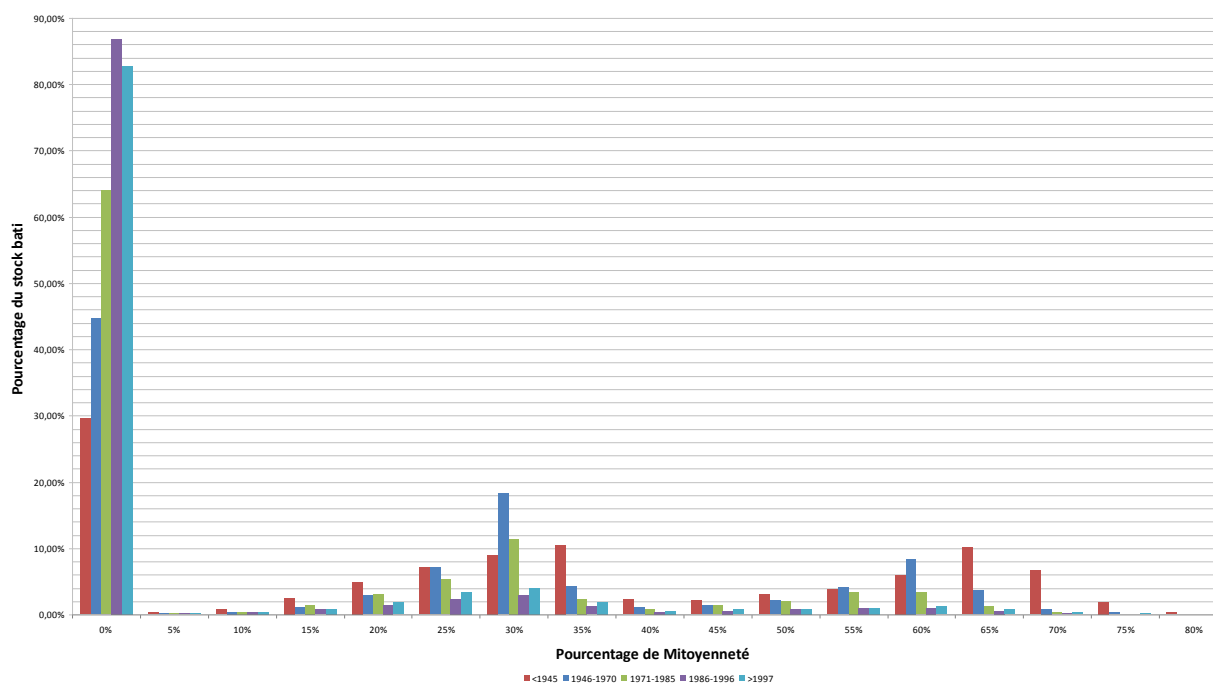
Les résultats sont repris dans le graphique ci-dessous (Figure 39). On obtient un histogramme des fréquences de pourcentage de mitoyenneté à trois points d'intensité. Ainsi plus de 40 % de l'ensemble du stock sont des bâtiments isolés, près de 30 % du stock présente un pourcentage de mitoyenneté compris 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 peut correspondre à des bâtiments mitoyens de deux côtés.

Figure 39. Analyse de la mitoyenneté sur l'ensemble du stock bâti : histogramme des fréquences



Source : Données extraites de la matrice cadastrale 2009

Figure 40. Analyse de la mitoyenneté sur l'ensemble du stock bâti par classe d'âge : histogramme des fréquences



Source : Données extraites de la matrice cadastrale 2009

La morphologie et notamment la compacité du tissu influe positivement sur les émissions de GES en réduisant la surface de déperdition entre le volume protégé et l'air extérieur. Ces résultats, pour être pertinents dans une analyse des émissions de GES, doivent être mis en perspective avec les différentes classes d'âge de bâti (Figure 40).

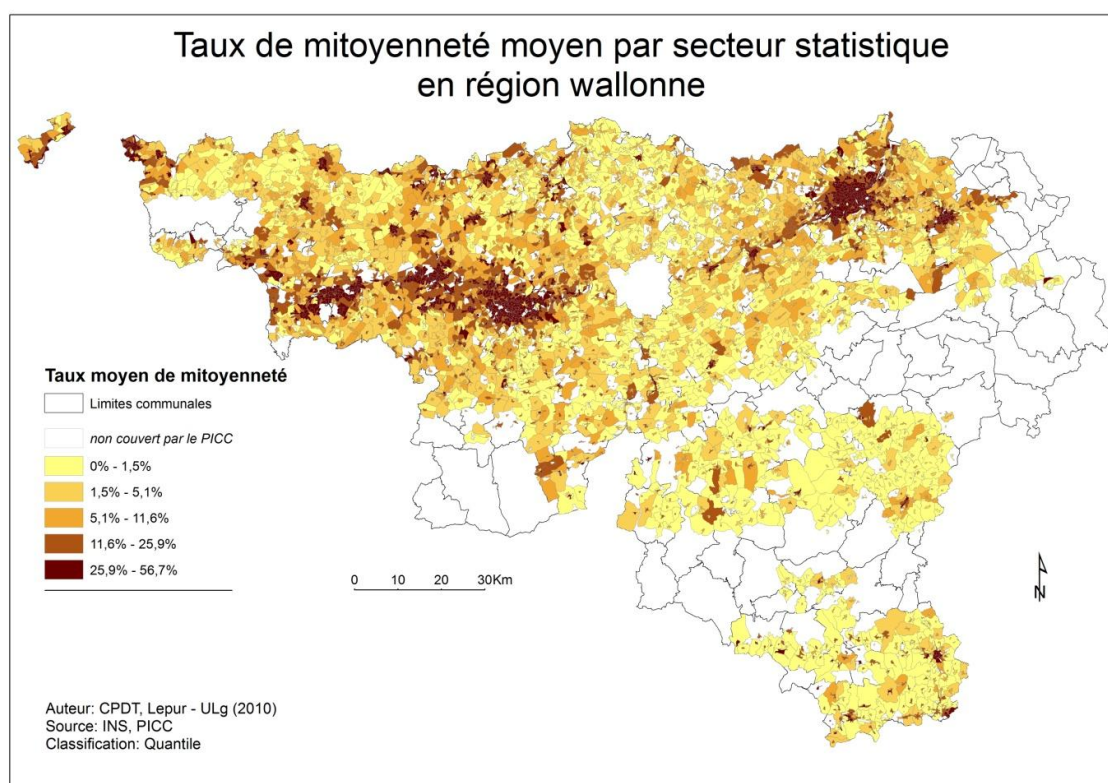
L'analyse du taux de mitoyenneté par classe d'âge révèle une très forte représentation des trois dernières périodes constructives dans le volume des bâtiments implantés de manière isolée : 64 % des bâtiments construits entre 1971 et 1985, 86 % des bâtiments construits entre 1986 et 1996 et enfin 82 % de ceux construits après 1996. L'implantation en bâti isolé est susceptible d'avoir de lourdes conséquences en termes de consommation énergétique sur les bâtiments peu performants thermiquement. C'est le cas ici des bâtiments construits avant la mise en œuvre de la réglementation thermique de 1984.

L'implantation en ordre dispersé n'est pas une caractéristique récente en région wallonne, 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 isolée et de plus de 40 % pour les bâtiments construits avant 1971.

On retrouve dans l'histogramme ci-dessous le profil en trois points d'intensité du premier graphique. Les bâtiments anciens (antérieurs à 1971) sont les plus fréquemment représentés dans toutes les classes de mitoyenneté de plus de 15 %, ce qui semble confirmer l'hypothèse initiale selon laquelle la morphologie des tissus anciens serait en mesure de compenser potentiellement les performances thermiques plus faibles de leur enveloppe bâtie.

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

Figure 41. Taux de mitoyenneté à l'échelle des secteurs statistiques en région wallonne, couverture du PICC

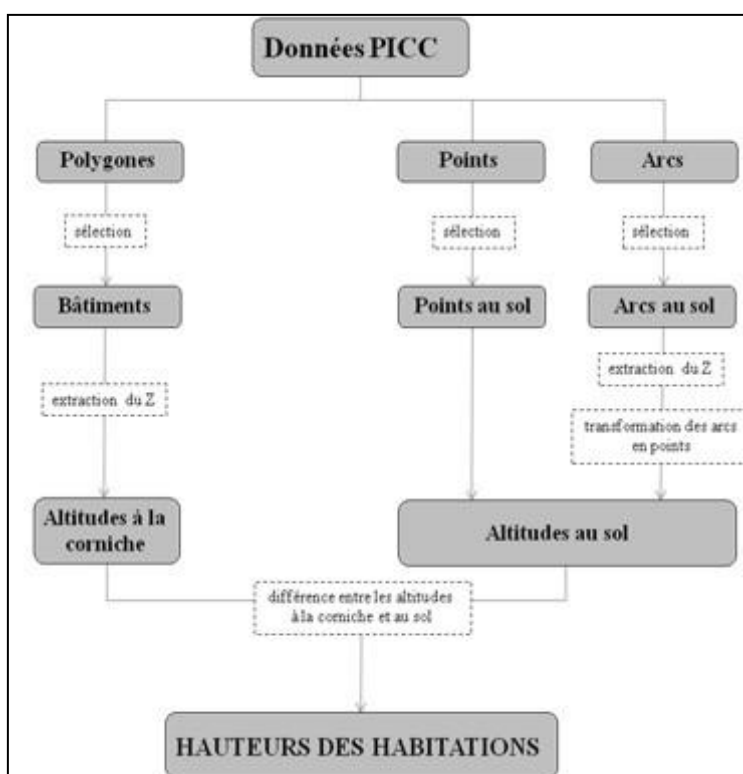


4.3.3.3 Estimation des hauteurs des bâtiments sur base du PICC

La création du cadastre énergétique pour le stock bâti nécessitait que l'on détermine la hauteur des bâtiments de manière désagrégée. Le Projet Informatique de Cartographie Continue (PICC) représente la seule source de donnée permettant de déduire cette information pour la majorité du stock bâti ($\pm 85\%$). C'est un projet de cartographie numérique tridimensionnelle à grande échelle. Celui-ci regroupe l'information X,Y,Z pour des objets géographiques décrits par des points, des lignes et des surfaces.

Concrètement, la détermination de la hauteur a nécessité le calcul de la différence entre l'altitude sous corniche des bâtiments et l'altitude au sol la plus proche de ceux-ci. Pour l'altitude sous corniche, nous disposons à chaque fois de plusieurs points par bâtiment dont nous avons dû faire la moyenne des hauteurs. Les altitudes au sol considérées sont issues des points et des lignes qui décrivaient des objets géographiques d'une hauteur nulle. La sélection des points et lignes au sol s'effectue facilement grâce à la table attributaire des données du PICC. Le graphique ci-dessous explicite la méthodologie suivie.

Figure 42. Méthodologie d'évaluation des hauteurs des bâtiments en région wallonne, couverture PICC.



4.3.4 La Surface chauffée du parc : une information clef pour la modélisation des besoins énergétiques du stock bâti résidentiel

Déterminer la superficie habitable totale du parc est nécessaire à l'évaluation des dynamiques d'évolution de la surface totale à chauffer du stock bâti wallon jusqu'à nos jours. L'augmentation du nombre total de m² chauffés peut soit être due à une augmentation du nombre de ménages et donc du nombre de logements, soit une augmentation de la surface moyenne par logement. Elle influe grandement sur le bilan global de consommation d'énergie.

4.3.4.1 Analyse des données INS

Les données utilisées ici sont issues des différents recensements INS ; 1981, 1991, 2001. Ceux-ci renseignent, par secteurs statistiques, sur le nombre de logements privés occupés, la superficie habitable totale par secteur statistique et la répartition du nombre de logements suivant 6 classes de superficie.

Les résultats livrés par le dernier recensement présentent des incohérences par rapport à la dynamique d'évolution que l'on peut envisager à priori : la surface totale habitable, d'après les données de l'INS, aurait diminué entre 1991 et 2001, ce qui semble hautement peu probable.

L'enquête ESE 2001 est basée sur 1 215 907 logements répondants. Notons que plus de 500 secteurs statistiques ne sont pas renseignés et que, après vérification cartographique, une part importante de ceux-ci présente des logements antérieurs à 2001. De plus, certaines erreurs d'encodage sont observables : pour exemple, près de 130 secteurs statistiques sont renseignés avec une superficie habitable égale à 0, alors qu'ils sont encodés comme présentant au minimum un logement. Cependant, ces erreurs semblent de faible impact sur l'ordre de grandeur du volume total des m² habitables.

Tous les logements répondants de l'ESE sont ventilés suivant des tranches de superficie. La cohérence interne du recensement a été testée en calculant la surface totale habitable par secteurs statistiques, sur la base de cette ventilation et d'une surface moyenne représentative pour chaque classe.

CLASSE D'ÂGE ESE 2001	< 35m ²	35-54 m ²	55-84 m ²	85-104 m ²	105-125 m ²	> 125 m ²
SURF. MOY. REPRESENTATIVE	22 m ²	44,5 m ²	69,5 m ²	94,5 m ²	114,5 m ²	162,5 m ²

Pour toutes les classes d'âge nous avons pris la valeur moyenne de la plage proposée, sauf pour les deux classes extrêmes. Nous avons estimé qu'aucun logement de moins de 10m² n'était recensé et que la superficie maximale des logements était de 200m². Sur la base de ces superficies moyennes par classes, la superficie totale habitable a été recalculée pour les trois dernières périodes de recensement : 1981, 1991, 2001 (Tableau 29). Entre l'estimation calculée sur base des moyennes de superficie par classes et les données agrégées des recensements nous obtenons une faible marge d'erreur, comprise entre 1,77 % et 0,92 %.

Tableau 29. Nombre de logements et superficie habitable totale du parc résidentiel en 1981, 1991, 2001

ANNEE	TOT_LOG_REPONDANT_ESE (2001)	SUPERFICIE TOTALE EN M ² (DECLARATION INS et ESE)	SUPERFICIE TOTALE EN M ² (CACUL SUR BASE DE LA REPARTION DES SURFACES DE LOGEMENT, INS et ESE)	Erreur
1981	1 152 930		95260335	
1991	1 212 139	105011800	103153873	1,77%
2001	1 215 907	98360927,5	97459352	0,92%

Source : Recensements INS 1981, 1991 et 2001

Les incohérences vis-à-vis de la dynamique d'évolution du parc, que l'on peut poser à priori, persistent. Il ne s'agit donc pas d'une incohérence interne à l'encodage de l'ESE.

Pour mener une autre estimation de l'évolution de la superficie habitable du parc, nous nous sommes basés sur, d'une part, le nombre de ménages et, d'autre part, le pourcentage du nombre de logements par classes de superficie issues des données INS. Nous considérons ici qu'il y a un ménage par logement. Pour chaque classe de superficie, les surfaces moyennes présentées ci-dessus ont été choisies comme données de référence. Les classes de superficies des recensements de 1981 et 1991 ont été recalées sur celles de 2001.

Tableau 30. Pourcentage de logements privés occupés par classe de superficie en 1981, 1991, 2001

CLASSE DE SUPERFICIE (m ²)	INF_35	35-54	55-84	85_104	105_124	PLU_125
1981	4,75%	13,02%	40,83%	21,19%	9,44%	10,77%
1991	4,66%	15,11%	32,91%	20,97%	14,88%	11,47%
2001	8,42%	18,72%	28,17%	22,35%	13,12%	9,23%

Source : Recensements INS 1981, 1991 et 2001

La part des logements de moins de 55 m² est en progression nette entre 1991 et 2001 (Tableau 30). Ce qui peut souligner a priori un léger accroissement du nombre de logements collectifs. La part des logements de moins de 35 m² est en très forte hausse (de 4 à 8%). La diminution du nombre de logements ayant une superficie comprise entre 55 et 84 m², forte entre 1981 et 1991, se stabilise en 2001. Les grands logements de plus de 105 m² sont en faible diminution entre 1991 et 2001. Ces résultats sont à manipuler avec précaution. En effet ces variations peuvent être soit de véritables tendances d'évolution du stock soit les conséquences d'un changement de mode de questionnement intrinsèque au recensement de 2001.

La représentation de chaque classe de superficie sera appliquée au stock postérieur à 2001 (jusqu'à 2008) faute de données supplémentaires. Le nombre de ménages, après le recensement de 2001, est une donnée fournie par les observations de la DGSIE et du Bureau fédéral du plan.

Tableau 31. Nombre de ménages et superficie habitable totale du parc résidentiel en 1981, 1991, 2001 et 2008.

ANNEE	NOMBRE DE MENAGES	SUPERFICIE TOTALE EN M ²	PERIODE	TX d'accroissement Nbre de ménages	TX % d'accroissement superficie habitable
1981	1 187 000	98 075 354			
1991	1 290 000	109 779 898	1981-1991	8,68%	11,93%
2001	1 391 000	111 493 690	1991-2001	7,83%	1,56%
2008	1 485 090	119 035 345	2001-2008	6,76%	6,76%

Source : Recensements INS 1981, 1991 et 2001 ; BDF (2008) perspectives.

La surface habitable obtenue grâce à cette estimation pour 2001 est de 12,6 % supérieure à la donnée du recensement (Tableau 31). Néanmoins, l'accroissement de la superficie habitable entre 1991 et 2001 demeure particulièrement bas par rapport à la décennie précédente, alors que l'accroissement du nombre de ménages se maintient à 7,83 % entre 1991 et 2001 au lieu de 8,68 % sur la précédente période.

4.3.4.2 Calcul de la superficie chauffée (Ach) en 2008 sur base PICC

Pour la modélisation du stock bâti résidentiel, nécessaire à l'établissement d'un cadastre des émissions de CO² sur l'ensemble du territoire wallon, la superficie chauffée a été estimée sur la base des informations cartographique du PICC.

La surface de plancher est calculée sur base de la hauteur de chaque bâtiment divisée par 3, multipliée par la surface au sol. On obtient de la sorte des nombres d'étages non entiers (réels). On considère que les surfaces de plancher se répartissent de façon équiprobable dans le stock à l'échelle des secteurs statistiques et à fortiori aux autres échelles.

La surface calculée est ensuite pondérée par deux ratios. Le premier permet d'extrapoler la surface hors œuvre à partir de l'emprise bâtie, soit 0,90. Le second est un ratio communément utilisé entre la surface hors œuvre et la surface utile, celui-ci est fixé à 0,80.

Sur base des informations spatiales du cadastre, la superficie capable totale du territoire wallon est estimée à 179 400 772 m² en 2008, pour un total de 986235 bâtiments informés, soit une moyenne de 182 m² de plancher par bâtiment.

Ce type de calcul pourra être affiné au cours de la seconde année de cette recherche. Nous mesurons ici la superficie capable du stock, c'est-à-dire la superficie de plancher théoriquement disponible pour l'habitation.

Nous avons souhaité borner ces résultats avec la méthode d'estimation précédemment développée (voir 1.3.4.1). Pour 2008, nous avons refait le calcul, sur base des données INS en termes de répartition des logements par classe de superficie, non plus à partir du nombre de ménages mais du nombre de logements répertoriés au cadastre. Le cadastre informe en effet pour chaque bâtiment répertorié, le nombre de logements hébergés (Tableau 32).

Tableau 32. Estimation de superficie habitable totale du parc résidentiel en 2008 – comparaison de résultats.

Sources	ANNEE	NOMBRE DE MENAGES	NB DE LOGEMENTS	NB DE BATIMENTS	SUPERFICIE TOTALE EN M ²
BDF	2008	1 485 090			119 035 345
CAD	2008		1 509 585		120 998 708
CAD	2008			986 235	179 400 772

La méthode d'estimation par superficie moyenne des logements répartis suivant des classes de superficie et sur base du nombre de logements répertorié au cadastre est cohérente avec les résultats précédents, avec une marge d'erreur de 1,6 %.

Le calcul sur la base des emprises bâties et du nombre de niveaux offre des résultats nettement supérieurs ; +48 % de surface. Plusieurs explications à cela. Premièrement, cette surface utile est en effet trop importante par rapport à la réalité car elle inclut d'autres fonctions que le logement (commerce, bureaux), une partie de la seconde résidence et le logement vacant. Elle est potentiellement surestimée notamment pour le parc ancien : l'hypothèse qui fixe les hauteurs de niveaux à 3m est sans doute un peu pessimiste. La surface capable calculée est évidemment supérieure à l'ESE qui est basée sur un calcul de la superficie habitable, telle que définie à l'ESE et qui n'incluait (en principe) que les surfaces de vie. Il convient toutefois de noter que le calcul devait être effectué par les enquêtés et pouvait être assez fastidieux. 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 à la quantité de m² potentiellement remobilisable dans le stock existant pour intensifier l'utilisation de celui-ci. Dans la suite de la recherche, c'est dans cette optique que l'affinement des connaissances des surfaces de planchers existantes devra être mené.

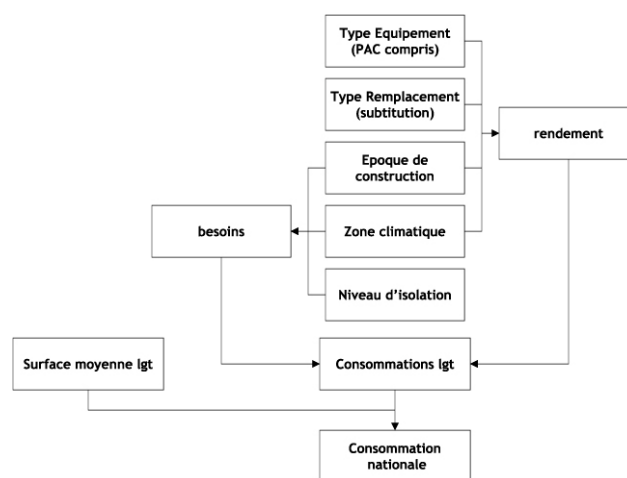
La superficie chauffée par secteur statistique sera introduite dans le calcul des besoins et des consommations énergétiques en vue de la réalisation d'un cadastre des émissions de GES à l'échelle du territoire wallon. Nous appliquerons les résultats issus du croisement entre nombre de logements répertoriés au cadastre et les répartitions de surfaces issues de l'INS, soit 121 millions de m².

4.4 CADASTRE DES ÉMISSIONS DE GES DANS LE STOCK BÂTI RÉSIDENTIEL

4.4.1 Données de cadrage sur la consommation énergétique

Le calcul des consommations énergétiques liées au chauffage dépend d'une part des besoins et d'autre part du système de chauffage. Les émissions de GES dépendent des facteurs d'émissions de chaque vecteur énergétique.

Figure 43. Schéma de calculs simplifié des consommations de chauffage



Source : Rapport ETHEL (2010)

Le bilan énergétique wallon, élaboré par l'ICEDD, sur la consommation du logement en 2005, nous fournit des données de cadrage à l'échelle régionale. Ce bilan est calculé suivant une méthodologie top-down : données régionalisées pour l'électricité et de gaz.

Pour le charbon et les produits pétroliers, les évolutions de vente en Belgique (SPF EPMECME) ont été appliquées. Pour les énergies renouvelables, l'ICEDD a travaillé à partir du bilan renouvelable régional (DGSIE, 2001).

Tableau 33. Consommation d'énergie réelle par usage (en GWh)

	Gasoil	Bois	Charbon	Gaz naturel	Butane/ propane	Electricité	PAC solaire	Géoth.	Vapeur cogen	Total
Chauffage	15 540	569	491	8359	360	782	15	3	22,5	26142
	59,4%	2,2%	1,9%	32%	1,4%	3%	0,1%	0%	0,1%	Soit 72%
Hors Chauffage	1223	578	26	1992	644	5876	13		3,3	10355
	11,8%	5,6%	0,3%	19,2%	6,2%	56,7%	0,1%		0%	Soit 28%
Dont ECS*	3,69	3,95	3,95	3,66	3,49	2,50			2,33	
Total	16763	1147	518	10350	1004	6658	28	3	26	36497
	45,9%	3,1%	1,4%	28,4%	2,8%	18,2%	0,1%	0%	0,1%	100%

Source : ICEED (2005) Bilan énergétique wallon. * ECS Eau Chaude sanitaire

La consommation totale du stock résidentiel en 2005 atteint les 36,5 TWh, en diminution par rapport à 2004 de 1,3 %, pour une baisse de 3,4 % des degrés-jours (DJ 15/15 Uccle). En 2008, l'ICEDD estimait à 34,6 TWh la consommation totale du stock résidentiel en forte hausse par rapport à 2007 (+18,1 %) avec une hausse de 15,9 % des degrés-jours 15/15 par rapport à 2007.

Nous nous intéressons en particulier aux consommations liées au confort thermique (chauffage), qui représentent une très large part du total. Cette part s'élève à plus de 72 % en 2005 (tableau 33). Nous estimons que cette part croît à 77 % en 2008, en accord avec les estimations de la région wallonne, l'ECS représentant 11 %. Ces postes principaux de consommation seront plus fortement sensibles aux leviers et aux scénarios de localisation, en raison des choix énergétiques associés à la typologie du logement (maison individuelle ou logement collectif).

Les consommations moyennes de chauffage et ECS, par mètre de carré de logement par an, décroissent légèrement de 2005 à 2008, en fonction des actions de réhabilitation du stock et de l'accroissement du parc au moyen de logements de performances accrues, selon le rythme de la réglementation thermique (tableau 34).

Tableau 34. Evolution des consommations d'énergie de chauffage (2001-2008)

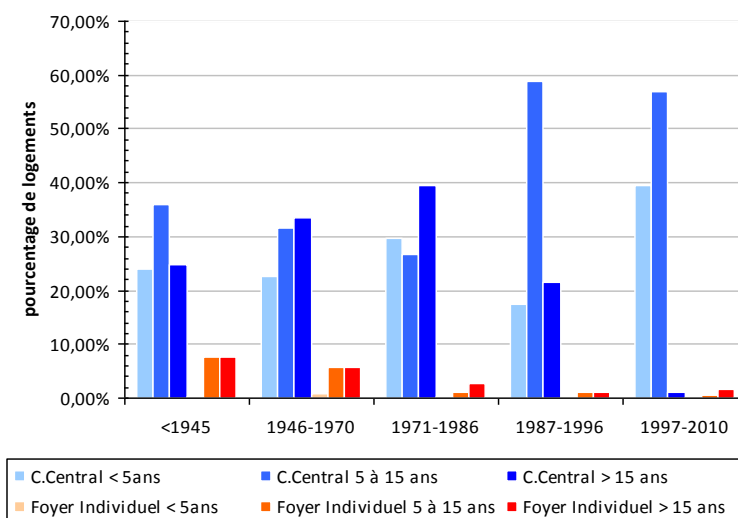
	Unités	2001	2005	2008
Consommation totale*	(TWh)	34,1	36,5	34,6
DJ 15/15*	°C	1929	1828	1829
Nombre de logements		1 383 855*	1 438 365*	1 509 585**
<i>Dont IC</i>		238 725	246 195	
<i>Dont MI</i>		1 145 130	1 192 170	
Surface totale du parc**	(m ²)	111 493 690	114 004 800	120 998 708
<i>Consommations totale unit. moy.</i>	kWh/m ² /an	305,5	320,1	286
<i>Consommations chauffage moy.</i>	kWh/m ² /an	220	230,5	220

Source : *ICEED (2005) Bilan énergétique wallon. ** INS, ESE 2001 et Base Cadastre, 2009

Les consommations moyennes par mètre de carré de logement représentent en 2008, 220kWh/m².an selon l'estimation de l'ICEDD, pour une surface de logement pondérée à 121 millions de mètres carrés.

Pour le chauffage, la consommation énergétique du stock bâti est fonction des besoins énergétiques du stock, du rendement et donc de l'âge des systèmes, des vecteurs énergétiques employés.

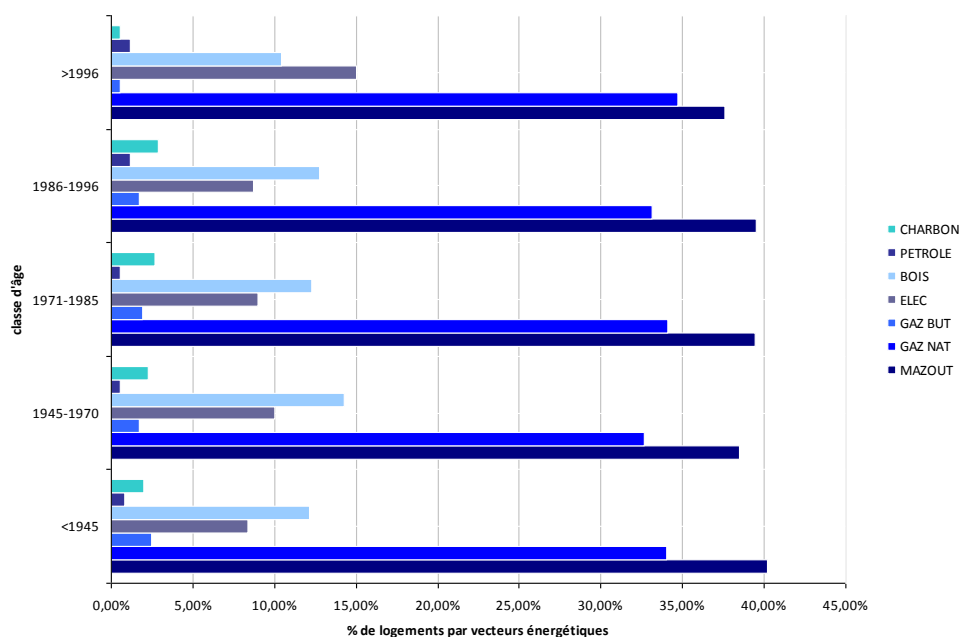
Figure 44. Proportion des logements suivant l'âge du système de chauffage et le type de système (CC ou FI)



Source : Base de données de l'Enquête qualité logement, 2006

D'après les statistiques issues de l'échantillonnage de l'enquête qualité logement de 2006 (Figure 44), les logements construits entre 1971 et 1986 présentent le plus fort taux de systèmes de chauffages obsolètes (près de 40 %). Cependant, on peut souligner un processus de rénovation, puisque 30 % des chaudières ont moins de 5ans. Dans les logements d'avant 1945, un tiers des systèmes de chauffage ont en majorité entre 5 et 15ans (35%), 24 % sont plus récent et 24 % sont plus ancien. On peut supposer ici que 24 % du stock possède un système de chauffage à bon rendement équivalent à une chaudière neuve. La dynamique de réhabilitation des logements anciens est là encore bien visible. Dans les logements construits entre 1946 et 1970, la proportion d'anciens systèmes de chauffage est la plus importante (plus de 30 %). Les chaudières récentes représentent un cinquième des systèmes.

L'exploitation des données de l'échantillonnage de l'enquête qualité logement, permet également d'identifier les principales énergies utilisées pour le chauffage des résidences principales, selon l'âge du logement (Figure 45). Pour chacune des classes d'âge pour le chauffage, la répartition des différentes sources d'énergie place le mazout en première place (entre 37 et 40 % des logements de chaque classe), suivi du gaz naturel (entre 33 et 35 % des logements) puis du bois (entre 10 et 14 %) et enfin l'électricité. L'électricité est présente pour toutes les 4 premières classes d'âge entre 8 et 10 %, ce qui dénote d'un processus de rénovation pour les logements les plus anciens, 15 % des logements se chauffent à l'électrique après 1996.

Figure 45. Répartition des différents vecteurs énergétiques suivant les classes d'âge de bâti

Source : Base de données de l'Enquête qualité logement, 2006

Notons que les principaux leviers envisageables dans la suite de l'étude pour l'évolution des équipements énergétiques du parc existant résident dans :

- l'amélioration des rendements des équipements (Figure 48).
- le taux de remplacement des équipements à l'identique, à un rythme calé sur leur durée de vie (en supposant une équipartition des chaudières en raison de leur âge) ;
- l'application d'une matrice de substitution des équipements non renouvelés à l'identique, vers les sources moins carbonées.

Figure 46. Ordre de grandeur des rendements totaux dans un système de chauffage centralisé (CCI et CCC) existant

Type d'installation	Rendements en % ($\eta_{\text{global}} = \eta_{\text{production}} \times \eta_{\text{distribution}} \times \eta_{\text{émission}} \times \eta_{\text{régulation}}$)				
	$\eta_{\text{production}}$	$\eta_{\text{distribution}}$	$\eta_{\text{émission}}$	$\eta_{\text{régulation}}$	η_{global}
Ancienne chaudière surdimensionnée, longue boucle de distribution	75 .. 80 %	80 .. 85 %	90 .. 95 %	85 .. 90 %	46 .. 58 %
Ancienne chaudière bien dimensionnée, courte boucle de distribution	80 .. 85 %	90 .. 95 %	95 %	90 %	62 .. 69 %
Chaudière haut rendement, courte boucle de distribution, radiateurs isolés au dos, régulation par sonde extérieure, vannes thermostatiques, ...	90 .. 93 %	95 %	95 .. 98 %	95 %	77 .. 82 %

Source : énergie +

Rappelons ici que le rendement choisi dans cette première année de recherche, pour chacun des systèmes de chauffage, est un facteur fixe de 0,75, issue des normes par défaut.

4.4.2 Emissions de GES et consommation finale totale et l'indice de performance énergétique du stock bâti

L'objectif initial de cet exercice est d'estimer les émissions de CO₂ à partir des activités émettrices selon la formule générale suivante (Desjardins et Llorente 2009) :

$$E_{s,a,t} = A_{a,t} \times F_{s,a}$$

Où

E = émission relative à la substance « s » et à l'activité « a » pendant le temps « t »

A = quantité d'activité relative à l'activité « a » pendant le temps « t »

F = facteur d'émission relatif à la substance « s » et à l'activité « a »

Ce même calcul peut être appliqué aux consommations énergétiques desquelles découlent les émissions de gaz à effet de serre :

Soit A l'activité de chauffage et F les émissions relatives à la substance s utilisées par le système de chauffage nécessaire à l'activité.

Dans notre cas, l'activité A représente le chauffage des surfaces habitées. La quantité d'activité a été évaluée via les besoins conventionnels en énergies des surfaces moyennes à chauffer pour un an. Cette quantification se base sur l'enquête socio-économique de 2001 et la base du PICC, que l'on considère comme un échantillon représentatif des bâtiments, des systèmes de chauffage et des surfaces habitables.

Chaque vecteur énergétique contribue de manière différente aux émissions de GES. Les informations sur les vecteurs énergétiques utilisés par les systèmes de chauffage sont issues de l'enquête qualité logement, suivant l'âge des logements.

La méthode de « be »³³ permet de calculer les besoins conventionnels en énergie de chauffage par m² de surface de plancher chauffé. Les définitions générales de k, U, λ ou R sont celles des normes de la série NBN 62.

Depuis sa publication en 1989, la norme NBN B 62 fait fonction de calcul normalisé pour la détermination du bilan énergétique des bâtiments. C'est sur la base de cette méthode qu'a été élaboré l'indice de besoin énergétique du stock bâti à l'échelle des secteurs statistiques pour la Wallonie.

L'indice de performance énergétique du stock bâti (IPE) croise les besoins en énergie avec les performances énergétiques des systèmes de production. Ces consommations sont rapportées à la surface à chauffer afin d'estimer une consommation par mètre carré par an.

Cet indice inclut les variables influant la performance énergétique physique des bâtiments (le coefficient de déperdition des bâtiments et l'indice d'inertie thermique des bâtiments), les apports passifs, qui sont de deux types : les apports internes conventionnels, les apports solaires, et enfin les rendements des systèmes de chauffage.

Les principaux usages de l'énergie dans le parc de résidences principales concernent :

- le chauffage des locaux ;
- la production de l'eau chaude sanitaire (ECS)
- la cuisson

³³ Pour plus de détail sur la méthode de Calcul de « be », voir les arrêtés du gouvernement wallon relatif à l'isolation thermique et ventilation des bâtiments, Code wallon de l'aménagement du territoire, de l'urbanisme et du patrimoine (1996)

- les usages spécifiques de l'électricité, la demande pouvant être désagrégée selon qu'elle relève de l'éclairage ou des appareils électroménagers.

Nous nous intéressons en particulier aux consommations liées au confort thermique (chauffage et ECS), qui représentent une très large part du total.

4.4.2.1 Méthodologie

L'indice de performance énergétique du bâti (IPE) par secteurs statistiques se calcul suivant la formule suivante :

$$\text{IPE} = \sum(\text{be} \cdot (1/\text{Rd} - 1)) \quad \text{en kWh/m}^2 \cdot \text{an}$$

Avec

be, les besoins conventionnels du bâtiment en énergie de chauffage par mètre carré chauffé par an

Rd, le rendement du système de chauffage. Ici nous avons pris dans un premier temps des rendements de système de chauffage identique pour chaque système, soit 0,75. Il s'agit d'une hypothèse pessimiste.

Les besoins conventionnels en énergie de chauffage rapportés au m² de surface chauffée sont donnés par la formule suivante :

$$\text{be} = (24/1000 \cdot 3,6 \cdot \text{Pb} \cdot \sum_{12\text{mois}}(\text{deg.j}^*)) / \text{Ach} \quad , \text{ en MJ/m}^2 \cdot \text{an}$$

Où,

Pb, est le coefficient de déperdition thermique des bâtiments

Ach, est l'aire de plancher chauffé

Deg.j, sont les degrés-jours équivalent, $\text{deg.j}^* = n_j \times (T^{\circ}_{\text{NC}} - T^{\circ}_{\text{EX}} - R_s)$, avec R_s coefficient de récupération solaire.

Le comportement thermique des bâtiments s'établit sur la base de plusieurs paramètres physiques internes et externes.

L'indice de besoin énergétique nécessite d'estimer ou de calculer plusieurs variables telles que :

- le coefficient de déperdition des bâtiments
- l'indice d'inertie thermique des bâtiments
- les apports conventionnels internes et température de non chauffage
- les apports solaires et coefficient de récupération

Le coefficient de déperdition thermique des bâtiments Pb tient compte à la fois des pertes par parois et par ventilation. Nous l'avons réécrit comme suit :

$$\text{Pb} = (\sum a_j U_j A_j + \sum \Psi_{l,j} I_j + \text{Pv}) / \text{fv} \quad , \text{ avec Pv coefficient de déperdition par ventilation ; Pv} = 0,34 \cdot b \cdot V$$

Où,

U_j est le coefficient de transmission thermique de la paroi de type j, en W/m²/K ; et A_j est la surface de la paroi déperditive de type j, en m². Les types de parois sont : mur, vitrage, toiture, plancher ; a_j , un coefficient de pondération.

I_j est le linéique du pont thermique de la liaison k. Nous ne considérons ici que les ponts thermiques de dalle à chaque niveau ; et Ψ_j est le coefficient de transmission thermique linéique du pont thermique ;

V, volume chauffé, en m³ ; 0,34, chaleur volumique de l'air, en Wh/m³.K ; b, le taux de renouvellement de l'air, fixé par la norme be à 0,75 ;

En l'absence de norme belge sur le taux de ventilation moyen, rapporté au volume brut chauffé (b), on prend $b=0,75$

En l'absence de norme belge fixant le facteur de correction des déperditions thermiques dues à l'effet du vent (f_v) ; $f_v=1$

En l'absence d'une connaissance fine de la sensibilité du coefficient de transmission thermique linéique des ponts thermiques en Wallonie (Ψ_{lj}) ; $\Psi_{lj} = 0,7^{34}$

Pour l'indice d'inertie thermique des bâtiments (I), on admet, conformément à la méthode be, qu'un indice peut être attribué aux bâtiments a priori : la classe d'inertie I3 est attribuée aux maisons et I5 pour les immeubles. Nous n'utiliserons ici que l'indice I3, que nous appliquons à l'ensemble du stock.

Les apports passifs sont de plusieurs types : les apports internes conventionnels, les apports solaires.

Le flux des apports internes conventionnels est proportionnel à la surface de plancher (A_{ch}) chauffé, soit $\Phi_{int} = 5,42 \cdot A_{ch}$, en W. Cet indice ne tient pas compte des comportements particuliers des usagers.

La température de consigne est fixée à 21°C pour les logements.

Le temps de chauffe est continu. Nous prenons l'hypothèse pessimiste que la différence de consigne entre jour et nuit est de 2°C.

Les apports solaires sont fonction de l'aire de récupération des vitrages et du facteur d'ombrage. Pour simplifier le calcul, nous considérerons ici que la surface équivalente de récupération des apports solaires correspond strictement au pourcentage de vitrage (T_v) des parois opaques verticales déperditives (Amur) fixé dans les archétypes. Soit $A_{\text{éq}} = A_{\text{mur}} \cdot T_v$.

Le facteur d'ombrage correspond aux masques solaires produits par les bâtiments environnants, la végétation, le relief, etc., sur les façades des bâtiments. Soit $f_o = f_1 \cdot f_2$.

En site dégagé $f_o = 1$.

Pour simplifier le calcul nous avons choisi de définir un facteur d'ombrage (f_o) par classe de densité de logements à l'hectare :

- densités de 0 à 20 logts/ ha urbanisé - masque = 0 %
- densités de 20 à 40 logts / ha urbanisé - masque = 10 %
- densités de 40 à 60 - masque = 20 %
- densités de 60 à 80 - masque = 30 %
- densités de + de 80 - masque = 40 %,

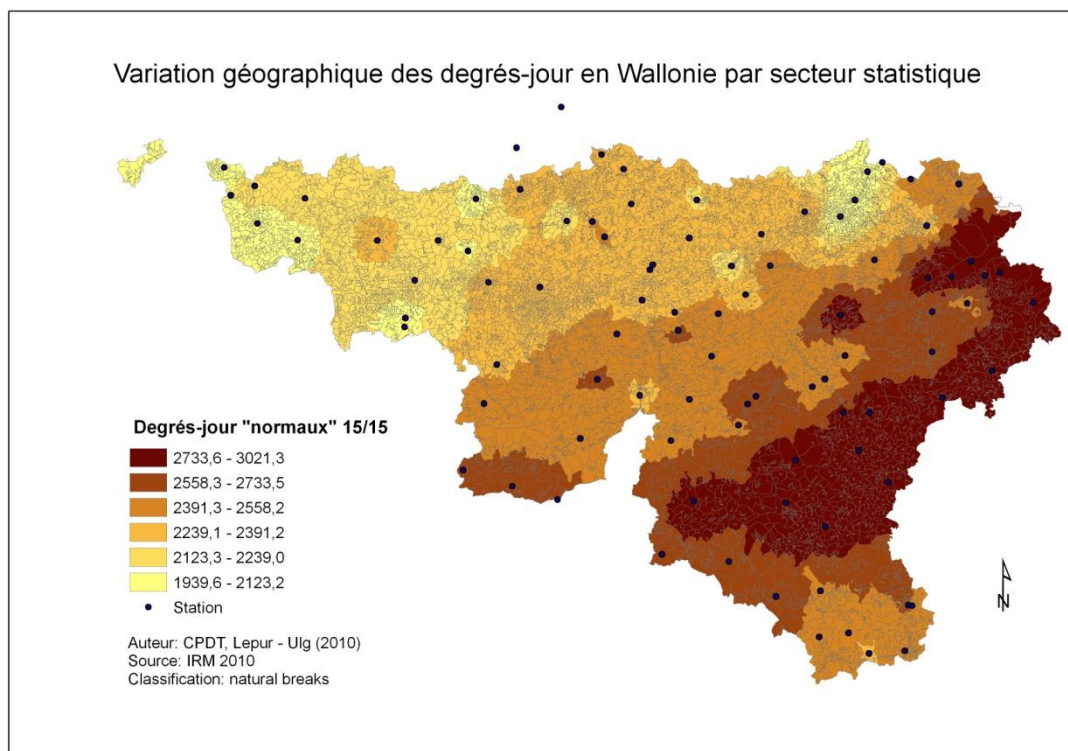
Ce masque correspond à la perte d'ensoleillement incident sur les fenêtres. Relier ces classes de densité de logement à ces facteurs d'ombrages est de nature à pénaliser les résultats obtenus pour les gains passifs du stock existant. Un affinement de cette variable nécessitera une étude précise d'un échantillon représentatif de tissus urbains.

Par hypothèse, nous avons considéré que les bâtiments étaient iso-orientés et l'énergie solaire incidente est donc égale à la moyenne de l'énergie solaire incidente selon les différentes orientations reprises dans la norme be 450.

Pour un lieu donné, le Degré Jour est une valeur représentative de l'écart entre la température d'une journée donnée et un seuil de température préétabli. Il est un des paramètres environnementaux de l'évaluation des dépenses en énergie pour le chauffage ou la climatisation. Afin d'évaluer la variation géographique des degrés-jour en Wallonie, nous nous sommes procuré par l'Institut Royal Météorologique les normales des degrés-jour 15/15 pour 93 stations (91 en Wallonie et 2 à Bruxelles). Les degrés jours ont été calculés sur base des normales de la période 1901 - 1978.

³⁴ Valeur par défaut issue des logiciels de modélisation thermique, type Comfie

Figure 47. Cartographie des degrés-jour par secteurs statistiques en région wallonne



Source : IRM, 2010

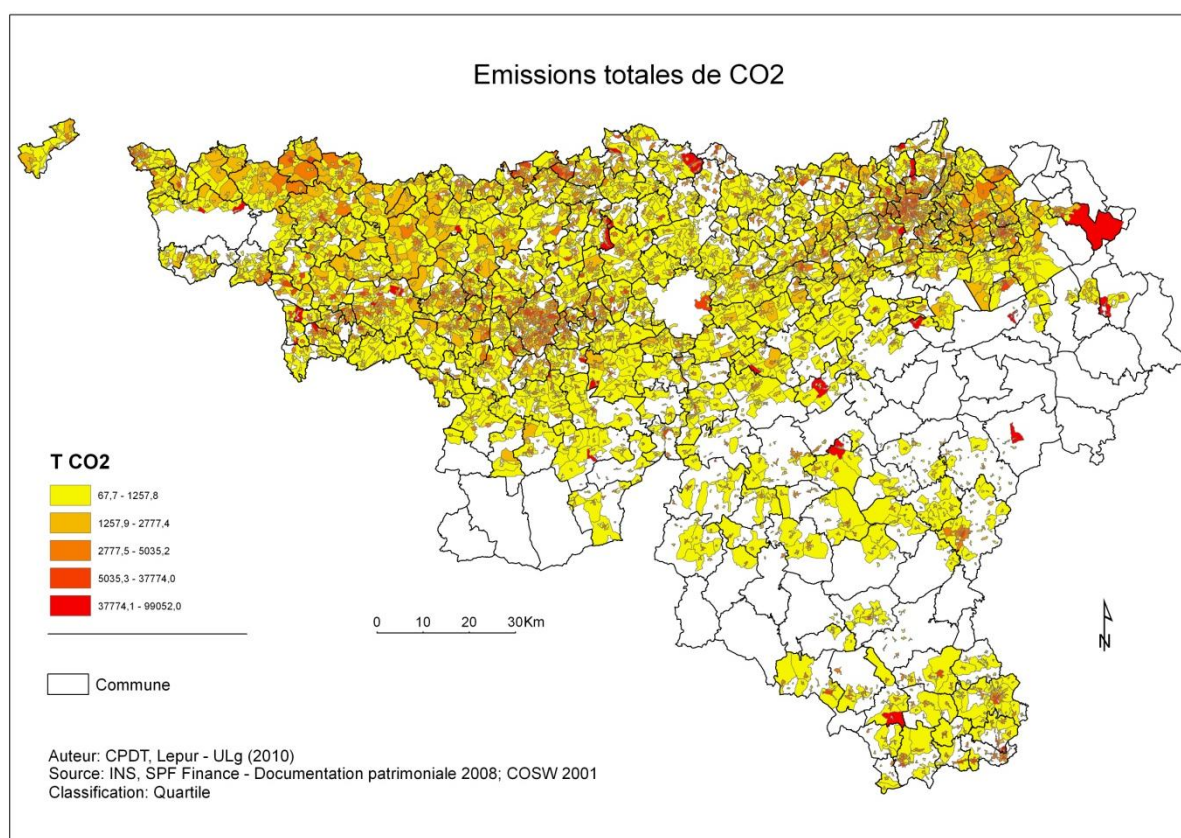
La bonne couverture spatiale de ces dernières permet d'extrapoler un ensemble de valeurs continues sur l'entièreté du territoire. Une méthode d'interpolation simple appelée « Inverse distance weighting » est utilisée pour obtenir une cartographie complète des degrés-jours, d'une résolution de 50m sur 50m, qui dépasse les zones couvertes par le réseau de stations. La moyenne des valeurs est ensuite calculée en fonction du découpage spatial considéré (secteur statistique, ancienne commune, commune).

En guise d'exemple, la cartographie des degrés-jour par secteur statistique est reprise ci-dessus (Figure 47). Conformément à la cartographie présentée dans le précédent rapport de la CPDT³⁵, on observe que la tendance générale reste inchangée : les degrés-jours évoluent positivement du nord-ouest au sud-est en fonction de l'altitude principalement. Cependant, à ce zonage climatique belge « classique » vient s'ajouter des variations locales qui laissent apparaître des températures moyennes plus élevées dans les agglomérations (Liège par exemple) ou plus faibles dans les régions reculées ; de l'Ardenne (Saint Hubert par exemple). Ces résultats sont loin d'égaliser une analyse topo-climatique tenant compte des effets de site (l'orientation des versants, le relief, la couverture végétale, l'exposition aux vents, etc. peuvent entraîner des variations locales de température très importantes). Cependant, ils constituent un gain de précision supplémentaire appréciable dans notre analyse des performances énergétiques à l'échelle des quartiers.

³⁵ CPDT (2005), Contribution du développement territorial à la réduction de l'effet de serre.

4.4.2.2 Principaux résultats

Figure 48. Cartographie des consommations énergétiques finales totales par an, par anciennes communes, région wallonne, couverture du PICC.



Source : INS, PICC, Documentation patrimoniale 2008

Les calculs sont effectués à l'échelle des secteurs statistiques couverts par le PICC puis agrégés à l'échelle des anciennes communes.

La validation du modèle n'a pas encore été réalisée. Cette validation devra s'appuyer sur une étude précise afin de préciser, entre autres, les paramètres suivants : température interne de consigne, facteur d'ombrage, pourcentage de vitrage, période de chauffe.

Deux perspectives sont envisageables pour informer cette validation : l'élaboration d'une étude par échantillonnage à l'échelle de la région wallonne et une comparaison avec des études segmentaires déjà existantes (REITER S., 2009, DE HERDE M. 2008, HAUGLUSTAINE J.M., 2006). Nous évaluons que cette validation pourrait être réalisée à échéance de trois mois.

Avec les données en notre possession aujourd'hui, on calcule une consommation moyenne de 350 kWh/m².an pour l'ensemble du stock couvert par le PICC.

Cette valeur temporaire est nettement supérieure à la moyenne calculée sur base des chiffres de l'ICEDD, soit 286 kWh/m².an en 2008 (voir 1.4.2.1).

La différence entre les deux valeurs est liée d'une part à des considérations méthodologiques (approche bottom-up versus top-down). D'autre part, nous considérons de manière abusive que l'ensemble du stock de logements est chauffé pendant toute la période de jour. Cette hypothèse, bien que non réelle, est indispensable à une spatialisation. Enfin, l'écart entre les deux résultats peut aussi être lié aux phénomènes climatiques : les degrés jours pour 2008 étaient assez faibles par rapport à ceux enregistrés en 2009 (2084 en DJ 15/15 à Uccle contre 1829 en 2008, soit une variation avoisinant les 10%).

Il faut souligner ici que les besoins énergétiques du stock sont directement liés à la surface de plancher chauffé. Deux méthodes ont été testées pour ajuster les consommations calculées, aux m² de plancher de l'ESE. Dans le premier cas, on applique une transformation linéaire à tous les secteurs statistiques, sur base du rapport entre les m² de plancher de l'ESE et les m² de plancher du PICC. Dans le second cas, on applique une transformation en fonction du rapport qu'on observe à l'échelle des secteurs statistiques. C'est cette deuxième méthode qui a été retenue au final. Elle apparaît en effet plus pertinente en termes de spatialisation. Au global (consommation globale pour l'ensemble des secteurs statistiques) la différence entre les deux méthodes est minime (moins de 1 %).

Au niveau du stock, la moyenne des consommations énergétiques se répartit de la manière suivante selon l'âge des bâtiments :

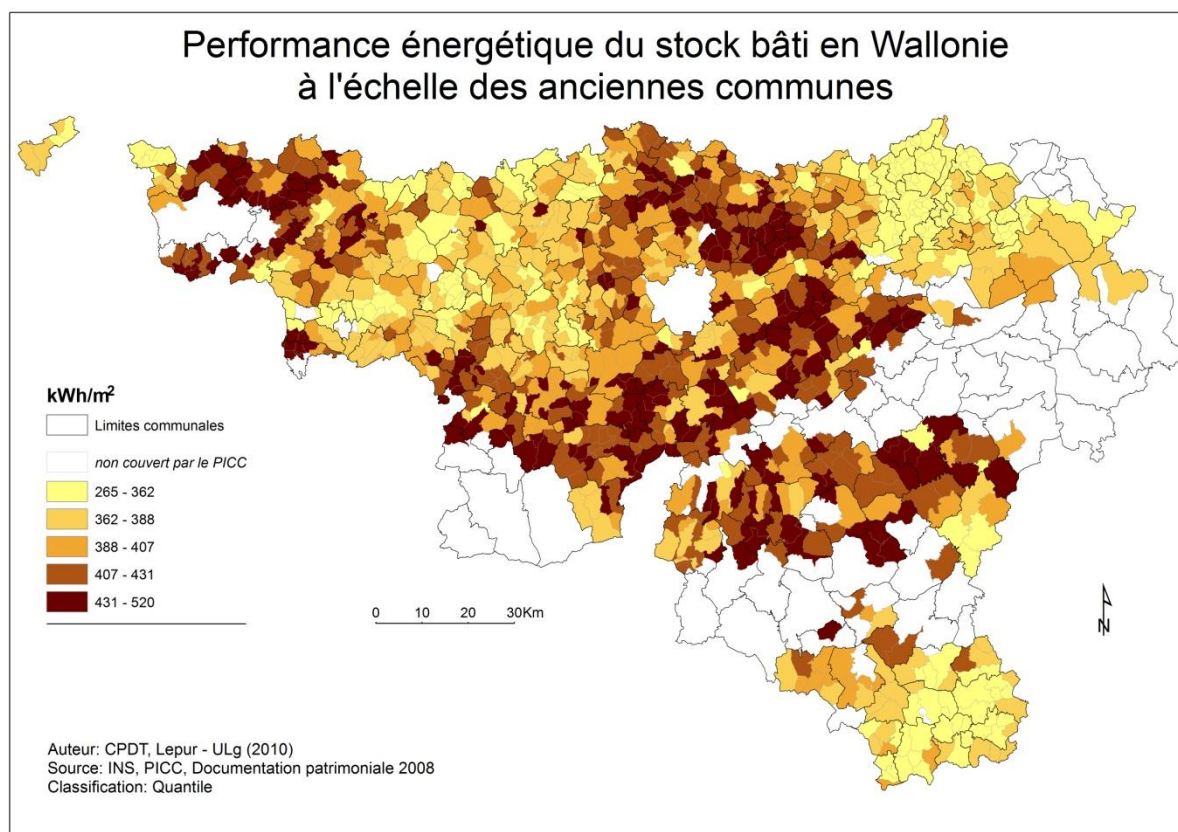
Tableau 35. IPE des bâtiments par classe d'âge. Consommations énergétiques finales unitaires moyennes par mètre carré suivant l'âge du bâti.

	Moyenne (kWh/m ²)	Ecart Type (kWh/m ²)
<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

Source : INS, PICC, Documentation patrimoniale 2008

On voit que la moyenne décroît avec l'âge, mais que cette décroissance 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/m². Cet écart type est lié aux différences de performances entre les bâtiments avant 1945 mitoyens (en milieu urbain) et non mitoyens (dispersés). La valeur moyenne pour l'ensemble du stock (365 kWh/m²) se rapproche de celle du stock avant 1945 en raison de la masse de bâtiments avant 1945 qui composent ce stock (plus de 50 %).

Figure 49. Cartographie des performances énergétiques finales par an par m² chauffé, par ancienne commune, région wallonne, couverture du PICC.



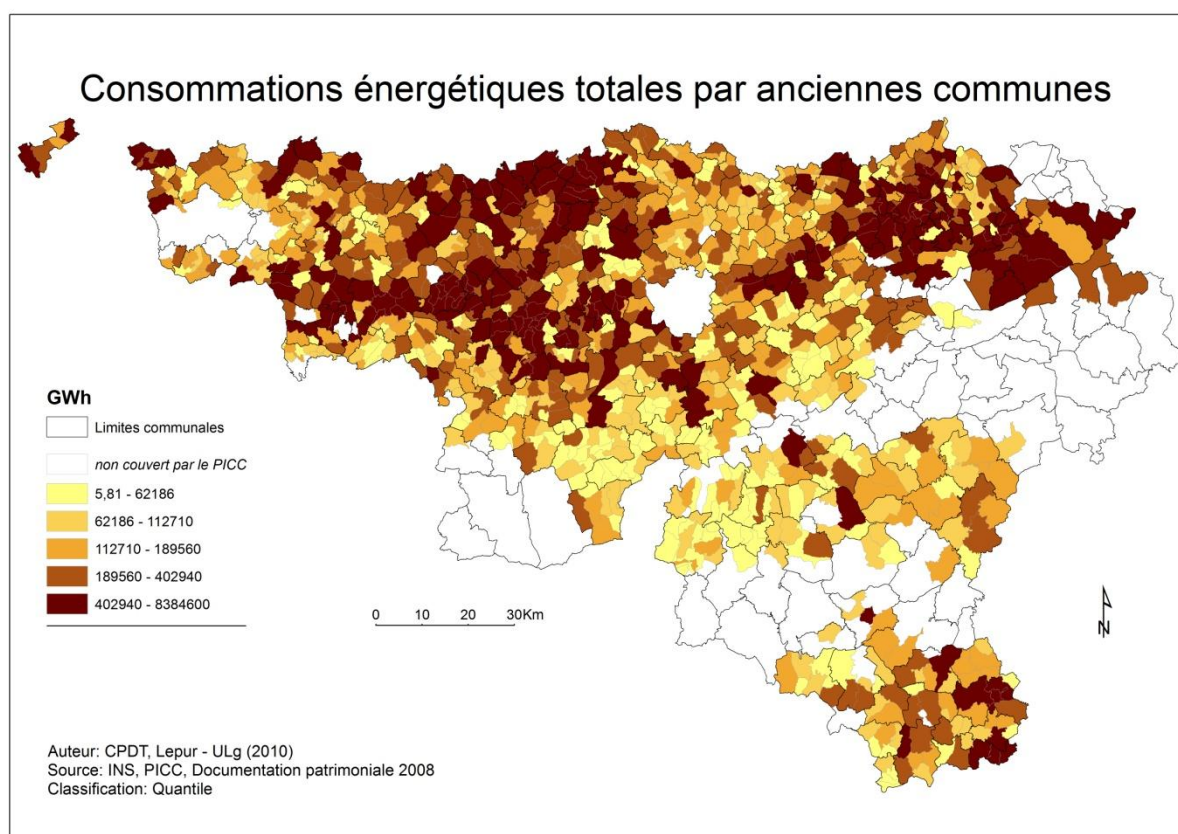
Source : INS, PICC, Documentation patrimoniale 2008

La carte des besoins de chauffage par mètre carré par an en région wallonne aurait été strictement similaire à celle ci-dessus de l'indice de performance énergétique en kWh par mètre carré par an. Nous avons appliqué en effet uniquement un coefficient fixe de rendement des systèmes de chauffage quelque soit l'âge du bâti ou le vecteur énergétique utilisé. Il s'agit de plus de consommations finales. Les résultats ci-dessus cartographiés sont donc uniquement influencés par les variables liées à la qualité de l'enveloppe des bâtiments, à la morphologie urbaine et à la localisation. Les calculs sont ici effectués à l'échelle des secteurs statistiques couverts par le PICC puis agrégés à l'échelle des anciennes communes.

On observe nettement une forte variation de l'indice des performances énergétiques du stock bâti suivant les différentes sous régions de la Wallonie. Les centres urbains ressortent ici avec un bon indice IPE malgré l'ancienneté du stock. Ces bons résultats peuvent être imputés à la grande compacité des bâtiments et au fort taux de mitoyenneté. Au sud du sillon Sambre et Meuse et au nord du Luxembourg, les performances sont moins bonnes. Pour la première zone, ces résultats peuvent être expliqués en partie par l'ancienneté du bâti et le faible taux de mitoyenneté. Pour la seconde, l'âge moins élevé du stock ne semble pas compenser l'impact de la dispersion des bâtiments. Dans les deux cas, le climat est un facteur fortement impactant : les températures extérieures sont plus rudes que dans le reste de la région. Le Hainaut affiche de grandes variations dans les indices de performances énergétiques.

Il faut souligner que le fait d'agréger les données à l'échelle des anciennes communes, pour une lecture cartographique facilitée, gomme de façon significative l'hétérogénéité des situations locales.

Figure 50. Cartographie des consommations énergétiques finales totales par an, par anciennes communes, région wallonne, couverture du PICC.



Source : INS, PICC, Documentation patrimoniale 2008

Si on analyse maintenant les résultats des consommations finales totales, la carte s'en trouve inversée : les pôles urbains affichent de fortes consommations principalement explicables par la concentration importante du volume de surfaces à chauffer. Cette concentration et les bons indices IPE dont elles bénéficient font de ces zones, des sites potentiellement intéressants pour le développement des réseaux de chaleur. La partie ouest du Brabant wallon, qui présente un bon indice IPE (stock bâti récent, densification en court), affiche des consommations finales globales élevées. Celles-ci sont principalement dues à la grande quantité de surfaces chauffées.

A l'influence de la quantité de surface à chauffer s'ajoute l'influence de la qualité thermique des bâtiments. Ces dernières semblent de nature à être fortement pondérée, notamment pour les bâtiments faiblement performants énergétiquement par la morphologie des ensembles bâtis.

5. LIENS ENTRE STRUCTURE TERRITORIALE ET CONSOMMATIONS ÉNERGÉTIQUES

5.1 INTRODUCTION

Les deux chapitres précédents présentaient l'évaluation des dépenses énergétiques liées aux comportements de mobilité et à l'espace résidentiel bâti. Ces deux cadastres énergétiques ont été réalisés à l'échelle la plus fine possible, pour nous permettre d'identifier de manière précise quelles sont les variables structurantes qui influencent les émissions de CO₂.

Cette section a pour but de définir les variables territoriales et socio-économiques prises en compte dans notre recherche et d'étudier les liens existant entre celles-ci et les consommations énergétiques. Dans un premier temps, nous présentons le modèle d'analyse qui a été choisi. En deuxième lieu, les variables territoriales et socio-économiques sont explicitées en détail. Celles-ci ont été construites à différentes échelles afin de pouvoir être croisées d'une part avec les consommations énergétiques liées aux déplacements domicile-travail et d'autre part avec les consommations énergétiques des bâtiments résidentiels. Les analyses statistiques sont menées respectivement aux points 5.4 et 5.5. Pour finir, les résultats permettent de dresser une première discussion concernant l'influence relative de chacune des catégories de variables sur les consommations énergétiques.

5.2 DÉMARCHE DE LA RECHERCHE ET CHOIX DES VARIABLES

5.2.1 Modèle d'analyse

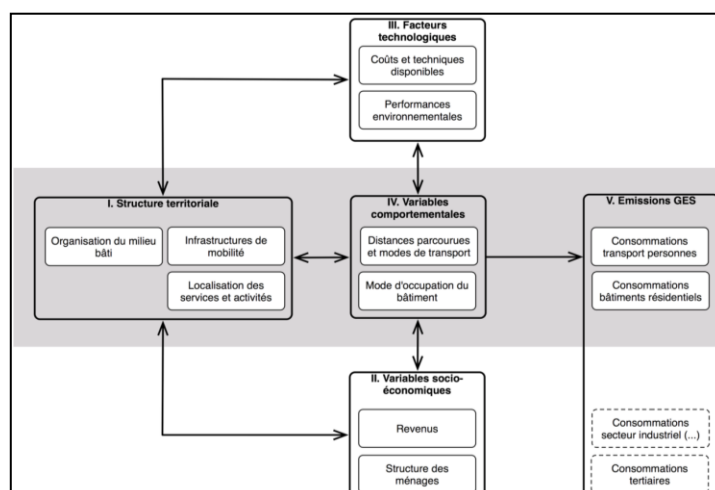
La revue de la littérature internationale a permis de mettre en évidence quatre grands types de variables qui interviennent dans la détermination des comportements de mobilité et d'habiter :

- I. Formes d'organisation territoriale
- II. Caractéristiques socioéconomiques
- III. Performances environnementales
- IV. Comportements

Ces variables interagissent entre elles et, ensemble, influencent les émissions de gaz à effet de serre. C'est sur ces interactions, au sein du territoire wallon, que se concentrent nos investigations. 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, doivent être prises en compte dans notre modèle d'analyse.

Le modèle présenté ci-dessous explicite ce qui est testé dans ce chapitre. Ce qui nous intéresse en particulier sont les relations entre la structure territoriale et les comportements de mobilité, et entre cette même structure et les consommations liées au bâti. Par ailleurs, les émissions du secteur industriel sont écartées de notre modèle étant donné que notre étude se focalise sur les secteurs sur lesquels l'aménagement du territoire a une emprise. Les émissions du secteur industriel ne sont finalement influencées que par le type d'activité et par les normes environnementales qui lui sont imposées.

Figure 51. modèle d'analyse de la recherche



5.2.2 Liste complète des variables intervenant dans le modèle

I. Structure territoriale

- Organisation du milieu bâti
 - Hierarchie des villes et des communes (taille des pôles)
 - Accessibilité à l'emploi
 - Densité de la population et évolutions démographiques
 - Taux d'urbanisation (Superficie urbanisée par secteur statistique)
 - Densité d'emprise bâtie des zones urbanisées
 - Densité de logements des zones urbanisées
 - Volume habitable des zones urbanisées
 - Taux de mitoyenneté et % 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
 - Accessibilité au réseau des modes lents
- Localisation des activités
 - Mixité des fonctions
 - Taux emplois/habitants
 - Accessibilité aux services de proximité

II. Caractéristiques socio-économiques

- caractéristiques individuelles
 - Niveau de formation
- Niveau socioprofessionnel
 - Revenus (données de la Banque Carrefour)
 - Statut (ouvrier, employé, cadre, etc.)
- Ménages
 - Taille et composition des ménages
 - Possession de voitures individuelles par ménage

III. Performances environnementales

- Transport
 - Moyenne du nombre de grammes de CO₂ émis / véhicule, kilomètre
- Stock bâti résidentiel
 - Age des bâtiments
 - Caractérisation des performances des éléments constructifs (vitrage, mur, toiture)
 - Mitoyenneté (2 F, 3 F, 4 F)
 - Types (individuel, collectif)
 - Hauteur des bâtiments
 - Emprise au sol
 - Système de chauffage

IV. Comportements

- Mobilité
 - Distances domicile-travail et domicile-école
 - Fréquence et motif de déplacement
 - Choix modaux
 - Taux d'occupation des véhicules
- Résidentiels
 - Mode d'occupation du bâtiment (durée et température de consigne)

5.3 CONSTRUCTION DES VARIABLES

L'objectif de cette recherche étant d'identifier les variables qui ont un impact sur les consommations énergétiques, et donc sur les émissions de GES, cette section discute de la construction des variables liées aux infrastructures de transport, à la localisation des activités et à l'organisation du milieu bâti. De même, les variables socio-économiques testées dans notre modèle sont présentées succinctement. Au vu de l'attention qui lui a été donnée dans les mondes académique et politique, la notion de densité est explicitée plus en détail.

Les variables de performances environnementales et de comportements ont déjà été présentées précédemment dans ce rapport (voir chapitre 1,2, 3). Celles-ci sont à la base des calculs des consommations énergétiques concernant les déplacements domicile-travail (cf. cadastre des déplacements) et l'espace bâti (cf. cadastre énergétique du bâti). Nous ne revenons donc pas sur ces variables ici.

La construction des variables territoriales présentées dans cette section a demandé la collecte et le traitement d'une masse importante de données : le cadastre digitalisé, le COSW, le PICC, les données des gares obtenues auprès de la SNCB, et des données issues de travaux antérieurs réalisés par la CPDT. Les variables présentées ci-dessous ont, dans la mesure du possible, été calculées à une échelle désagrégée pour ensuite être agrégées à l'échelle des secteurs statistiques, des anciennes communes et des communes. La cartographie des variables ne demeure ici qu'un outil de présentation ; pour que cette section reste concise, nous avons choisi de ne pas inclure toutes les échelles auxquelles ces variables ont été calculées.

5.3.1 La densité

Devant la diversité des définitions possibles de la densité, il semble pertinent de toujours relier la mesure à un périmètre spécifique de référence et au type de questionnement thématique que l'on se pose. Cette constatation s'impose pour s'extraire des ambiguïtés constantes de définition qui mènent quelquefois à comparer des valeurs incomparables ou bien à utiliser un type de densité pour des finalités auxquelles il ne répond pas.

Bien que la densité soit très souvent mise en avant lors des débats sur ville durable, notons que la notion de densité est une composante parmi d'autres dans l'analyse comparative qui permet de caractériser un territoire. Cependant, au vu de l'importance prise par la densité dans le débat scientifique et politique, il est primordial de bien en définir les différentes formes.

5.3.1.1 Différence entre densité nette et densité brute

La densité est le rapport d'éléments dénombrables sur une surface. Elle peut donc s'appliquer à une multitude d'objets géographiques pouvant être affectés d'une superficie. C'est un concept de mesure de la distribution d'objets dans l'espace.

Fouchier (1997) distingue la densité nette qui fait intervenir les surfaces uniquement utilisées pour une activité précise (logement, commerce, équipement, etc.) de la densité brute qui intègre l'espace dans sa totalité et qui, par conséquent, est plus dépendante de l'échelle de référence. Elles peuvent être définies ainsi :

— La *densité brute* est le rapport entre tout type de dénombrement et la surface totale du territoire administratif auquel il appartient, sans exclusion. La densité brute est très dépendante de l'échelle de référence.

— La *densité nette* est le rapport entre tout type de dénombrement et la portion spécifique du territoire à laquelle il se rapporte. La densité nette ne prend en compte que les surfaces des parcelles réellement occupées par l'affectation donnée.

Ces deux définitions générales posent la question des périmètres de référence. Déjà en 1988, Merlin rappelle que « si l'indicateur est clair, celui de la surface à prendre en compte l'est beaucoup moins et rend délicate l'utilisation de ce concept ». Des termes fréquemment rencontrés tels que densification, intensification ou encore compacité ne veulent pas dire grand-chose s'ils ne sont pas accompagnés d'une précision sur la mesure de densité à laquelle ils font référence. Notons pour finir que la notion de densité nette sera souvent préférée, car elle permet de se détacher de l'influence des limites administratives abstraites qui n'ont rien à voir avec l'espace urbanisé sur lequel influe l'aménagement du territoire.

5.3.1.2 Mesure de la surface urbanisée en Région Wallonne

Afin de calculer les variables de densité nette aux différentes échelles d'analyse considérées dans ce thème de recherche, il était d'abord nécessaire d'obtenir la donnée spatiale de surface urbanisée.

Nous avons choisi de considérer la surface urbanisée sur base d'une reclassification de la Cartographie de l'Occupation du Sol Wallon (COSW) de 2001. Les classes de celle-ci ont été regroupées en 3 postes : les superficies urbanisées, les superficies naturelles et les infrastructures (voir tableau 1). Les classes du COSW reprises comme zones urbanisées ont été sélectionnées de manière à identifier les parcelles du territoire wallon qui comportent des habitants et des emplois. Les zones naturelles reprennent les terrains non artificialisés. En plus des infrastructures de transport, la catégorie « infrastructures » regroupe également les zones non cadastrées du COSW. Cette classe reprend la grande majorité du réseau viaire (autoroutes, routes, chemins) ainsi que le réseau hydrographique.

Des imprécisions sont apparues lorsque certains bâtiments étaient affectés à de grandes parcelles non urbanisées. C'est le cas des terrains de golf ou des terrains militaires par exemple. Afin de pallier ce problème, une sélection sur base du PLI (2001) a été réalisée afin de ne conserver en zone urbanisée que les parcelles cadastrales bâties. Selon les classes, les parcelles non bâties ont été redistribuées dans la catégorie des zones naturelles ou des infrastructures. Le même traitement a été effectué pour les catégories n° 15 « autres³⁶ » et n° 9 « non classé³⁷ » du COSW qui comportaient, soit des terrains bâtis, soit des terrains non artificialisés. Le tableau ci-dessous met en évidence le contenu des classes ainsi que les corrections réalisées.

Tableau 36. Méthode de classification du COSW 2001

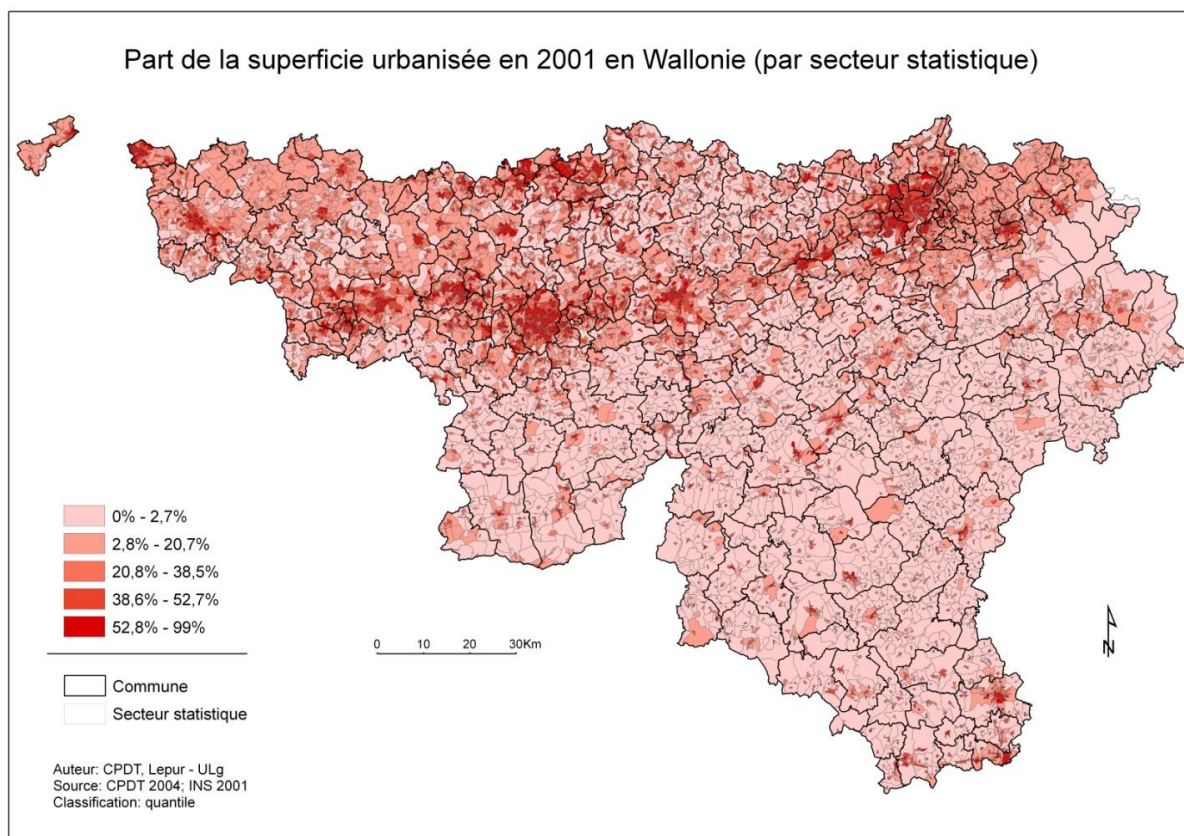
Superficies urbanisées (classes + noms)	Superficies naturelles (classes + noms)	Infrastructures (classes + noms)
1-1. Terrains résidentiels 1-2-1. Espaces d'activité économique, de service et d'équipement communautaire (excepté 1-2-1-2-6) 1-3-4. Friches, ruines et bâtiments abandonnés 1-4-2-1-2. Parcs résidentiels de WE	1-3-1. Extraction de matériaux 1-4-1. Espaces verts urbains 2. Territoires agricoles 3. Forêts et milieux semi-naturels 4. Zones humides 5. Surfaces en eau	0. Non cadastré 1-2-2. Réseaux routier et ferroviaire et espaces associés 1-2-3. Zones portuaires 1-2-4. Aéroports et aérodromes
Corrections		
1-2-1-2-6. Bâtiments et enceintes militaires 1-3-2. Décharges 1-4-2-1-1. Campings et caravaning 1-4-2-2. Terrains de sport, parcs de loisirs et d'attraction <i>Si non bâtie</i>		
1-5. Autres 9. Non classé <i>Si non bâtie</i>		

³⁶ Il s'agit généralement de bâtiments inclassables tels que la Citadelle de Namur, les Halles des foires de Coronmeuse à Liège par exemple.

³⁷ Microparcelles, non-lieux, chantiers en cours, etc.

La carte ci-dessous montre les résultats obtenus à l'échelle des secteurs statistiques en RW. Chaque secteur statistique se voit attribué le pourcentage de sa superficie occupée par la zone urbanisée. Les résultats se montrent cohérents avec l'espace bâti. Les grandes agglomérations wallonnes (Liège, Charleroi, Namur, Mons) ressortent bien. Les secteurs statistiques qui les composent sont caractérisés par un taux d'urbanisation très élevé. De nombreux noyaux villageois et les petites villes affichent également de très fortes valeurs.

Figure 52. Superficie urbanisée calculée sur base du COSW



Sur base du COSW et de la classification présentée ci-dessus (cfr tableau 36), le territoire wallon comporte 16 907 km², dont 1362,9 km² de superficie urbanisée (soit 8,1 % de la superficie totale), 14579,4 km² de superficie naturelle et des autres activités exclues de notre classification (86,2 %), 947 km² d'infrastructures (5,6 %), et une part très faible restant inclassable à partir du COSW (0,1 %).

Les résultats obtenus peuvent être comparés à la superficie urbanisée totale calculée selon d'autres critères qui sont publiés dans le tableau de bord de l'environnement wallon. La superficie urbanisée qui y figure atteignait 232 000 ha en 2004 (soit 13,7 % de la superficie régionale). L'espace que nous considérons pour le calcul de la densité nette est donc bien plus restreint que les estimations globales publiées par ailleurs. La méthodologie est différente et l'espace que nous voulons décrire est la zone urbaine sur laquelle il est intéressant de faire nos calculs de densité de population, de bâtiment, de logement et d'emploi. Prendre toutes les autres activités nous amènerait donc à considérer beaucoup de grandes parcelles abritant des activités extensives, des friches, et des infrastructures qui s'éloignent de la définition de la zone urbaine qui abrite le résidentiel et l'emploi.

5.3.1.3 Densité de population

La densité de population, suivant le type de représentation et l'échelle choisie, permet des niveaux d'information spécifiques (IAURIF 2005). Ainsi, la densité de population à l'échelle d'une commune peut être utilisée pour comparer des villes de tailles différentes. Le nombre d'habitants à l'hectare est quant à lui utilisé afin de déterminer la concentration de la population sur un secteur donné. À une échelle plus fine, la densité de population rapportée aux superficies occupées par le logement rend compte plus précisément des répartitions spatiales de la population au sein d'un quartier.

En matière d'analyse ou de planification spatiale, la densité d'habitants ou de population comporte des limites très vite perceptibles : à densité égale, les configurations de répartitions spatiales peuvent être multiples. Il s'agit d'une densité de contenu et non de contenant.

a) Densité de population brute en Région Wallonne

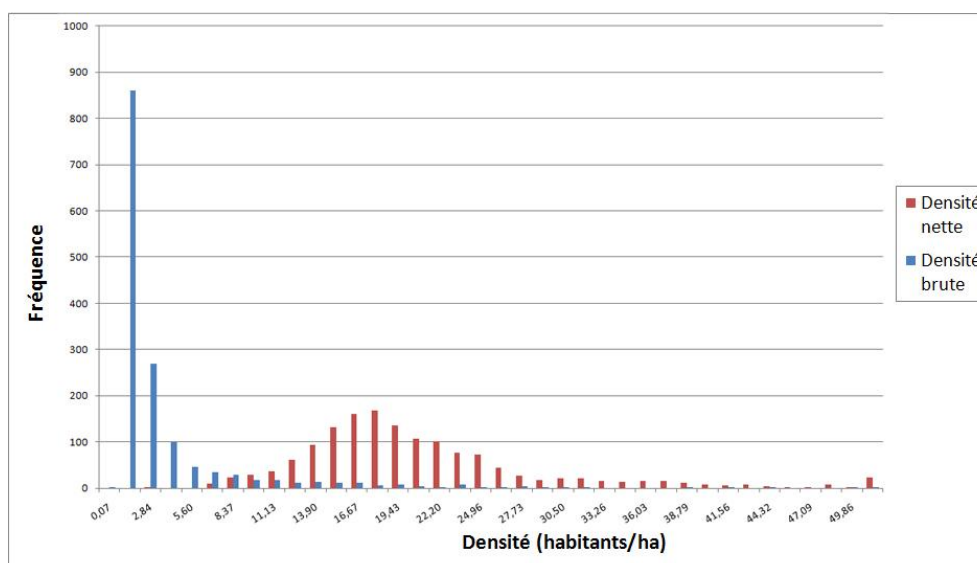
Cette densité est calculée sur base des données de population de l'INS en 2001 agrégées aux trois échelles d'analyse. Dans chaque zone géographique considérée, la densité brute est égale au résultat de la division de la population résidante par la superficie totale de la zone.

b) Densité de population nette en Région Wallonne

Cette densité est également calculée à partir des données de population de l'INS en 2001. Dans chaque zone géographique considérée, la densité nette est égale au résultat de la division de la population résidante par la superficie urbanisée.

Les résultats obtenus peuvent servir d'exemple pour mettre en évidence la différence entre densité brute et densité nette. La comparaison des deux types de densités de population aux trois échelles des secteurs statistiques, des anciennes et des nouvelles communes fait ressortir des résultats sensiblement différents. La différence majeure provient du fait que la densité brute est bien plus dépendante des limites administratives que de la densité nette.

Une observation des histogrammes de fréquence pour les deux mesures de densité à l'échelle des anciennes communes nous indique également que la densité nette est une mesure plus adéquate de l'aire urbaine. Les valeurs des fréquences décrivent une gaussienne relativement aplatie autour d'une moyenne. À l'inverse, l'histogramme des fréquences pour la densité brute prend davantage l'allure d'une exponentielle décroissante, et est fortement dissymétrique à droite. Concrètement, la mesure de la densité brute en région wallonne gomme la variabilité dans les zones moins denses. C'est pourquoi nous avons privilégié la densité nette tant que possible dans nos investigations.

Figure 53. histogramme des fréquences pour la densité nette et densité brute

Sources : INS, COSW

Une observation attentive des cartes suivantes (figure 54 et 54bis) nous permet d'appréhender la différence entre les deux mesures sur le plan de la répartition spatiale. La première carte présente simplement la densité nette de population à l'échelle des secteurs statistiques à l'échelle des secteurs statistiques. À l'échelle des anciennes communes et des nouvelles communes, les 4 cartes suivantes nous montrent que la densité nette dénote une répartition spatiale beaucoup plus hétérogène sur l'ensemble de la Région Wallonne. Ceci permet d'identifier qu'il existe une grande variabilité des densités dans les régions moins urbanisées de la région alors que les cartes de densité brute masquent celle-ci. Les communes et anciennes communes au nord du Sillon Sambre et Meuse et du centre du Brabant Wallon ne sont plus les seules à afficher des valeurs de densité fortes. Il est tout à fait normal que certaines communes et anciennes communes qui abritent des petites villes compactes affichent une densité importante. Cette observation permet dès lors de nous conforter à l'idée que la densité nette constitue une meilleure métrique de l'espace urbanisé réel que la densité brute.

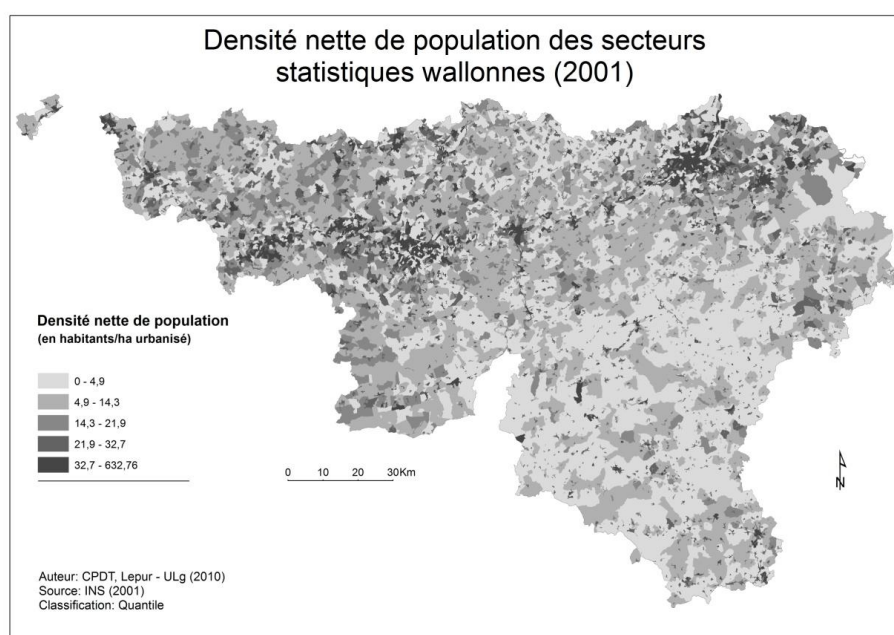
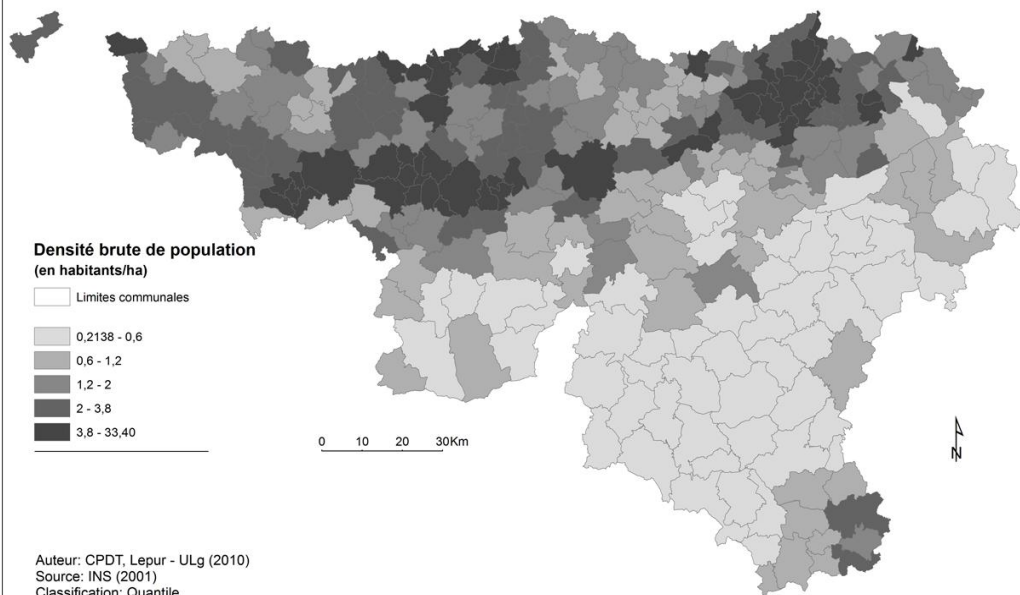
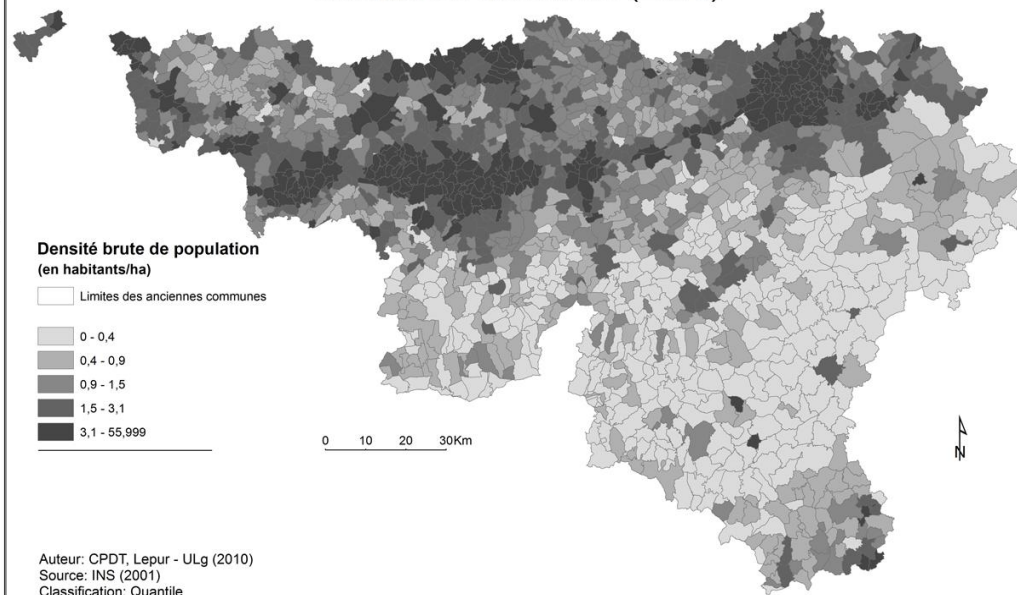
Figure 54. Densité de population nette à l'échelle des secteurs INS

Figure 54 bis : comparaison des densités nette et brute à l'échelle des anciennes communes et à l'échelle des communes

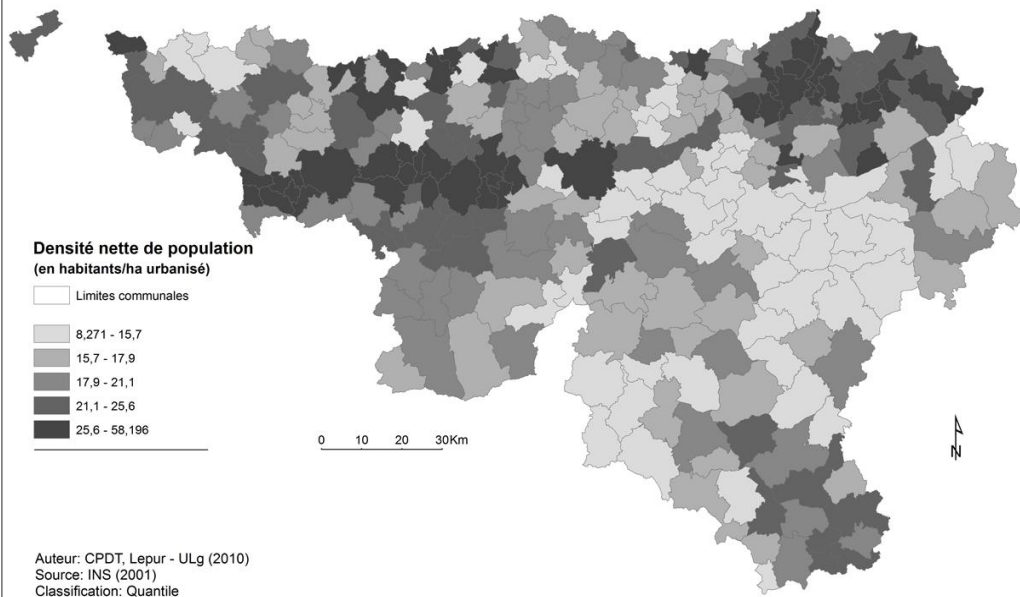
Densité brute de population des communes wallonnes (2001)



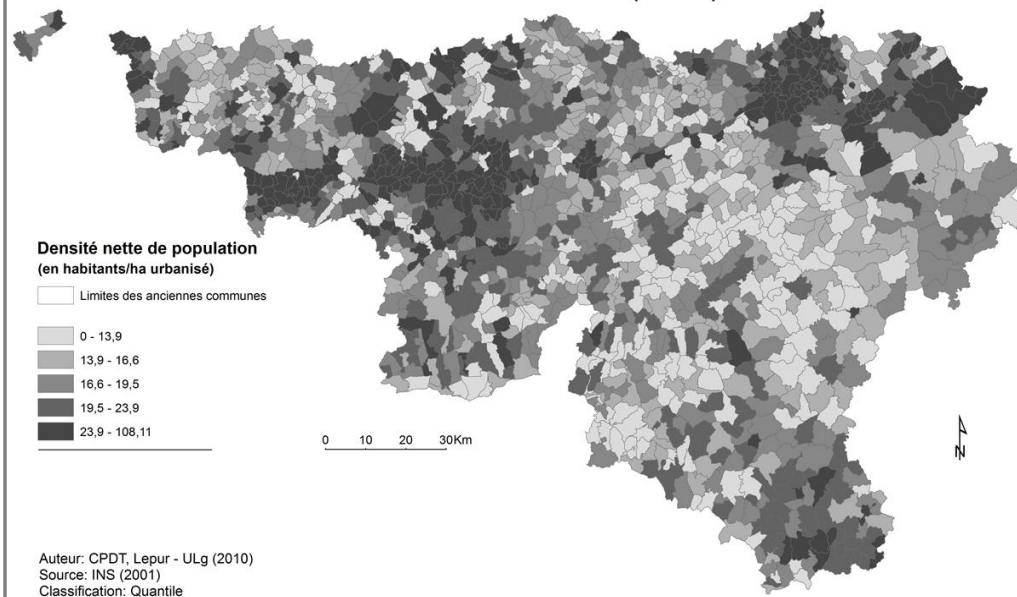
Densité brute de population des anciennes communes wallonnes (2001)



Densité nette de population des communes wallonnes (2001)



Densité nette de population des anciennes communes wallonnes (2001)



5.3.1.4 Densité de logements et de bâtiments

a) Densité brute de logements et de bâtiments résidentiels

La densité résidentielle permet de mesurer l'usage du territoire par la fonction résidentielle. Les données existantes disponibles à l'échelle des secteurs statistiques proviennent soit de l'enquête socio-économique de 2001, soit de l'INS qui les calcule sur base des données cadastrales. Dans un souci de cohérence vis-à-vis du travail effectué pour la réalisation du cadastre énergétique des bâtiments, nous avons choisi de nous baser sur les données désagrégées que nous avons obtenues de la Documentation Patrimoniale. Nous avons donc recalculé à travers nos propres traitements les densités de logement et de bâtiment sur base de données à l'échelle de la parcelle. La densité de logement a été calculée grâce à la formule suivante :

Nombre de logements rapportés à une surface de référence (km² ou ha)

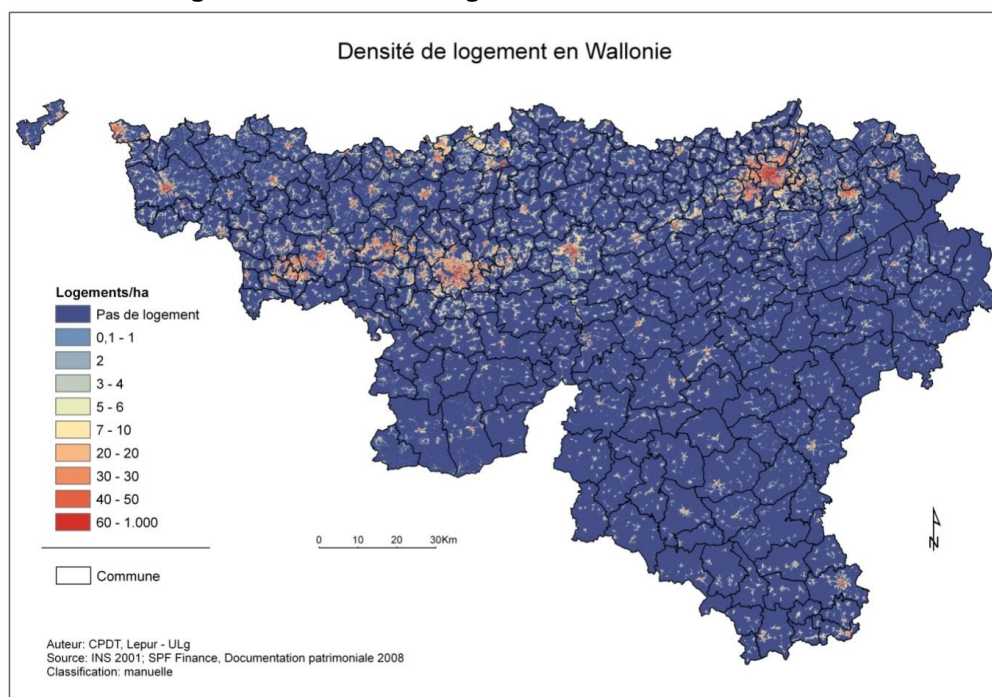
ou

Nombre de bâtiments résidentiels rapportés à une surface de référence (km² ou ha)

Des traitements ont dû être effectués sur les données brutes de la Documentation Patrimoniale. Premièrement, celles-ci intégraient aussi bien des logements permanents que des habitations secondaires. Il faut garder à l'esprit que les résultats de l'enquête socio-économique de 2001 relatifs à la mobilité, qui sont croisés avec nos indicateurs territoriaux, sont issus d'un questionnaire envoyé au domicile des habitants et non à leur résidence secondaire éventuelle. Dans un premier temps, il était donc nécessaire d'isoler les logements permanents dans la matrice cadastrale. Ceci a été majoritairement fait grâce à un tri sur l'information des natures cadastrales présente dans la matrice. Cependant, nous avons aussi procédé à un tri via le COSW grâce auquel nous avons pu supprimer tous les logements localisés en zones de loisirs.

Deuxièmement, la matrice cadastrale n'indique pas toujours le nombre de logements qu'abrite une parcelle. Sans entrer dans les détails, c'est une information qui doit se calculer dans le cas où un immeuble à appartements appartient à plusieurs propriétaires au moment de la construction.

Figure 55. Densité de logement à l'hectare



b) Densité de logement nette

De même que pour la densité de population, on ne tient ici compte que de la superficie urbanisée. Cette densité se mesure par la formule suivante :

Nombre de logements rapporté à la superficie urbanisée de référence (km² ou ha).

La surface de référence est bien sûr la surface urbanisée (voir 4.1) calculée à partir du COSW. La distinction des densités nette et brute par l'observation des histogrammes des fréquences peut une nouvelle fois être opérée (figure 56). Cet histogramme est basé sur les résultats obtenus à l'échelle des anciennes communes. Le même constat peut à nouveau être tiré : la répartition de la densité nette décrit une gaussienne autour de la moyenne alors que l'histogramme de la densité brute prend l'allure d'une exponentielle décroissante. La mesure de densité est donc très influencée par la surface de référence prise en compte.

Figure 56. Histogramme des densité de logements nette et densité de logement brute, calculées par anciennes communes

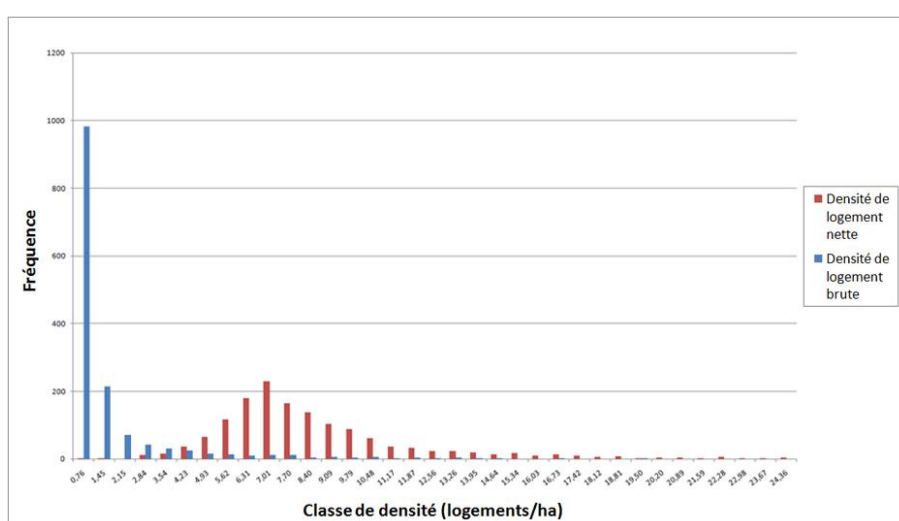
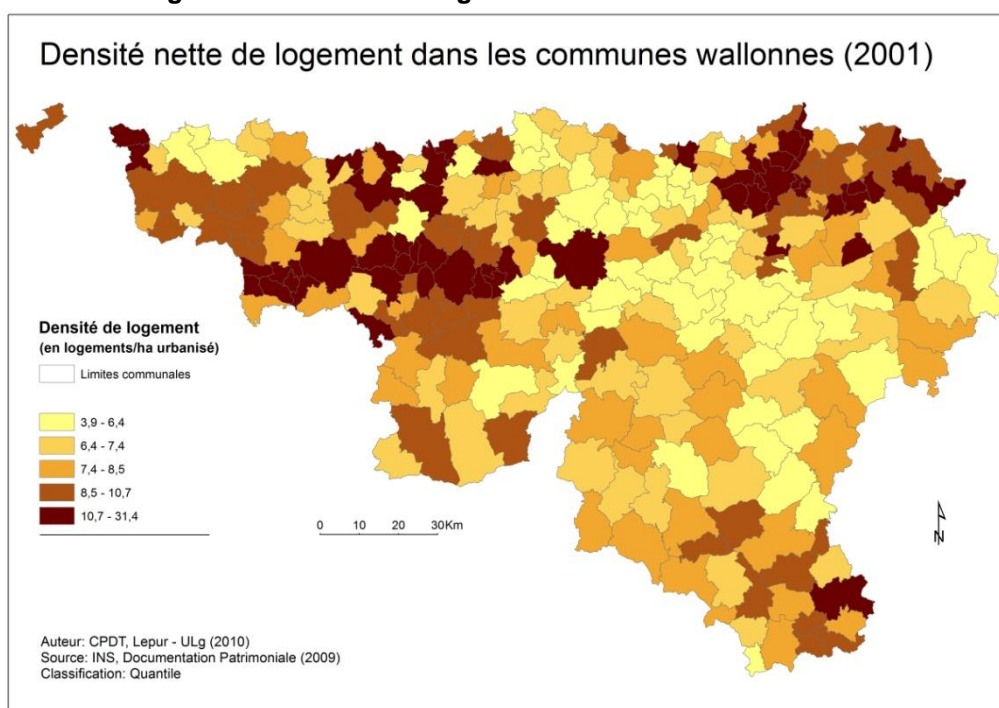


Figure 57. Densité de logement à l'échelle communale

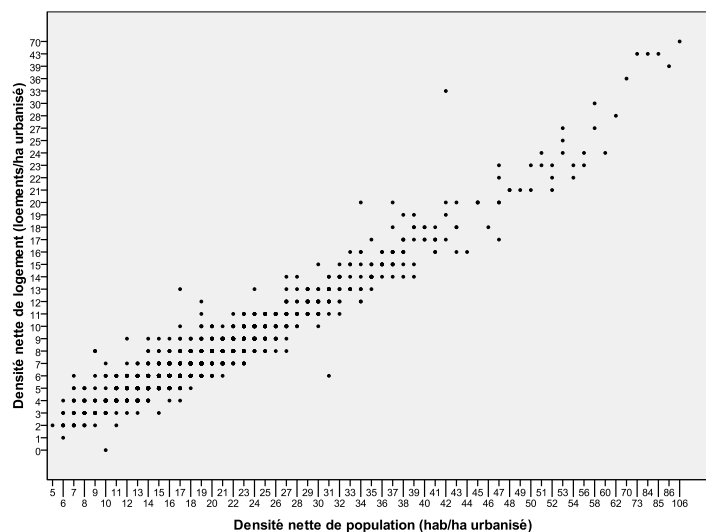


Les répartitions spatiales de la densité de population, calculée précédemment, et de densité de logement sont logiquement très similaires. D'ailleurs, l'indice de corrélation calculé à l'échelle des secteurs statistiques est de $r=0.956$. Il en est évidemment de même pour la répartition de la densité de bâtiment.

Tableau 37. Corrélation entre densité de logement nette et densité de population nette

	DensNetteLOG
DensNette- Pearson Correlation	,956
POP Sig. (2-tailed)	,000
N	1471

** . Corrélation est significative à un niveau de 0.01.



5.3.2 La densité d'emploi et la densité d'activité humaine nette

a) Densité d'emploi

La densité d'emploi est extrêmement variable selon le type d'activité dominant et le type de zone considéré. La densité d'emploi est définie par la formule suivante :

Nombre d'emplois rapporté à une surface de référence (km² ou ha).

Plusieurs auteurs ont mis en avant l'impact positif que cet indicateur a sur l'utilisation des modes alternatifs à la voiture. Frank et Pivo (1994) démontrent l'impact positif de cette densité sur la marche à pied et l'usage de transports publics. Cervero (1988) met quant à lui en avant que plus les parcs industriels sont denses en terme d'emplois par ha, plus la marche, le vélo et le covoiturage sont favorisés.

Les données d'emploi au lieu de travail sont primordiales pour cette recherche. Les mesures de densité d'emploi et les calculs d'accessibilité à celui-ci en dépendent. Actuellement, la source de données décentralisées la plus fiable provient de l'ONSS. Cet organisme comptabilise le nombre de salariés affiliés à l'ONSS travaillant dans chaque commune. Dans un futur relativement proche, le croisement de la Banque Carrefour des Entreprises avec l'ONSS et l'INASTI permettra certainement d'obtenir une cartographie plus fine des pôles d'emplois en Belgique, tenant compte également des indépendants. C'est notamment une des raisons pour laquelle la Banque Carrefour de la Sécurité Sociale fait des efforts pour harmoniser les bases de données.

Les données de base que nous avons utilisées sont les données de l'ONSS à l'échelle des nouvelles communes. Nous avons ensuite désagrégé cette donnée à échelles des anciennes communes et des secteurs statistiques. Pour ce faire, nous avons créé des clés de répartition grâce aux données du recensement de 1991 qui permettaient d'identifier les pôles d'emploi à une échelle fine. Nous avons fait l'hypothèse que la répartition intracommunale de l'emploi est restée relativement stable entre 1991 et 2001. Nous sommes conscients que cette hypothèse s'écarte quelque peu de la réalité dans un certain nombre de localités (fermeture ou délocalisation de grandes entreprises, développement de parcs d'activité).

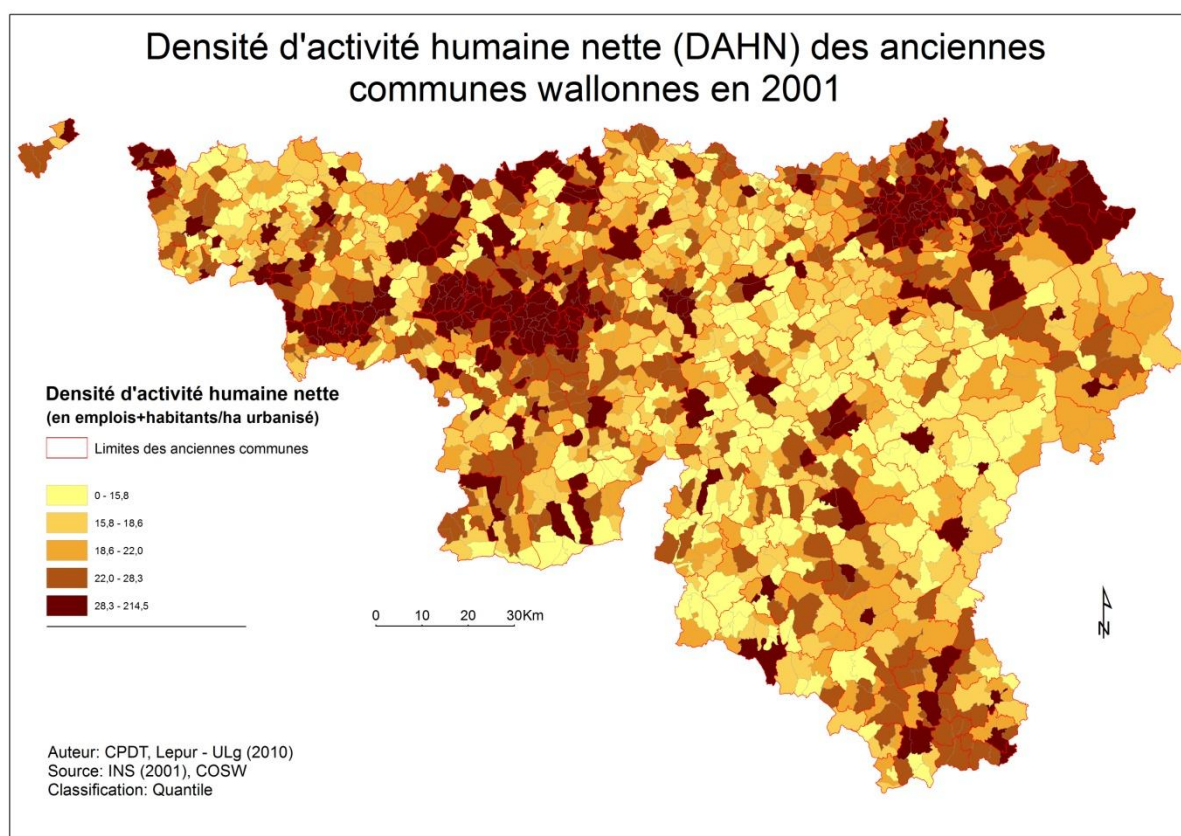
b) *La densité humaine ou densité d'activité humaine nette (DAHN)*

Les calculs de densité de contenu qui ne s'intéressent qu'à la densité de population ou à l'emploi mènent parfois à des impasses. La combinaison des habitants et des emplois dans les calculs de densité apparaît essentielle, notamment quand il s'agit de caractériser des tissus urbains. Celle-ci permet de passer d'une lecture en volume bâti à une densité représentative d'une intensité d'utilisation de l'espace. Fouchier V. (1997) et Camagni (2001) proposent ainsi de travailler avec une densité d'activité humaine DAH :

(nombre d'habitants + nombre d'emplois) rapporté à une surface de référence (km² ou ha).

Les deux auteurs mettent en évidence les effets positifs que la DAH peut avoir en termes de mobilité. Fouchier trouve une diminution marquée des distances parcourues à partir d'un seuil de 200 P+E/ha. Pour cet indicateur, nous avons également fait le choix d'utiliser la superficie urbanisée comme surface de référence. La variable qui sera testée dans nos analyses ultérieures est donc la densité d'activité humaine nette (DAHN).

Figure 58. Densité d'activité humaine nette



5.3.3 La mixité

La CPDT s'est déjà longuement penchée sur la variable de mixité. Les résultats de l'étude bibliographique et empirique qui nous intéressent directement se résument comme suit³⁸ :

— « *la mixité mesurée par les indices emplois / population et la densité d'emplois paraît a priori favoriser les transports en commun, et plus clairement le train. Sa corrélation avec les modes lents est moins claire (...)* ;

³⁸ A.C. Klinkenberg, CPDT, Lepur, ULg. dans (2003). Rapport final de la subvention, Première partie. *Contribution du développement territorial à la réduction de l'effet de serre*. P.73-100

— *La densité paraît influencer les parts modales au moins autant que les indices de mixité. Elle semble plus clairement favoriser les transports en commun, mais aussi les modes lents. (...)*

— *La variance des parts modales est très élevée dans les trois cas, et spécialement élevée pour les classes de faible mixité ou densité. Cela provient de la coexistence de plusieurs facteurs explicatifs des parts modales, parmi lesquels la densité, la taille des villes, la distance au centre... »*

Une revue de la littérature scientifique fait ressortir que l'augmentation de la mixité réduit la consommation d'énergie (Banister et al, 1996 ; Naess et al, 1995), les distances parcourues (Fouchier, 1997 ; Gwiasda, 1999 ; Cervero et Cockelman, 1997 ; Røe, 1999 ; Hanson, 1982), et favorise l'utilisation des modes non motorisés et les transports publics (Handy, 1993 ; Frank et Pivo, 1994 ; Snellen, 2002). La mixité, ou diversité des usages du sol est dès lors souvent mise en avant comme un facteur de mobilité durable au même titre que la densité. L'idée est que plus les usages du sol sont variés dans une zone géographique donnée, plus la probabilité qu'une destination soit proche de l'origine est élevée. Nous avons fait le choix de deux indicateurs de mixité dans cette recherche.

5.3.3.1 Équilibre emplois-résidents

La plus simple mesure de la mixité est représentée par l'équilibre entre emplois et résidents. Elle se résume par le ratio emplois/résidents à l'intérieur d'un périmètre donné (Camagni et alii, 2002, p.126). Un partage équilibré entre ces deux fonctions indique qu'il existe une proximité réelle entre le domicile et le lieu d'emploi. Cette variable territoriale est intéressante, mais elle ne peut pourtant pas expliquer en tant que telle les comportements de mobilité de la population. Les dynamiques de déplacement vont bien au-delà des limites administratives existantes. Comme pour bien d'autres variables, le biais introduit par le découpage spatial est conséquent. Celui-ci est d'autant plus important que la zone considérée est petite, car le rapport entre emplois et résidents à l'intérieur d'une zone donnée revient finalement à essayer d'expliquer des déplacements internes à la zone.

Peng (1997) souligne que la régionalisation du lien domicile-travail impose d'intégrer une nouvelle échelle à cet indicateur de mixité. Il propose d'opter pour une échelle méso et de mesurer l'équilibre emplois-résidences dans un cercle ayant comme centre la résidence et comme rayon la distance médiane de déplacement.

5.3.3.2 La diversité sectorielle (mixité fonctionnelle)

À elle seule, la mesure du rapport entre nombre global d'emplois et nombre de résidents ne représente pas une mesure de diversité complète. La variable emplois est hétérogène et les différents types qui la composent n'ont pas tous la même influence sur les comportements de mobilité.

Une des solutions à ce problème passerait par la différenciation entre l'emploi local et l'emploi à portée plus large (Pouyanne, 2004). Cependant, pour être intégrée dans notre analyse, la différenciation des différents pôles d'emploi à une échelle assez fine se heurte à un problème méthodologique et au manque de données. Premièrement, il serait en effet bien difficile de faire l'arbitrage entre les différents types d'emploi à partir de la nomenclature NACEBEL, qui n'a pas été créée à cet effet. Deuxièmement, quand bien même nous arriverions à distinguer les emplois à portée locale de ceux à portée régionale, il n'existe pas encore de source de données d'emploi au lieu de travail à l'échelle des secteurs statistiques.

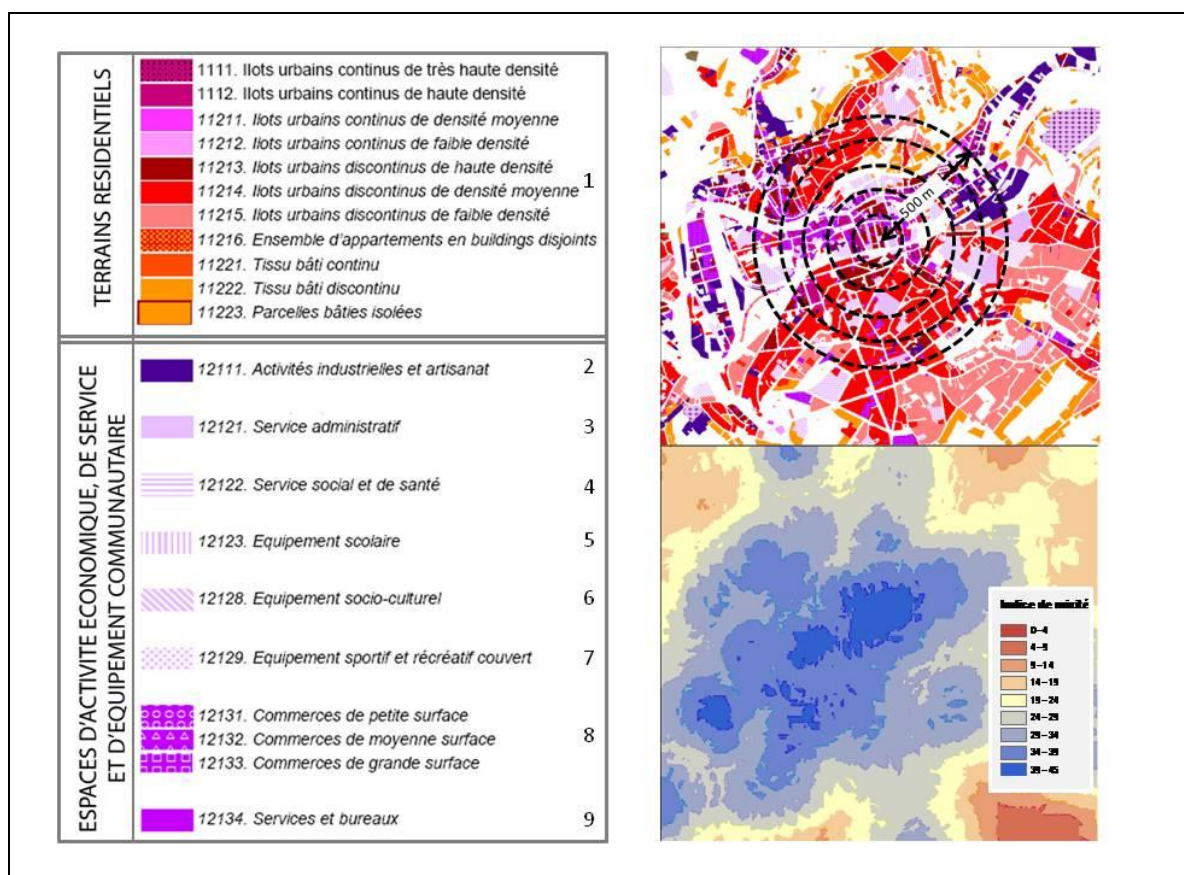
À terme, le croisement entre les données de la Banque Carrefour des entreprises et les données décentralisées de l'ONSS pourra néanmoins constituer une base exploitable pour définir les différents pôles d'emplois à une échelle fine.

Nous nous sommes donc orientés vers une mesure désagrégée de la variété des activités présentes dans une zone donnée. Nous avons construit un indicateur de diversité sectorielle sur base du calcul de la « richesse relative » (*relative richness*) et des affectations inscrites au COSW de 2001. La formule de la « richesse relative » est définie par la formule suivante (Richard T. Forman, 1995) :

Où « s » est égal au nombre de types d'habitat et « s_{\max} » est égal au nombre maximum de types d'habitat.

L'indicateur de mixité que nous avons calculé est en réalité un peu plus complexe que cela, sa valeur est pondérée par la distance qui sépare les différentes fonctions. La mesure de la mixité s'est faite de manière désagrégée, sur des pixels de 10 x 10 mètres, sur l'ensemble du territoire wallon. Les affectations au COSW retenues sont au nombre de 9. Au lieu de faire une mesure qui ne tient compte que de la présence ou de l'absence d'une activité dans un rayon de 500 mètres, nous avons attribué un poids relatif variant de 1 à 5 suivant la proximité d'une occupation du sol au pixel considéré. Ainsi, la plus courte distance euclidienne entre le pixel considéré et une affectation déterminera le nombre de points de mixité supplémentaire que cette zone obtient.

Figure 59. Méthodologie suivie pour la construction de l'indice de mixité fonctionnelle

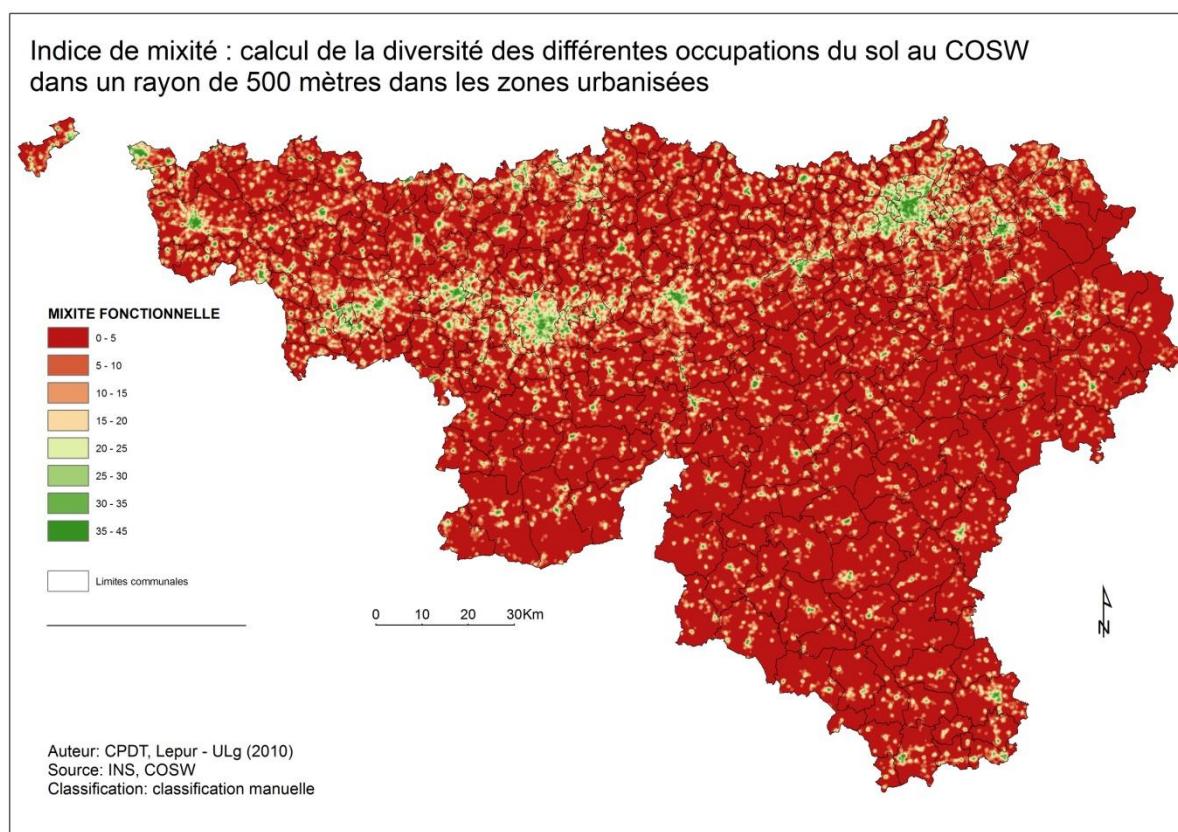


L'indicateur de mixité créé varie de 0 à 45. Lorsqu'un pixel vaut 45, cela veut dire que les 9 affectations retenues ci-dessus sont présentes dans un rayon de 100 mètres autour de celui-ci.

Type d'occupation du sol	à 100 m	à 200 m	à 300 m	à 400 m	à 500 m
Terrains résidentiels	5 points	4 points	3 points	2 points	1 point
Activités industrielles et artisanat	5 points	4 points	3 points	2 points	1 point
Service administratif	5 points	4 points	3 points	2 points	1 point
Service social et de santé	5 points	4 points	3 points	2 points	1 point
Équipement scolaire	5 points	4 points	3 points	2 points	1 point
Équipement socioculturel	5 points	4 points	3 points	2 points	1 point
Équipement sportif et récréatif couvert	5 points	4 points	3 points	2 points	1 point
Commerce	5 points	4 points	3 points	2 points	1 point
Services et bureaux	5 points	4 points	3 points	2 points	1 point

Le raster des résultats est présenté ci-dessous (figure 60). L'indicateur de mixité met clairement en évidence les grandes villes et les vastes zones fortement urbanisées du sillon Sambre et Meuse. Cependant, ce n'est pas nécessairement dans les grandes villes qu'on retrouve une mixité des fonctions maximale ; la carte montre que les centres des petites villes relativement compactes (Spa, Marche-en-Famenne, Wavre, Louvain-la-Neuve...) affichent des scores très élevés. On peut même faire remarquer que certains petits villages du monde rural sont assez mixtes (La Roche-en-Ardenne).

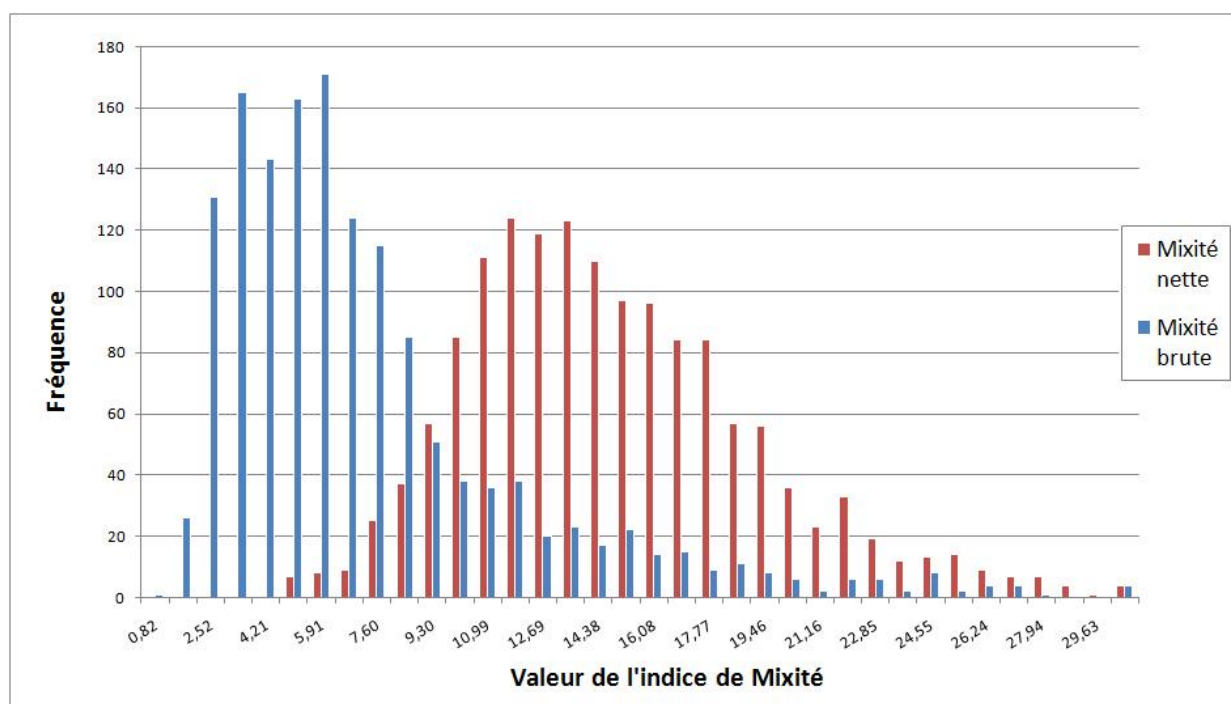
Figure 60. Mixité fonctionnelle



Afin d'effectuer nos calculs ultérieurs de corrélation et de régression, nous devons également rapporter les valeurs de mixité calculées par pixel de 10 x 10 mètres aux entités administratives des secteurs statistiques, des anciennes communes et des communes. À l'image de la densité, la distinction entre mixité brute et mixité nette est importante. Dans le premier cas, il s'agit de calculer la moyenne des valeurs des pixels sur la superficie totale d'une zone administrative. Dans le cas de la mixité nette, la moyenne est faite sur la superficie urbanisée calculée sur base du COSW.

Le graphique ci-dessous montre, une fois encore, à quel point les deux mesures sont différentes. Tout comme dans le cas de la densité, on s'aperçoit que l'histogramme des fréquences de la mixité fonctionnelle nette prend une allure de gaussienne (distribution normale), et que la distribution de la mixité fonctionnelle brute est dissymétrique à droite. Sans rentrer dans les détails, ceci prouve encore une fois que la prise en compte de la superficie totale d'une zone administrative altère les résultats et ne constitue pas une métrique de l'espace urbanisé souhaitable dans cette recherche.

Figure 61. Comparaison entre mixité brute et mixité nette, calculées à l'échelle des anciennes communes



Données : COSW, INS

5.3.4 Accessibilité aux transports en commun

L'accessibilité aux transports en commun est l'un des axes de priorités des politiques de développement durable partout en Europe et dans le reste du monde. Il est intuitivement admis que l'offre en infrastructures et en services de transports collectifs a un impact important sur les comportements de mobilité. La littérature internationale passe souvent en revue les politiques de transports sans pour autant tester l'efficacité de celles-ci à une échelle locale.

La CPDT a quant à elle déjà travaillé l'effet de l'accessibilité des transports en commun sur les part modales observées. Ce travail avait été réalisé à partir des données du recensement de 1991.

5.3.4.1 Bus

Un indicateur d'accessibilité au service des TEC a été construit sur base des données du nombre de logements permanents affectés à chaque parcelle cadastrale et des données spatialisées sur les arrêts de bus en Région wallonne. Ces dernières regroupent l'ensemble des arrêts de bus géocodés précisément dans le cadre du travail sur les cartes d'accessibilité de la CPDT en 2004. La construction de l'indicateur s'est faite en deux temps. Premièrement, nous avons identifié les logements situés à moins de 300 m d'un arrêt de bus en Région wallonne. Nous considérons que ces logements se trouvent à une distance raisonnablement couverte par les piétons depuis leur domicile.

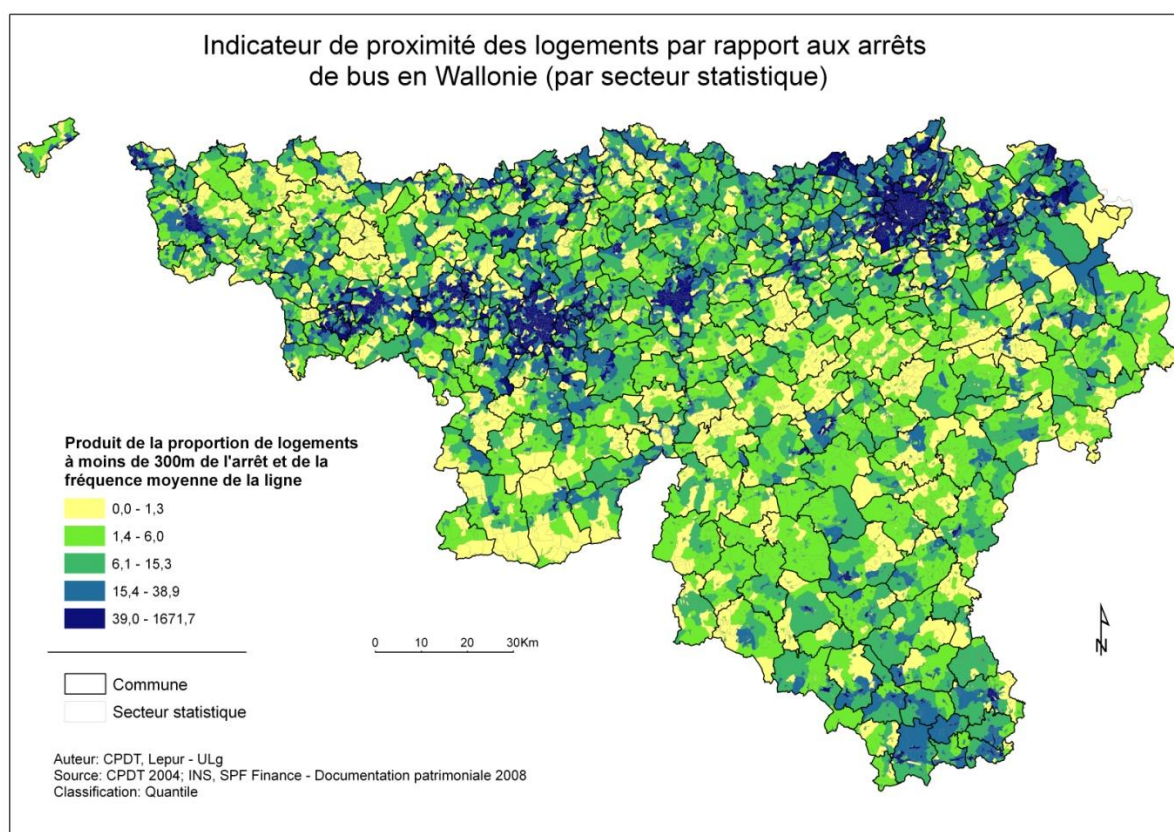
Ensuite, nous avons intégré la fréquence de passage des lignes de bus aux arrêts situés à 300 m des logements, afin que notre indicateur ne se résume pas à une simple mesure de proximité. Pour chaque logement, nous avons retenu la fréquence à l'arrêt situé à moins de 300 m qui présentait la plus grande fréquence de passage.

$$\text{Fréq moy zone } i = \text{fréq à 300 m log1} + \text{fréq à 300 m log2} + \dots$$

Concrètement, la valeur de l'indicateur dans une zone géographique déterminée se calcule par le produit entre la proportion du nombre de logements situés à moins de 300 mètres d'un arrêt de bus et la moyenne des fréquences cumulées des lignes de bus aux arrêts.

$$\text{Accessibilité bus zone } i = \% \text{ logements à 300 m arrêt} \times \text{Fréq moy zone } i$$

Figure 62. Indicateur d'accessibilité au bus



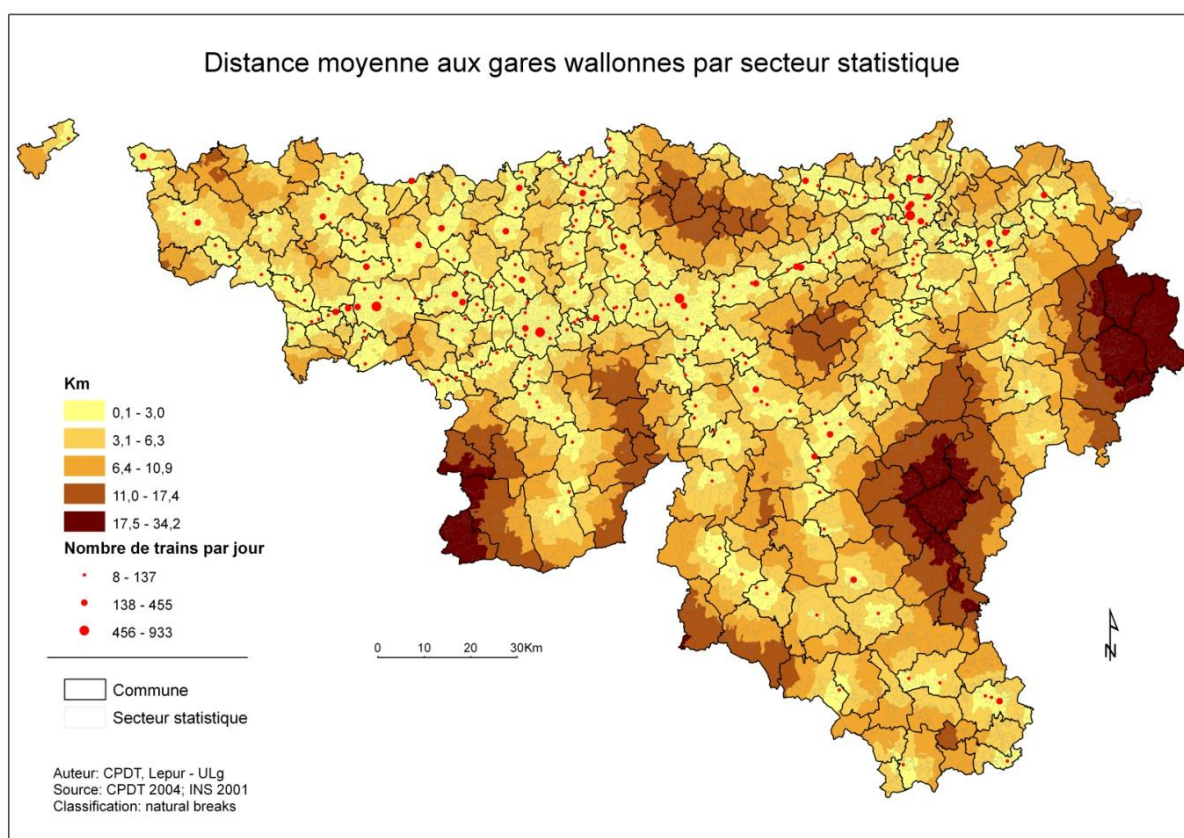
5.3.4.2 Trains

L'indicateur d'accessibilité au train doit également intégrer la distance qui sépare les habitations des gares et la fréquence des trains à celles-ci. Cependant, contrairement aux bus, le train se combine plus souvent avec la voiture pour les déplacements domicile-travail. Ainsi, la distance prise en compte sous forme d'un buffer de 300 mètres autour des arrêts de bus ne peut pas s'appliquer ici.

Dans un premier temps, nous avons réalisé les calculs des distances entre les secteurs statistiques et les gares les plus proches. Ces calculs sont basés sur les données qui reprennent la position X,Y des gares wallonnes et sur le découpage des secteurs statistiques. Pour les secteurs statistiques à plus d'une certaine distance des gares, la distance du centroïde à une gare représente généralement une bonne approximation de la distance moyenne. Par contre, il nous a fallu procéder à un découpage des secteurs situés à moins de 2 km des gares pour pouvoir réduire l'erreur induite par la géométrie de ceux-ci. Le résultat cartographique des distances moyennes aux gares les plus proches se trouve ci-dessous.

Cette carte met bien en évidence l'éloignement de certaines zones de la région wallonne par rapport à l'offre en train. Certains grands espaces isolés de toute offre ferroviaire apparaissent en province du Luxembourg à l'est de Libramont, dans le sud de la province du Hainaut le long de la frontière française, à l'est de la province du Liège... mais cette carte met également en évidence l'éloignement d'une région reprenant l'est de la province du Brabant wallon et l'ouest de la province de Liège (Hesbaye). Il est intéressant de souligner que le cadastre énergétique défini précédemment (voir chapitre 3) a identifié cette région comme une des plus émettrices de CO₂ en ce qui concerne les déplacements domicile-travail.

Figure 63. Distance par rapport aux gares

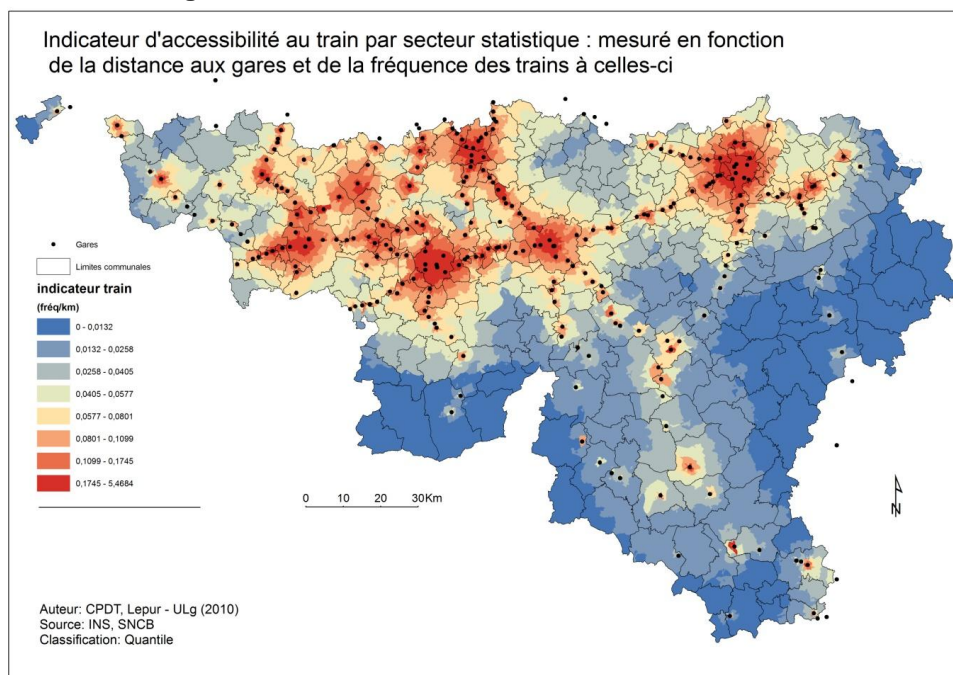


Malgré l'intérêt de cette carte, elle ne représente pas vraiment un indice d'accessibilité au train, car il n'intègre pas la fréquence de passage des trains aux gares considérées. La valeur de l'indicateur d'accessibilité au train qui est intégré dans nos analyses est le résultat de la somme des fréquences des trains aux gares localisées dans un rayon de 25 kilomètres autour de la zone géographique considérée divisée par la distance qui les sépare.

$$ACCESSTRAIN = \text{fréq. (gare1)/distance (gare1)} + \text{fréq. gare2/distance (gare2)} + \dots$$

Nous avons prêté attention à ce que les lignes identiques ne soient pas comptées plusieurs fois dans le calcul de l'indicateur.

Figure 64. Indicateur d'accessibilité au train



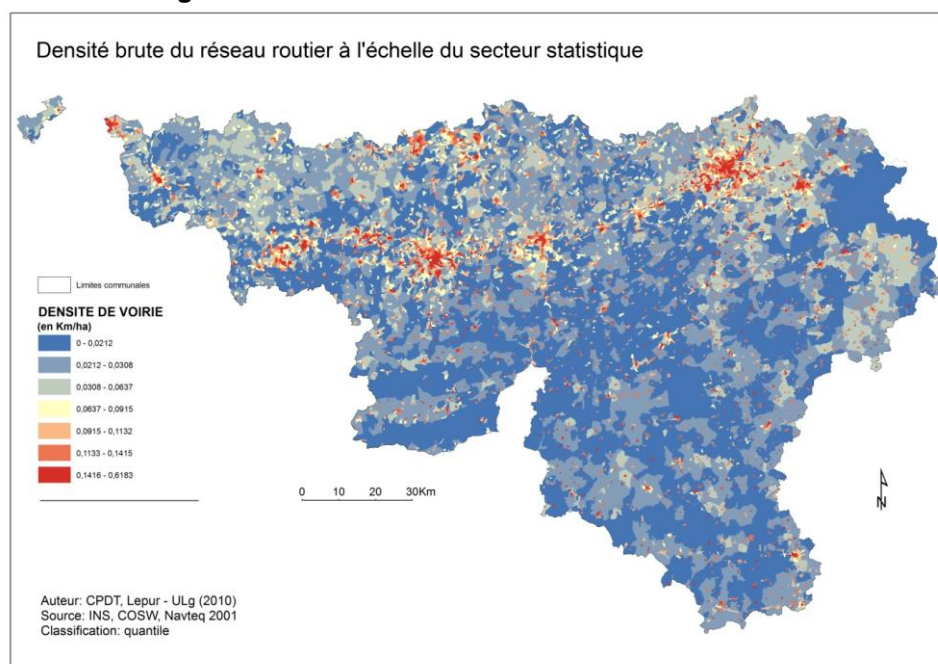
5.3.5 Le réseau routier

5.3.5.1 Densité du réseau routier

Un indicateur de densité du réseau routier a été construit sur base des données de Navteq 2001. La mesure de densité brute est définie par la formule suivante :

$$DENSITE\ BRUTE\ ROUTES = \text{longueur des tronçons} / \text{superficie totale du secteur INS}$$

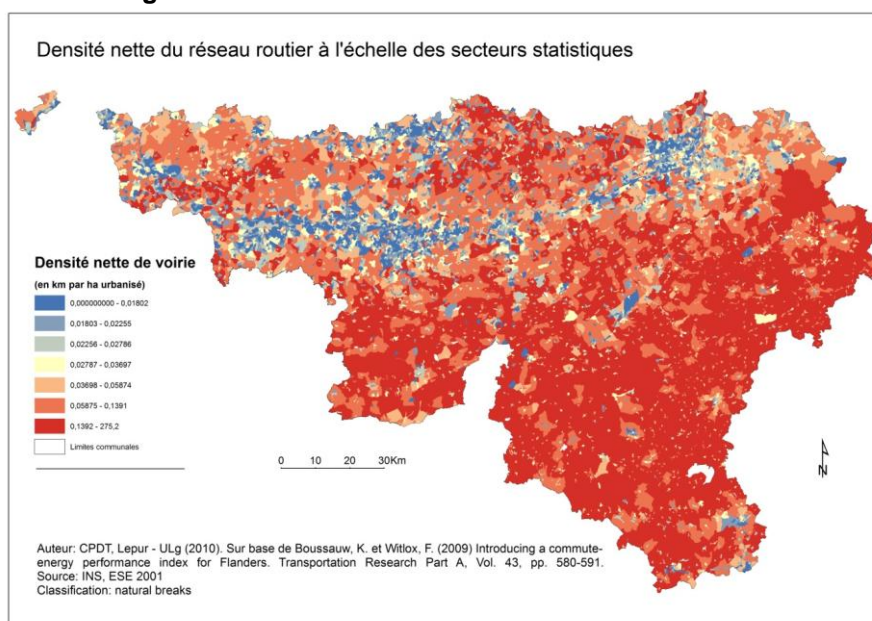
Figure 65. Densité de route brute



Quant à la densité nette du réseau, elle est définie par la formule suivante :

$$DENSITE\ NETTE\ ROUTES = \text{longueur des tronçons} / \text{superficie urbanisée}$$

Figure 66. Densité de route nette

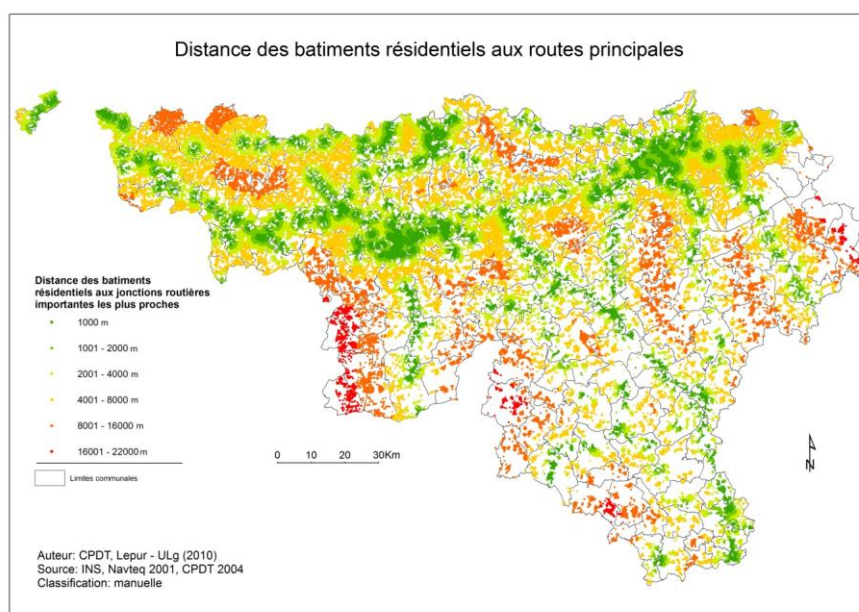


5.3.5.2 Distance aux routes principales

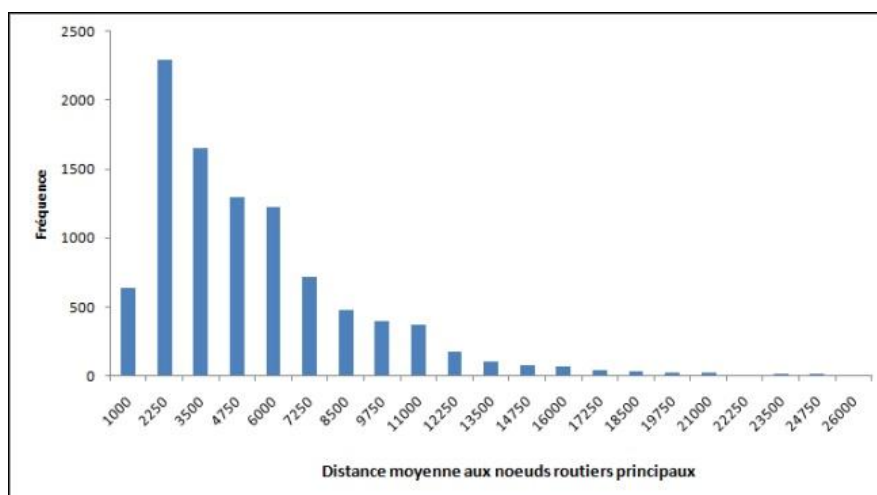
Une autre variable prise en compte est la distance séparant les habitations des nœuds routiers importants. Cette distance, approchée dans cette recherche par la distance euclidienne, permet de mettre en évidence les espaces résidentiels qui sont éloignés de la partie du réseau routier structurant.

Nous avons pris en compte les intersections aux routes à voies rapides, mais également des routes importantes qui relient les pôles d'emplois entre eux et caractérisés par des limites de vitesse relativement élevées. Ces intersections ont été identifiées grâce aux données du MET et aux données Navteq de 2001.

Figure 67. Distance aux routes principales



Les distances calculées sont les distances euclidiennes entre les jonctions routières considérées et les bâtiments résidentiels. En moyenne en région wallonne, nous avons estimé que les bâtiments résidentiels étaient localisés à une distance euclidienne de 3,8 km d'une liaison avec une route importante. Pour obtenir la valeur de cette variable aux différentes échelles d'analyse considérées, il a fallu ensuite calculer la moyenne des distances mesurées sur l'ensemble des bâtiments localisés dans la zone géographique considérée. L'histogramme ci-dessous nous informe de la répartition des valeurs obtenues à l'échelle des anciennes communes.



5.3.6 Les variables socio-économiques

Le fait que l'aménagement du territoire ne soit pas en mesure d'agir directement sur les variables socio-économiques (niveau de formation, revenus, statut professionnel, taille des ménages, etc.) ne justifie en aucun cas que celles-ci ne soient pas intégrées dans notre modèle d'analyse.

Bien au contraire, un bon nombre de publications mettent en évidence les liens existant entre les variables socio-économiques et les comportements de mobilité. En 1982, Hanson attire l'attention sur le fait que l'augmentation de la taille des ménages, des revenus et de la possession d'un véhicule était associée à une augmentation de la fréquence des voyages (Hanson, 1982). Naess met en évidence une relation entre la possession d'une voiture et l'augmentation des distances, de la part modale de la voiture individuelle et de la consommation énergétique des transports (Naess et Sandberg, 1996). Kitamura *et al.* (1997) mettent eux aussi l'accent sur les choix individuels et affirment que la manière de voyager est plus fortement liée aux comportements qu'aux caractéristiques de l'occupation du sol.

Des analyses quantitatives montrent également qu'une bonne partie de la variation des comportements de mobilité peut être expliquée par ces variables. Ainsi, Stead (2001) souligne que les déterminants socioéconomiques des comportements de mobilité sont plus importants que ceux de l'occupation du sol, comptant pour 21 % à 58 % de la variation des distances parcourues à l'échelle du comté anglais.

Contrairement aux variables de structure du territoire, les variables socio-économiques n'ont pas dû être construites grâce à un système d'information géographique. Elles sont directement issues de l'enquête socio-économique de 2001 ou de l'INS. Au vu du grand nombre des variables socio-démographiques prises en compte, nous ne les présenterons pas cartographiquement. Nous les avons cependant détaillées dans l'annexe IX ci dessous.

5.4 CORRELATIONS ET ANALYSES DE REGRESSION

Cette partie a pour objectif de mettre en évidence les relations de causalité entre les variables territoriales et socio-économiques que nous venons de présenter et les comportements de mobilité, à l'origine des émissions de GES. Il s'agit de tester quantitativement dans quelle mesure l'aménagement du territoire peut, par son action sur l'occupation du sol et les infrastructures de transport, contribuer à une réduction des émissions de GES.

Dans un premier temps, nous avons effectué une étude de corrélation bivariée entre les variables territoriales, socio-économiques et les variables comportementales. Cette analyse donne une indication de l'intensité de la liaison qui peut exister entre les variables, considérées deux à deux. C'est une étape clé dans l'analyse des relations de causalité que nous tentons de faire apparaître.

5.4.1 Corrélations bivariées

Le coefficient de corrélation nous donne des informations sur l'existence d'une relation linéaire (sous forme d'une droite) entre deux variables. Lorsque celles-ci sont corrélées, cela veut dire qu'elles évoluent ensemble : lorsque l'une augmente, l'autre augmente ou diminue. C'est une mesure dérivée de l'analyse de la variance qui sert à caractériser la dispersion d'une distribution autour de la moyenne. Un premier pas dans la mesure de corrélation entre deux variables est de vérifier dans quelle proportion elles varient ensemble, c'est ce qu'on appelle « la covariance ». Elle est définie par l'équation suivante:

—

où X et Y sont les variables, et \bar{X} et \bar{Y} leur moyenne. Le gros désavantage de la covariance est qu'elle n'est pas étalonnée. Pour résoudre ce problème, il faut diviser cette covariance par les écarts-types de X et de Y. De cette manière, on obtient un résultat qui varie entre 1 et -1, ces dernières étant les valeurs obtenues lorsque la corrélation est parfaite. C'est cet indicateur qui est appelé le coefficient de corrélation (en réalité appelé coefficient de corrélation de Pearson). Il est défini par l'équation suivante:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}}$$

Passer d'une corrélation constatée à une interprétation de nature causale entre variables de structure territoriale et socio-démographique, d'une part, et les comportements de mobilité, d'autre part, doit être effectué avec précaution (Pouyanne 2005). En effet, une erreur courante est de croire qu'un coefficient de corrélation proche de 1 ou de -1 induit une relation de causalité entre les deux variables étudiées. En réalité, celles-ci peuvent être corrélées à une autre variable source dont elles dépendent toutes deux.

Les analyses de corrélation, et ensuite de régression ont été menées à l'échelle des secteurs statistiques, des anciennes communes et des nouvelles communes. Avant de présenter les résultats, il est important de souligner que ceux-ci n'intègrent pas toujours l'ensemble des zones géographiques en région wallonne. Premièrement, il arrive assez souvent que le nombre de personnes ayant répondu à une question de l'enquête socio-économique de 2001, dans un secteur statistique donné, soit trop faible pour que celui-ci soit pris en compte. Il est impératif de fixer des seuils de répondants en dessous desquels les résultats sont jugés non significatifs. Deuxièmement, certaines variables territoriales sont construites sur base de données désagrégées telles que le nombre de logements par parcelle cadastrale. Les zones n'abritant pas de logement sont donc également occultées de l'analyse.

5.4.1.1 Corrélation entre densité et mobilité

Le nombre de recherches empiriques portant sur l'influence que la densité a sur la mobilité est conséquent. L'argument mettant en avant qu'une ville compacte permet de réduire les consommations d'énergie est soutenu par un bon nombre d'auteurs qui ont renforcé le plaidoyer pour la ville compacte (Newman & Kenworthy, Fouchier, Ewing, Naess, Owens).

De manière générale, il semble communément admis que l'accroissement de la densité fournisse un espace défavorable à l'utilisation de la voiture, et encourage les modes alternatifs. Ceci proviendrait de la diminution des distances entre les différentes fonctions, offrant ainsi la possibilité aux habitants de se déplacer autrement.

Cependant, l'influence de la densité sur la consommation d'énergie pour les déplacements fait l'objet d'une controverse. Ce débat porte, d'une part, sur la faisabilité d'une compaction et, d'autre part, sur la validité des arguments scientifiques avancés. En effet, il existe beaucoup de raisons qui poussent à croire que l'équation "densification = moins d'usage de l'automobile" n'est pas directement valable. Même Fouchier (1997) admet que son indicateur de densité d'activité humaine nette ne suffit pas à décrire la capacité d'une zone à émettre ou attirer des déplacements en voiture.

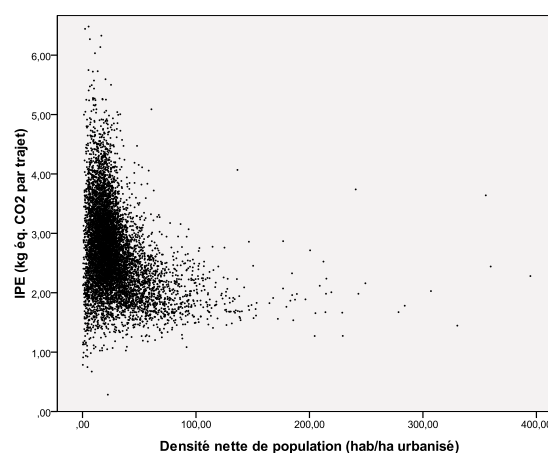
Afin d'avoir un premier aperçu de la relation entre densité et comportements de mobilité, nous avons effectué une analyse de corrélation bivariée entre les différentes mesures de densité et l'indice de performance énergétique des déplacements domicile-travail présenté au chapitre 3.

Avant d'entrer dans l'analyse des résultats, soulignons que le coefficient de corrélation dépend de la taille de l'échantillon d'observations considéré, et dépend donc de l'échelle d'analyse. Plus le nombre de zones géographiques prises en comptes dans l'analyse est grand, plus le coefficient de corrélation sera faible. Prenons pour exemple la corrélation entre la densité de population nette et l'indice de performance énergétique des déplacements domicile-travail (IPE), exprimé en kg eq.CO₂ par trajet. Le tableau et le graphique ci-dessous présentent les résultats obtenus à l'échelle des secteurs statistiques.

Tableau 38. Corrélation entre l'indice de performance énergétique et la densité nette de population dans les secteurs statistiques

		IPE_CO ₂
Densité de population nette	Pearson Correlation	-,321**
	Sig. (2-tailed)	,000
	N	7873

** . Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

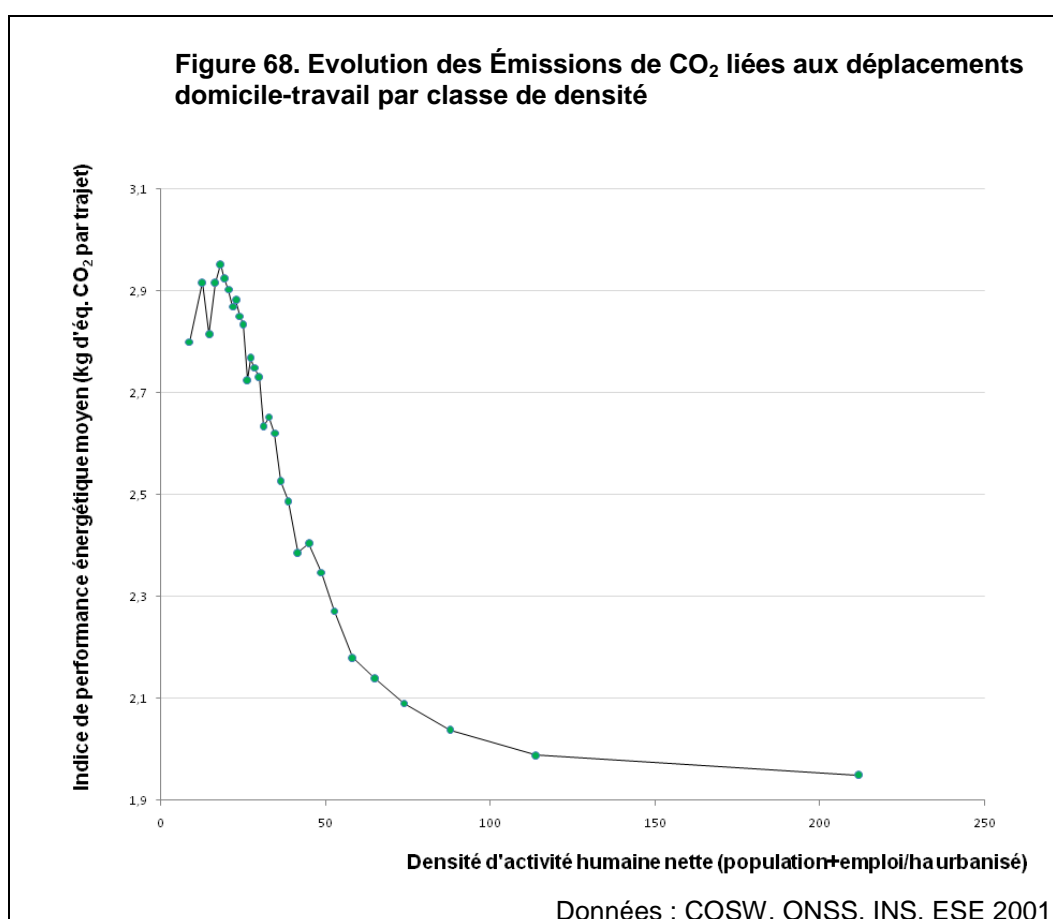


Le coefficient de corrélation entre densité nette de population dans les secteurs statistiques et l'IPE est de -0.321, alors qu'il vaut -0.470 à l'échelle des anciennes communes et -0.558 à l'échelle des communes. La variabilité entre ces deux coefficients provient du fait que l'agrégation des secteurs statistiques gomme une partie de la variabilité des résultats réels. Il arrive également que la relation entre densité et comportements de mobilité soit étudiée par classe de densité. Après avoir réparti les secteurs statistiques en 30 classes de densité de même taille (262 secteurs), le coefficient de corrélation entre l'IPE moyen et la densité de population nette moyenne de la classe s'élève à -0.878.

L'évolution de l'IPE par classe de densité peut être présentée un graphique faisant intervenir l'IPE moyen par classe (axe des Y) et la densité moyenne pour ces classes (axe des X). Prenons pour exemple la densité d'activité humaine nette qui est mise en avant par Fouchier.

Le graphique ci-dessous dénote une relation très nette entre la DAHN et les consommations énergétiques. On peut s'apercevoir que l'IPE moyen passe de 2,9 à 2,1 très vite avec l'augmentation de la densité d'activité humaine nette, mais qu'il ne diminue pas contre plus beaucoup après le seuil de 2,1 kg d'équivalent CO₂ par trajet, soit à partir d'une densité supérieure à 75 habitants et emplois par ha urbanisé. Notons que l'écart des émissions moyennes liées aux déplacements entre une classe caractérisée par un DAHN de 20 (habitants + emplois/ha urbanisé) et une autre où il est de 60 (habitants + emplois/ha urbanisés) n'est "que" de 33 %.

Bien que ce type d'observation soit très utile en raison de sa simplicité d'interprétation, il cache une variabilité intraclasse très marquée. Un des enjeux de cette recherche est de pouvoir expliquer ce qui différencie les zones du territoire wallon caractérisées par des densités similaires, mais qui abritent des comportements de mobilité fort différents. Il ne suffit donc pas de s'en tenir à ce type de graphique ; il faut bel et bien accepter toute la complexité du problème.



Les graphiques suivants (figure 69 et 70) permettent également de mettre en évidence, tout comme le graphique précédent, que les consommations énergétiques liées aux transports diminuent bel et bien avec la densité, mais ils soulignent également la variabilité dans chacune des classes de densité.

Figure 69. Evolution de l'IPE par classe de densité nette

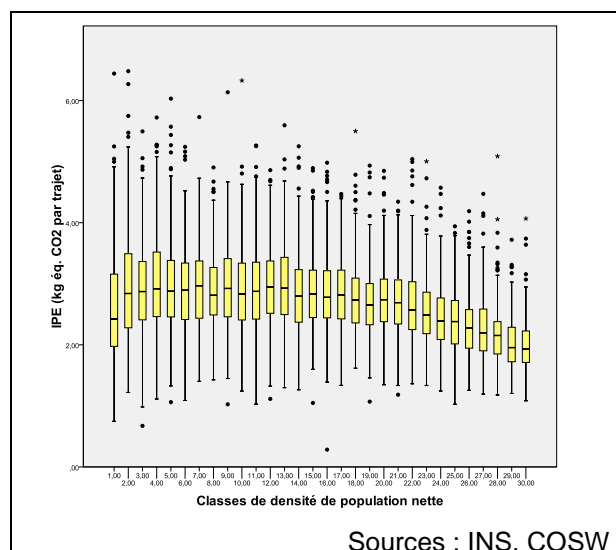
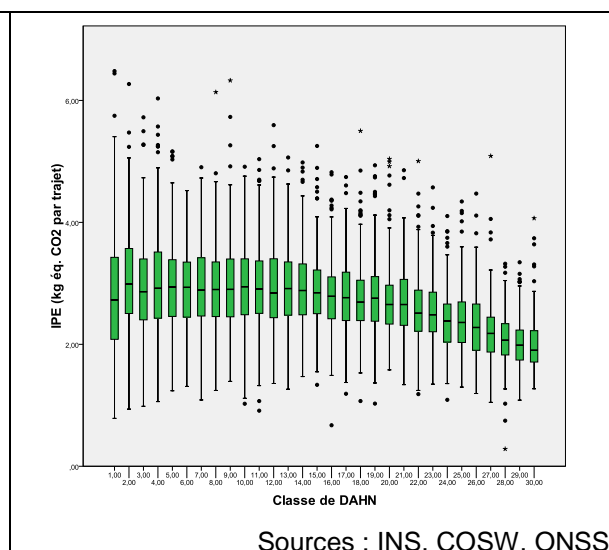


Figure 70. Evolution de l'IPE par classe de densité d'activité humaine nette



La partie précédente (voir point 5.3), consacrée à la description et la construction des variables, a particulièrement insisté sur la différence entre densité brute et densité nette. Pour rappel, il nous semble que la densité nette a le double avantage d'être relativement indépendante des limites administratives et qu'elle est celle sur laquelle l'aménagement du territoire influe. De plus, notons que la densité brute présente des coefficients de corrélation moins élevés que la densité nette. Les analyses qui suivent se concentrent donc sur la comparaison des mesures de densité nette.

Le tableau ci-dessous permet de faire une comparaison entre les coefficients de corrélation de Pearson, calculés pour différentes variables de densité nette et l'IPE.

Tableau 39. Test de corrélation entre les indicateurs de densité nette et l'indice de performance énergétique à l'échelle des anciennes communes

		Densité de population nette	Densité de logement nette	DAHN	Densité d'emploi nette
IPE_CO ₂	Pearson Correlation	-,470**	-,432**	-,483**	-,374**
	Sig. (2-tailed)	,000	,000	,000	,000
	N	1471	1471	1471	1471

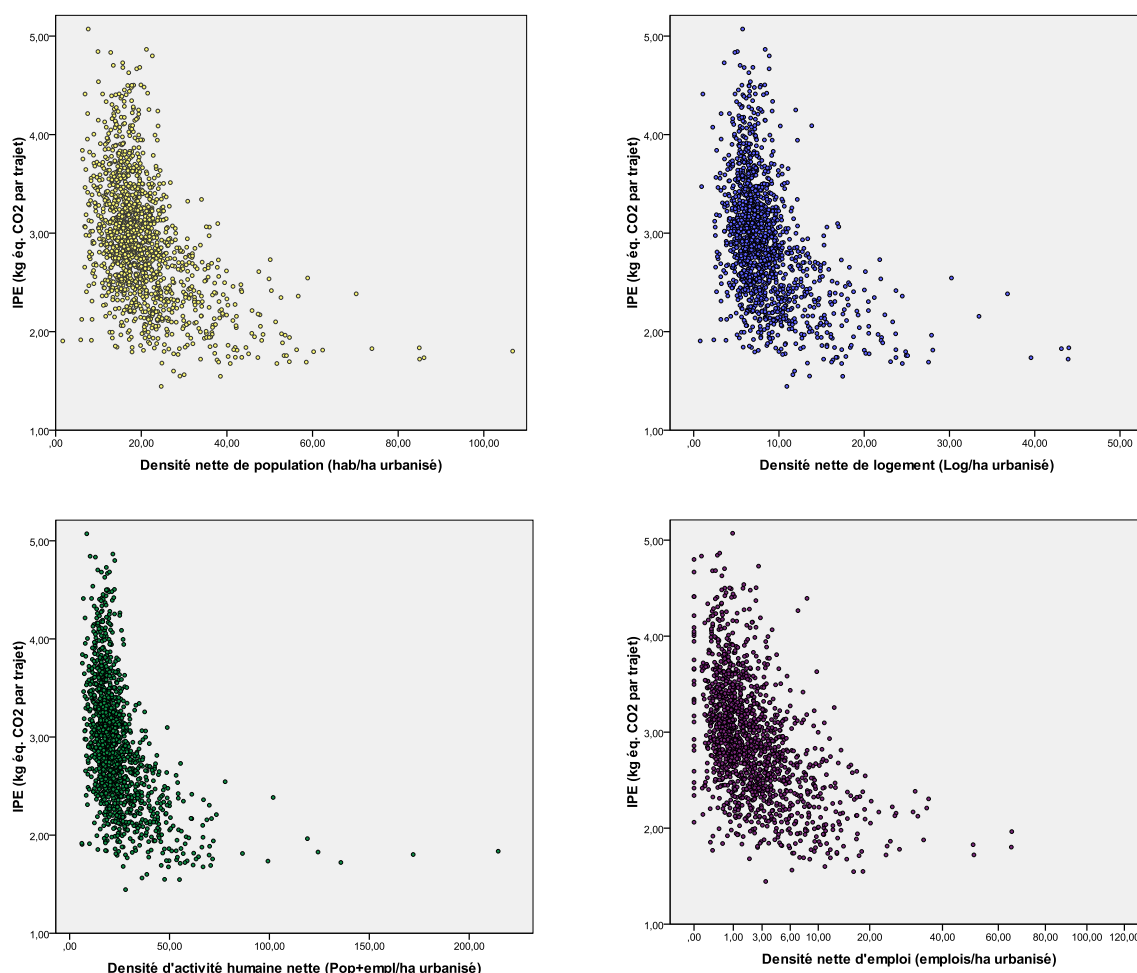
** . Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

Les résultats indiquent dans les quatre cas un coefficient de corrélation négatif. Ceci prouve bel et bien que plus la densité augmente, plus les émissions de CO₂ par trajet diminuent. Ceci se vérifie particulièrement pour la densité d'activité humaine nette au sens de Fouchier. À l'inverse, la densité d'emploi nette affiche le coefficient de corrélation le moins bon.

L'observation des quatre graphiques ci-dessous (voir **figure 71**) permet d'expliquer en partie ces résultats. Chacun des points représente une ancienne commune caractérisée par une valeur de densité (axe des abscisses) et une valeur de l'IPE (axe des ordonnées). Au vu de la formule du coefficient de corrélation, on peut comprendre pourquoi la densité d'activité humaine nette obtient de meilleurs résultats ; la dispersion des points est assez faible comparativement aux autres mesures de densité.

Ces quatre graphiques permettent également de faire remarquer que la dispersion des points s'aplatit au fur et à mesure que l'IPE s'approche de sa limite minimum. En effet, en dessous d'un IPE de plus ou moins 3 kg d'équivalent CO₂ par trajet, la dispersion augmente fortement. Concrètement, la densité et les performances ne sont plus nécessairement linéairement corrélées.

Figure 71. Corrélation entre l'IPE et les quatre mesures de densité nette à l'échelle des anciennes communes



Il est primordial de faire remarquer que l'indice de performance énergétique construit sur base de K. Boussauw et F. Witlox (2001) est un indice composite faisant intervenir parts modales, émissions spécifiques et distances parcourues. Pour rappel, cet indicateur s'exprime sous l'équation suivante :

$$IPE_S = \frac{D_S \cdot \sum \bar{E}_m \cdot C_{m,s}}{N_S}$$

où D_S est le total des distances parcourues, \bar{E}_m est la consommation énergétique moyenne/émission d'équivalent CO₂ moyenne par passager pour le mode de transport i , N_S est le total des travailleurs, et $C_{m,s}$ est un facteur de correction permettant de lier le mode et la distance parcourue. Celui-ci s'exprime par l'équation suivante :

$$C_{m,s} = \frac{S_{m,s} \cdot \bar{D}_m}{\sum S_{m,s} \cdot \bar{D}_m}$$

où ρ est le facteur de correction du mode de transport m pour la zone géographique s , P_m est la part modale, et finalement D est la moyenne des distances parcourues.

Pour comprendre l'évolution de cet indice avec la densité, il est donc impératif de s'intéresser à la corrélation entre les variables territoriales et les déterminants de la mobilité qui sont à l'origine réelle des émissions calculées. Le tableau ci-dessous présente les résultats de l'analyse de corrélation entre la distance moyenne et les différentes parts modales, et les mesures de densité (voir tableau 40).

Tableau 40. Test de corrélation entre les variables de densité nette et les déterminants de la mobilité

	Densité de population nette	Densité de logement nette	Densité d'activité humaine nette	Densité d'emploi nette
IPE (kg éq CO ₂ /trajet)	-,470**	-,432**	-,483**	-,374**
Moyenne des km/trajet	-,419**	-,385**	-,428**	-,328**
Part modale voiture	-,464**	-,478**	-,540**	-,513**
Part modale moto/scooter	,089**	,079**	,073**	,029**
Part modale bus/tram/méto	,608**	,588**	,587**	,399**
Part modale train	,083**	,067**	,094**	,086**
Part modale vélo	,041**	,051**	,094**	,149**
Part modale marche	,283**	,352**	,425**	,527**

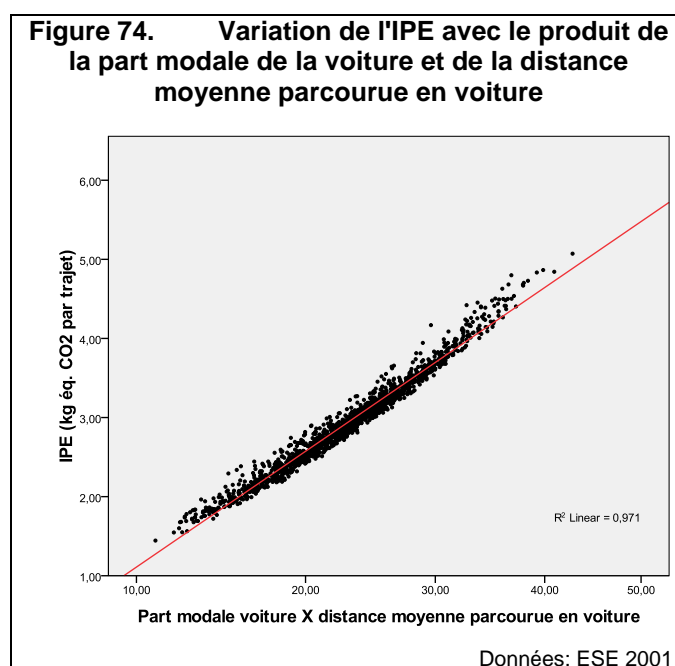
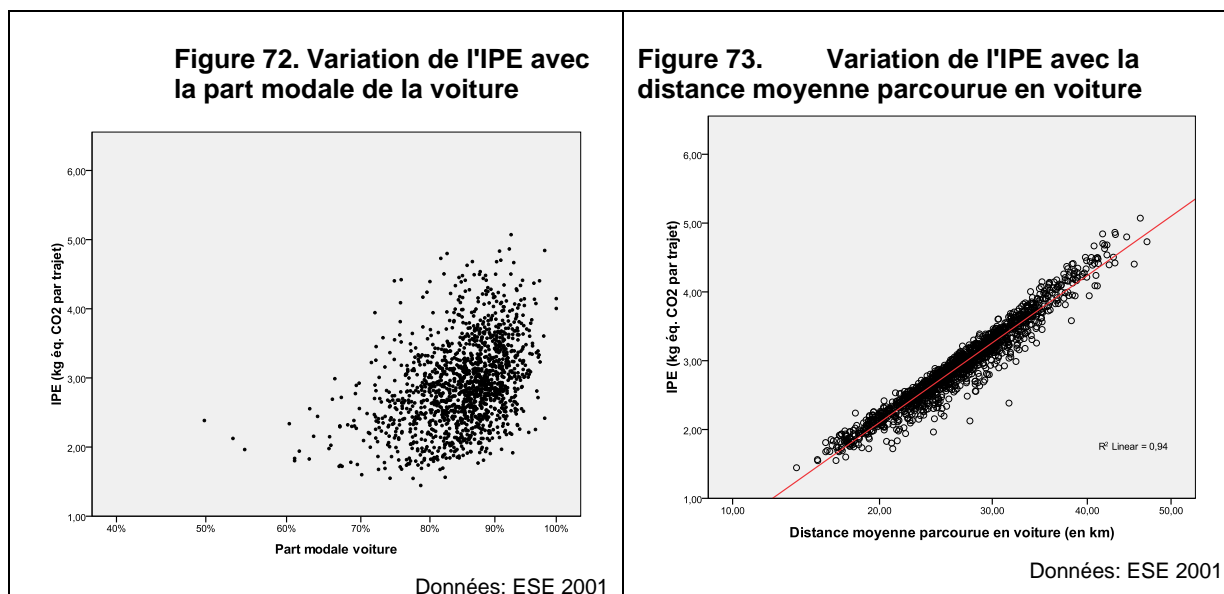
** Pearson corrélation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

* Pearson corrélation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

Taille de l'échantillon N=1471 (anciennes communes)

Les indices de corrélation maximum sont mis en évidence dans le tableau ; à l'exception de ceux calculés pour les parts modales des motos et scooters, du train et du vélo qui semblent très peu corrélées aux différentes mesures de densité. Notons que les valeurs maximales de l'indice de corrélation de Pearson sont observables entre la part modale du bus, tram et métro. On peut également se rendre compte que la densité d'activité humaine nette ne présente pas un meilleur coefficient de corrélation pour l'ensemble des variables de comportement de mobilité. Celle-ci affiche des résultats au dessus de la moyenne ($r=-0,428$ et $r=-0,540$) pour les moyennes des kilomètres parcourus par trajet et la part modale de la voiture. Notons que la densité d'emploi (emplois/ha urbanisé) affiche une corrélation élevée, bien au dessus de la moyenne, avec la marche à pied.

Mais attention, toutes les variables de comportement de mobilité (distances moyennes et parts modales) n'ont pas le même poids dans l'équation des consommations énergétiques. D'une part, la voiture occupe une part prédominante comme mode de déplacement principal en Wallonie. D'autre part, la distance moyenne parcourue et les consommations spécifiques liées à ce mode de transport sont assez élevées. Ceci explique pourquoi la valeur de l'IPE peut être expliquée à 94 % par la distance moyenne effectuée en voiture et à plus de 97 % par le produit de cette distance et de la part modale de la voiture.



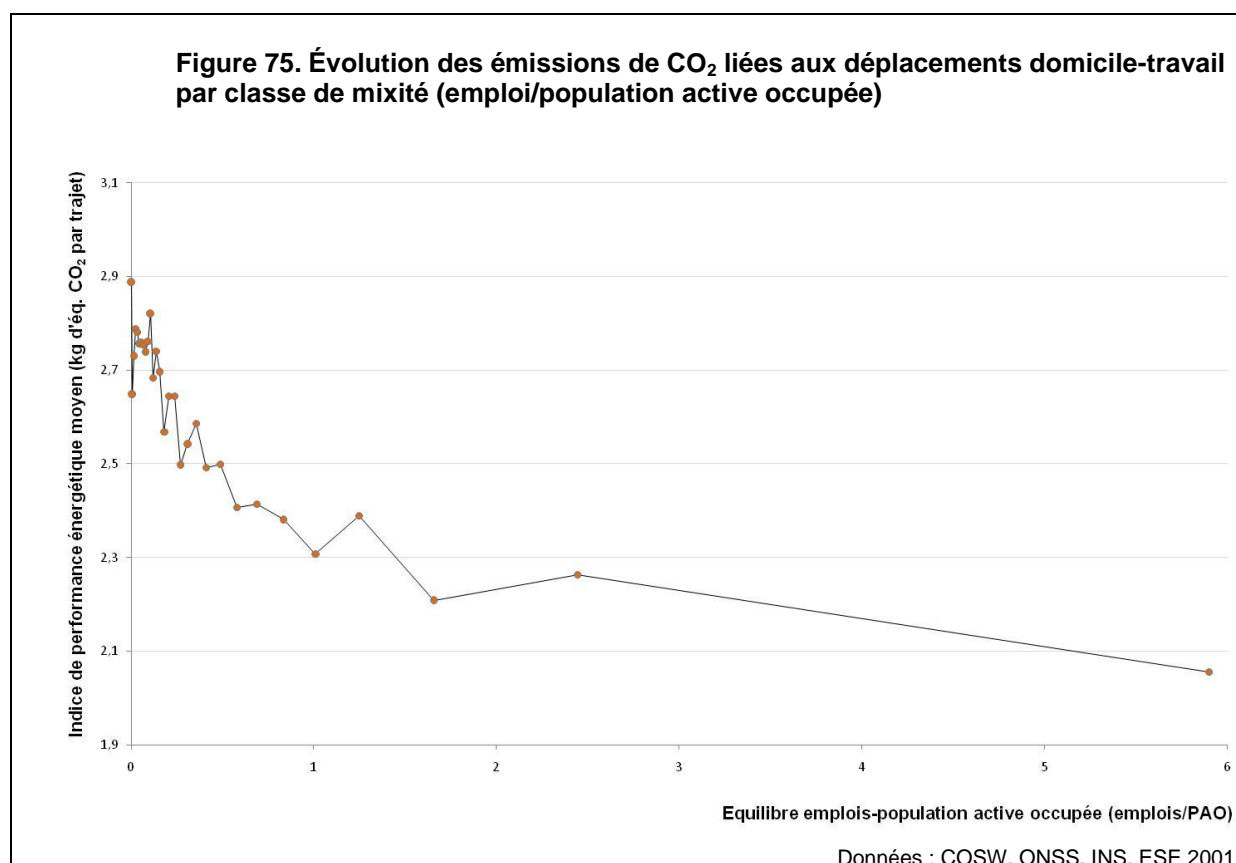
Cette remarque permet de mettre l'accent sur ce qui est réellement déterminant dans la lutte contre les émissions de gaz à effet de serre, à noter, la diminution des distances parcourues en voiture. En ce qui concerne les mesures de densité, il apparait clairement que la densité d'activité humaine nette obtient le meilleur coefficient de corrélation ($r=-0,428$). De plus, celui-ci est également en tête dans les corrélations avec la part modale de la voiture.

5.4.1.2 Corrélation entre mixité et mobilité

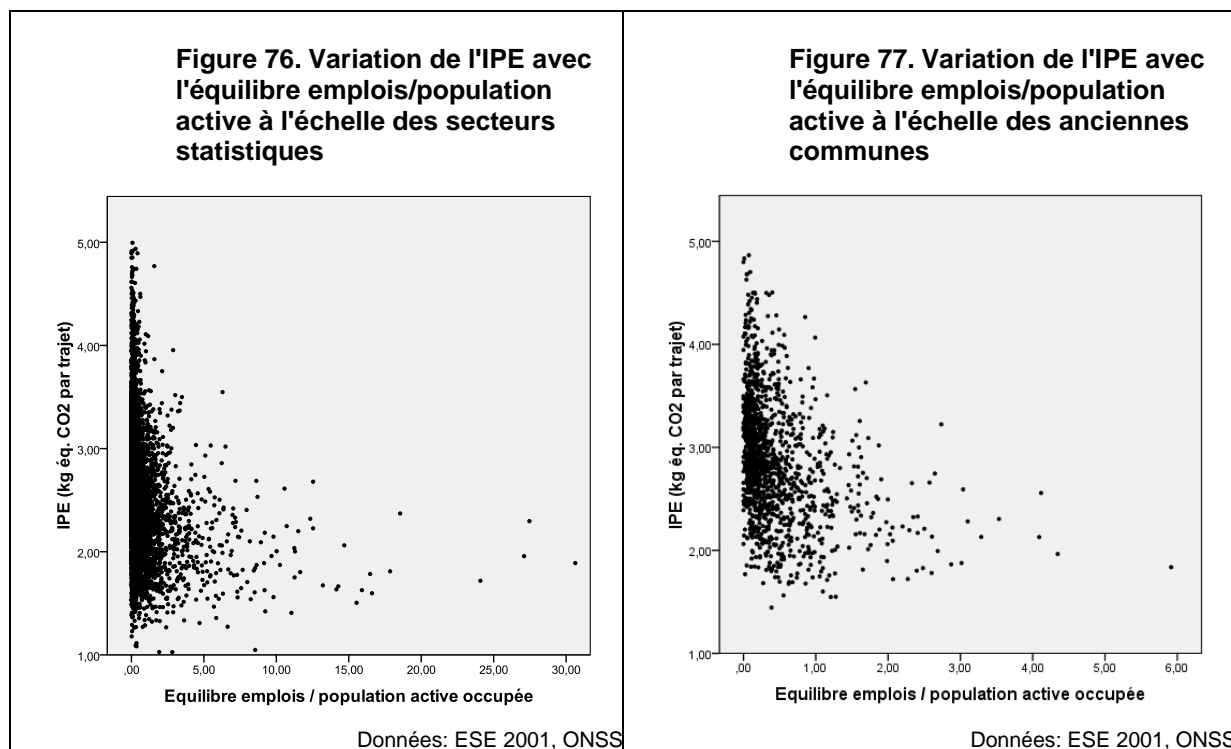
Dans la partie précédente, nous avons introduit deux mesures de mixité : l'équilibre entre emplois et population (*jobs-residents balance*) et la mixité fonctionnelle calculée sur base du COSW. Nous allons maintenant vérifier dans quelle mesure ces deux variables territoriales covarient avec l'IPE et les déterminants de la mobilité.

La balance emploi / population active ne garantit pas que les personnes vivent et travaillent localement. Cependant, une balance élevée implique que la population vivant dans une zone géographique donnée bénéficie d'une bonne accessibilité privilégiée à l'emploi. Ainsi, il est attendu que la distance moyenne parcourue soit relativement faible et que les parts modales des transports en commun, de la marche à pied et du vélo soient élevées.

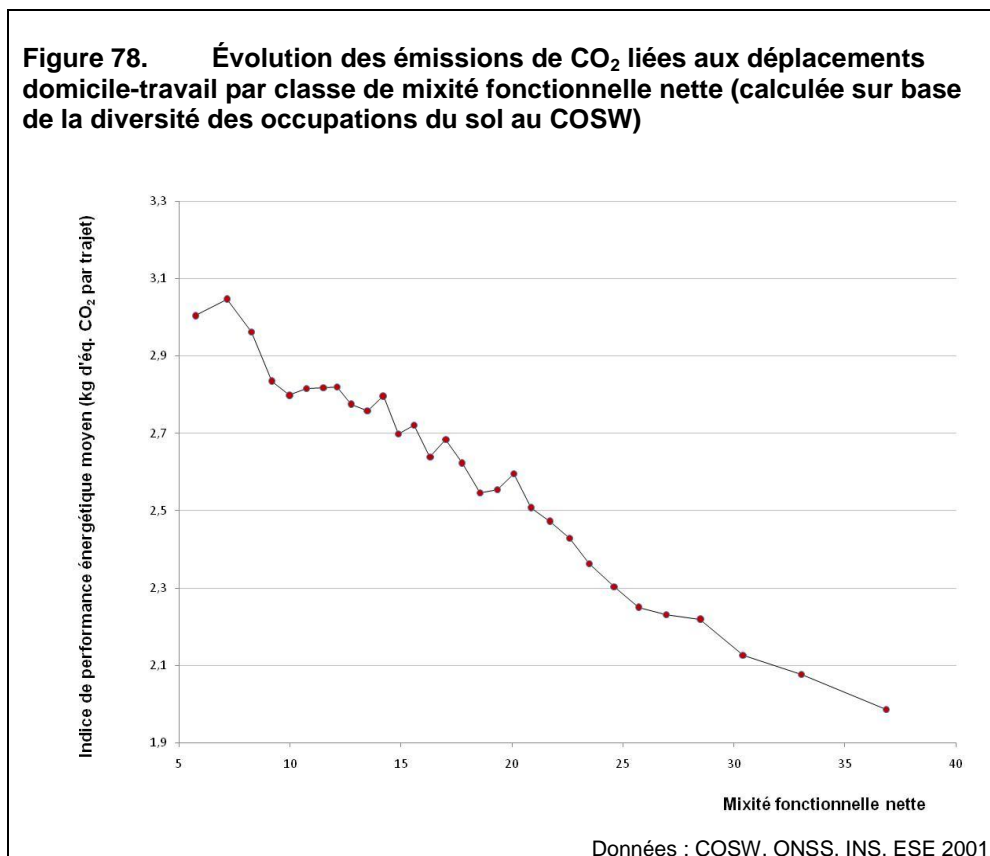
Le graphique ci-dessous fait apparaître l'évolution des consommations énergétiques liées aux déplacements domicile-travail et de l'équilibre emploi/population active. Les secteurs statistiques ont été regroupés en 30 classes de même taille (classification par quantile). De manière générale, il apparaît que l'IPE diminue lorsque cette mesure de mixité augmente. L'IPE moyen passe de 2,8 kg d'équivalent CO₂ par trajet dans les secteurs statistiques fortement dominés par la fonction résidentielle, à 2,1 kg (— 25 %) là où les emplois sont 6 fois plus nombreux que les résidents. À noter que les secteurs statistiques avec moins de 50 répondants à l'ESE de 2001 n'ont pas été pris en compte dans l'analyse. Cette sélection est nécessaire pour éviter de mener l'analyse sur des parcs d'activités économiques qui sont complètement isolés de l'habitat. Ainsi, nous sommes certains que les classes présentant un rapport emplois / population élevé sont des quartiers centraux.



L'analyse par classe montre encore une fois une variance très grande, ayant pour preuve les deux graphiques suivants. Encore plus que pour la densité, les faibles valeurs pour le rapport emplois / population active occupée sont caractérisées par des valeurs qui fluctuent énormément autour de la moyenne. Ces secteurs statistiques, ou anciennes communes, sont des zones d'habitat monofonctionnelles où l'emploi est absent. Cependant, il ressort tout de même qu'un bon nombre de ces secteurs montrent de bonnes performances énergétiques.



Passons maintenant à l'indicateur de mixité fonctionnelle construit sur base de la formule de diversité de richesse appliquée au COSW. L'étude par classe (voir graphique 78) indique également l'existence d'une corrélation négative entre l'IPE et cette mesure de mixité.



Nous remarquerons qu'il n'y a pas d'aplatissement de la courbe en dessous de 2 kg d'équivalent CO₂ par trajet. Ceci veut dire que la dernière classe de mixité reprend des secteurs statistiques qui sont tous bien performants. Une autre chose qui diffère avec le graphique réalisé pour le rapport emplois / population active occupée provient du fait que l'écart entre les IPE moyens maximum et minimum est sensiblement plus grand. Cette différence indique que la répartition des secteurs statistiques présents à l'intérieur des classes explique une plus grande diminution des émissions de gaz à effet de serre.

Tableau 41. Corrélation entre l'IPE et la mixité fonctionnelle dans les anciennes communes

		Mixité
IPE_CO ₂	Pearson Correlation	-,504**
	Sig. (2-tailed)	,000
	N	1471

** . Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

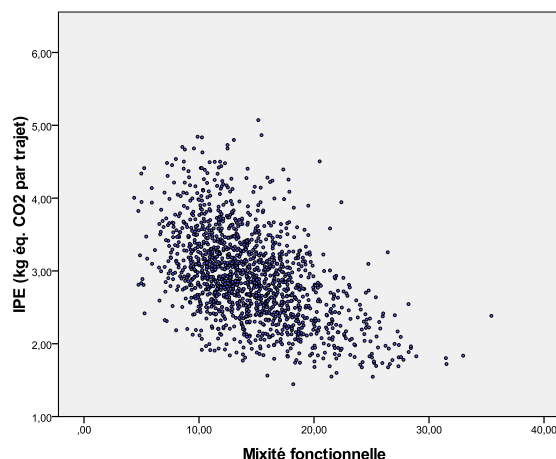


Tableau 42. Test de corrélation entre les variables de densité nette et les déterminants de la mobilité

	Équilibre emplois/population active occupée	Mixité fonctionnelle nette
IPE (kg éq CO ₂ /trajet)	-,345**	-,504**
Moyenne des km/trajet	-,307**	-,445**
Part modale voiture	-,482**	-,576**
Part modale moto/scooter	,037	,134**
Part modale bus/tram/métro	,222**	,520**
Part modale train	,039	,081**
Part modale vélo	,215**	,215**
Part modale marche	,648**	,502**

** . Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).
Taille de l'échantillon N=1471 (anciennes communes)

Le tableau indique que la mixité fonctionnelle mesurant la diversité des occupations du sol du COSW obtient des meilleurs coefficients de corrélation que la balance emplois / population active, à l'exception des parts modales de la marche à pied. D'ailleurs, elle est mieux corrélée avec l'IPE que la densité d'activité humaine nette. Les résultats que nous obtenons suite à cette première analyse réfutent en quelque sorte les propos de certains auteurs qui mettent la densité au-dessus de la question de mixité. Par exemple, Owens écrit "*Mixing of uses is not as important as density influencing travel demand*" (Owens, 1986).

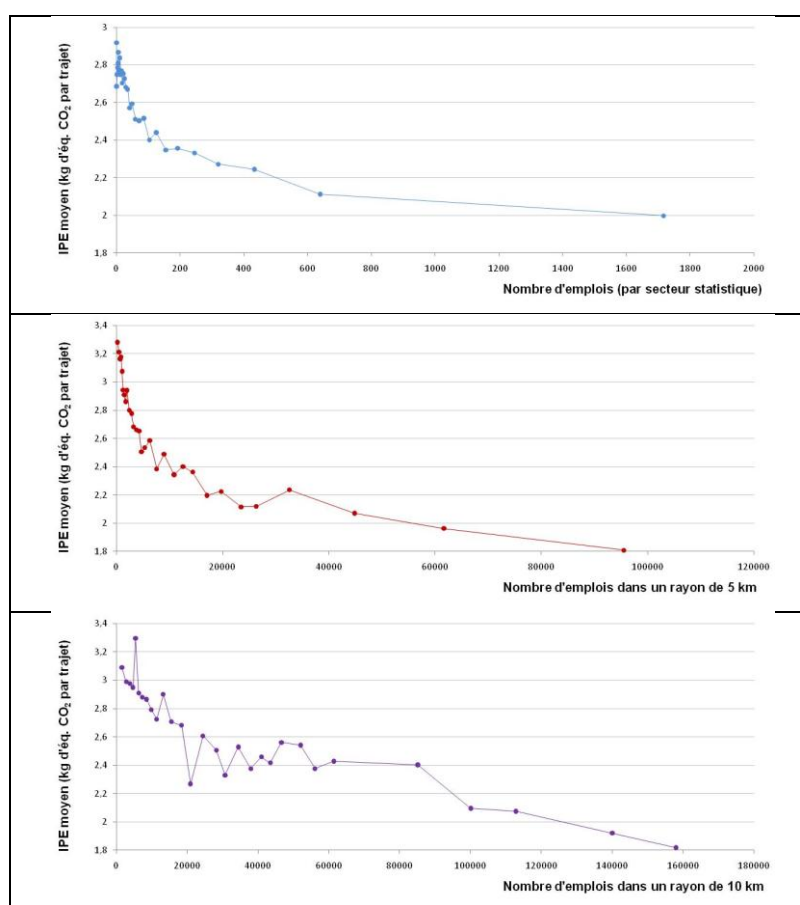
5.4.1.3 Corrélation entre l'offre d'emploi et mobilité

Les mesures de densité d'emplois et d'équilibre emplois / population active occupée informent déjà d'une certaine accessibilité à l'emploi. Cependant, il s'agit de mesures qui présentent un problème d'échelle. Les distances parcourues ne peuvent pas être efficacement expliquées par une description de l'offre d'emploi qui dépend de limites abstraites (limites des secteurs statistiques, des anciennes communes, ou des communes). Les trente dernières années ont été marquées par une augmentation sensible de la distance domicile-travail (Toint, 2002, p.48). Les distances moyennes des déplacements sont passées de 16 km à 23 km entre 1981 et 1999 (+43 %). La comparaison du recensement de 1991 et de l'ESE de 2001 nous a également permis de vérifier cette évolution.

De plus, le marché de l'emploi s'est spécialisé et complexifié. Les ménages sont plus souvent composés de deux travailleurs, rendant le problème de localisation résidentielle plus difficile. Et pour finir, soulignons que l'accès à l'automobile et que la performance croissante des moyens de transport ont permis à la population d'habiter dans une région plus éloignée de leur lieu de travail.

Il est dès lors préférable d'opter pour une approche qui se détache des limites abstraites (secteurs statistiques, anciennes communes, nouvelles communes) que les travailleurs franchissent chaque jour pour se rendre à leur lieu de travail. Nous allons dès lors, comme Z.R. Peng (1997) le suggère, considérer l'emploi à une échelle méso. Le test de corrélation s'effectue donc entre notre variable d'offre d'emploi pour différentes tailles de rayon (1, 2, 3, 4 et 5 km) autour des zones géographiques étudiées.

Figure 79. Évolution des émissions de CO₂ liées aux déplacements domicile-travail par classe de l'offre d'emploi (calculée)

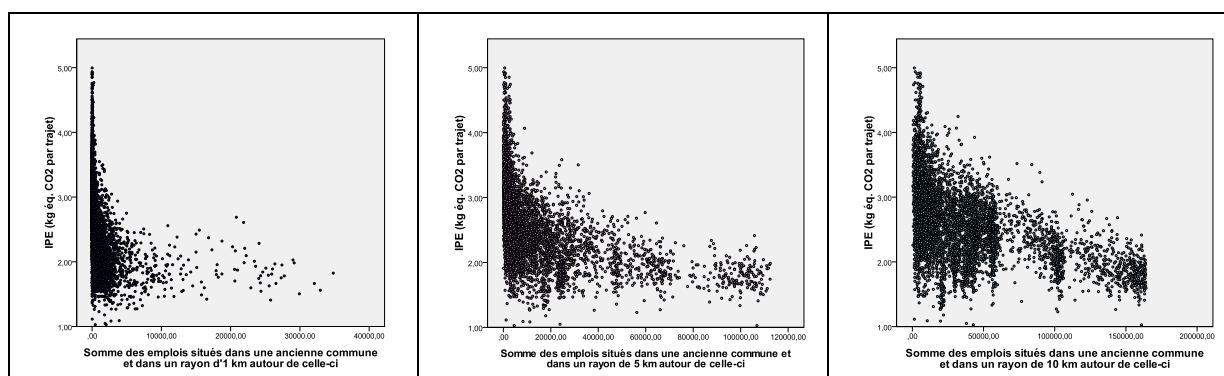


Données: ONSS 2002, ESE 2001

L'analyse par classe d'offre d'emploi (voir graphiques ci-dessus) souligne que les consommations diminuent avec le nombre de postes présents dans et aux alentours des zones géographiques étudiées. L'allure des courbes ci-dessus semble indiquer que l'offre d'emploi de 1 km à 5 km covarie avec l'IPE suivant une courbe, alors que l'offre dans un rayon plus grand covarie linéairement.

Notons également qu'une évaluation de l'emploi dans un grand rayon uniformise les résultats pour des secteurs statistiques voisins, augmentant de ce fait l'autocorrélation spatiale. Ceci ne présente cependant pas un problème dans la mesure où cela traduit une réalité de terrain (les secteurs proches ont une accessibilité à l'emploi relativement similaire). Les trois graphiques suivants présentent l'évolution de l'IPE par ancienne commune en fonction de l'offre d'emploi à 1 km, 5 km et 10 km.

Les trois graphiques suivants permettent de visualiser l'effet de l'augmentation du rayon à l'intérieur duquel l'offre d'emploi est évaluée.



Le passage à une échelle méso permet notamment de faire en sorte que les coefficients de corrélation à l'échelle des secteurs statistiques ne sont pas beaucoup plus élevés que ceux calculés à l'échelle des anciennes communes. La comparaison des coefficients de corrélation dans les deux tableaux ci-dessous permet de le constater. Plusieurs observations intéressantes peuvent être faites sur base de ceux-ci :

- le coefficient de corrélation entre l'IPE et l'offre d'emploi s'améliore avec la taille du rayon pris en compte.
- les distances parcourues covarient particulièrement bien avec l'indicateur d'offre d'emploi à 10 km.
- Les parts modales des bus/tram/métro affichent les meilleurs coefficients de corrélation. C'est pour l'emploi calculé dans un rayon de 5 km autour d'une zone géographique donnée que la corrélation est maximum.
- La part modale de la marche à pied covarie plus clairement avec l'offre d'emploi local qu'avec une mesure de l'emploi dans une plus large région.

Tableau 43. Test de corrélation entre l'offre d'emploi et les déterminants de la mobilité (échelle des secteurs statistiques)

	Emplois	Emplois 1 km	Emplois 2 km	Emplois 3 km	Emplois 4 km	Emplois 5 km	Emplois 10 km
IPE Kg éq CO ₂ /trajet	-,266**	-,336**	-,424**	-,468**	-,494**	-,503**	-,505**
Distance moyenne	-,181**	-,236**	-,334**	-,396**	-,437**	-,458**	-,501**
Part modale voiture	-,512**	-,574**	-,534**	-,469**	-,414**	-,370**	-,203**
Part modale Bus/Tram/métro	,236**	,368**	,529**	,639**	,694**	,713**	,674**
Part modale Train	,143**	,149**	,090**	,024	-,023	-,057**	-,157**
Part modale vélo	,076**	,052**	,037**	-,003	-,041**	-,070**	-,158**
Part modale Marche à pied	,582**	,592**	,457**	,331**	,250**	,203**	,073**

** . Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

* . Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

Tableau 44. Test de corrélation entre l'offre d'emploi et les déterminants de la mobilité

(échelle des anciennes communes)

	Emplois	Emplois 1 km	Emplois 2 km	Emplois 3 km	Emplois 4 km	Emplois 5 km	Emplois 10 km
IPE Kg éq CO ₂ /trajet	-,281**	-,376**	-,445**	-,473**	-,496**	-,515**	-,521**
Distance moyenne	-,232**	-,328**	-,397**	-,429**	-,455**	-,479**	-,502**
Part modale voiture	-,417**	-,435**	-,426**	-,392**	-,367**	-,343**	-,224**
Part modale Bus/Tram/métro	,337**	,545**	,648**	,697**	,710**	,713**	,627**
Part modale Train	,107**	,076**	,063**	,040**	,030**	,014**	-,011**
Part modale vélo	,093**	,055**	,035**	,008**	-,010**	-,026**	-,079**
Part modale Marche-à-pied	,387**	,307**	,227**	,163**	,124**	,103**	,000**

**. Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

*. Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

5.4.1.4 Corrélation entre offre en bus et mobilité**Tableau 45. Test de corrélation entre la variable d'accessibilité en bus et les déterminants de la mobilité**

	Accessibilité en Bus
IPE (kg éq CO ₂ /trajet)	-,426**
Moyenne des km/trajet	-,387**
Part modale voiture	-,482**
Part modale bus/tram/métro	,732**
Part modale marche	,354**

**. Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

L'indicateur d'accessibilité au réseau des TEC, intégrant distance des habitations et fréquence de passage aux arrêts, présente un coefficient de corrélation positif assez élevé de 0,732 avec la part modale bus/tram/métro observée lors de l'enquête ESE 2001. Il s'agit du coefficient de corrélation le plus élevé entre une variable explicative et une variable comportementale. La manière très locale de construire cet indicateur (tenant compte d'une métrique piétonne de 300 mètres) semble être bien adaptée.

5.4.1.5 Corrélation entre offre en train et mobilité**Tableau 46. Test de corrélation entre la variable d'accessibilité en train, et l'IPE et la part modale du train**

	Accessibilité en train
IPE (kg éq CO ₂ /trajet)	-,443**
Part modale train	,349**

**. Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

L'indicateur construit est sans surprise celui qui affiche le meilleur coefficient de corrélation avec la modale du train observée en 2001 dans les anciennes communes. Cependant, le coefficient de corrélation n'est tout de même pas très élevé (0,349). L'explication provient sans doute du caractère très particulier des trajets en train. Ceux-ci sont généralement des plus longs en moyenne que pour les autres modes de transports (± 60 km) vers les grands pôles d'emplois. Par conséquent, les parts modales du train sont expliquées par la combinaison de l'offre en train et d'une distance relativement assez longue aux pôles majeurs.

5.4.1.6 Corrélation entre infrastructures routières et mobilité

Les deux indicateurs que nous allons tester maintenant sont la densité routière nette et la distance au réseau routier structurant. Le tableau suivant reprend les résultats de l'analyse de corrélation :

Tableau 47. Test de corrélation entre les indicateurs du réseau routier et les déterminants de la mobilité

	Distance au réseau structurant	Densité nette de voirie
IPE (kg éq CO ₂ /trajet)	,299**	,373**
Moyenne des km/trajet	,248**	,272**
Part modale voiture	,183**	,393**
Part modale moto/scooter	-,027	-,146**
Part modale bus/tram/métro	-,245**	-,299**
Part modale train	-,149**	-,293**
Part modale vélo	-,011	-,158**
Part modale marche	,057	-,013

** . Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

* . Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

Hickman et Banister ont également testé l'influence de la distance au réseau routier stratégique sur les consommations énergétiques. Ils mettent en évidence que les ménages se trouvant à moins de 3 km du réseau routier stratégique font en moyenne de bien plus longs déplacements (Hickman and Banister, 2007). Les résultats sont apparemment orientés en sens opposé en Région wallonne. Le coefficient de corrélation avec les distances moyennes parcourues est positif, d'une valeur relativement faible (0,248). Notons que la région étudiée est bien plus vaste que celle d'Hickman et Banister et que leur cas d'étude en Angleterre présente un seul pôle d'attraction prédominant (Londres). Il semble logique que les quartiers d'habitat autour des nœuds autoroutiers rejoignant Londres rapidement abritent une population ayant fait un choix stratégique de localisation. En Région Wallonne, l'éloignement du réseau routier important témoigne avant tout d'un isolement, et par conséquent entraîne une augmentation des distances moyennes de déplacements.

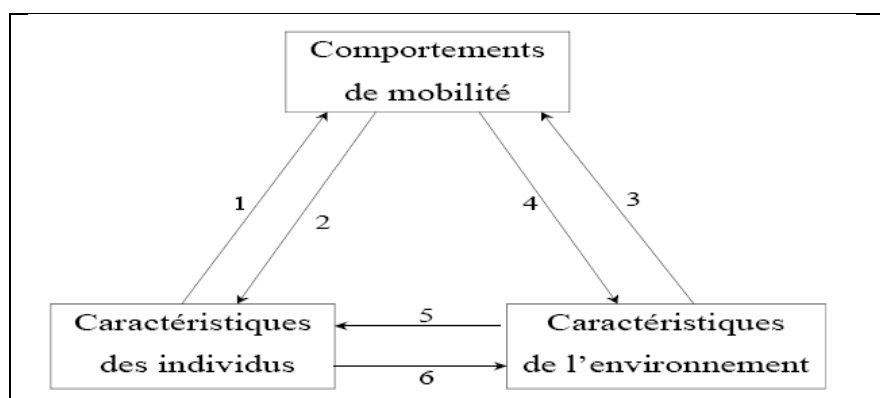
En ce qui concerne la densité nette de voirie, la figure 66 (cartographie) nous indique que cet indicateur est très élevé pour les zones rurales – là où le rapport entre le nombre de kilomètres de route par ha urbanisé est le plus élevé. Dès lors, pas étonnant que la valeur de la densité de route évolue dans le même sens que la part modale de la voiture, les distances moyennes et par conséquent l'IPE.

Néanmoins, les résultats obtenus pour ces deux indicateurs sont tout de même moins élevés que pour toutes les variables testées précédemment. Il faut dire que le réseau routier wallon est particulièrement dense. L'accès aux grandes routes dans un pays moins densément peuplé joue certainement un rôle plus déterminant dans les comportements de mobilité.

5.4.1.7 Corrélation entre variables socio-économiques et mobilité

Nous allons passer en revue les résultats des analyses de corrélation qui concernent les variables socio-démographiques. Comme nous déjà fait remarquer, il est nécessaire de prendre ces variables en compte, car elles influencent sans conteste les comportements de mobilité. Les composantes socio-démographiques (revenu, motorisation, âge, composition des ménages, etc.) doivent être intégrées comme variables dites « de contrôle ». Comme leur nom l'indique, ces variables permettent de contrôler les influences autres que celles de la forme urbaine (Pouyanne, 2004). La figure ci-dessous représente un aperçu du problème que nous devons résoudre. Le lien de causalité entre forme urbaine et comportement de mobilité nécessite que l'on s'intéresse aussi aux liens directs et indirects entre forme urbaine, caractéristiques des individus et comportements de mobilité.

Figure 80. Cadre conceptuel de l'interaction triangulaire Pouyanne (2004)



a) Composition des ménages et comportements de mobilité

Tableau 48. Composition des ménages et déterminants de mobilité

	Nombre de personnes dans un ménage					Couple sans enfant	Couple avec enfant	Parent seul avec enfant	Nombre d'enfants
	1	2	3	4	5				
IPE (kg éq CO ₂ /trajet)	-,174**	-,062	,008	,138**	,243**	-,017	,126**	-,147**	,129**
Moyenne des km/trajet	-,182**	-,029	,069**	,102**	,198**	-,013	,068**	-,077**	,080**
Part modale voiture	-,335**	-,076**	,031	,355**	,295**	-,095**	,366**	-,385**	,215**

** . Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

* . Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

Plus la taille d'un ménage est importante, plus les distances parcourues ont tendances à être grandes. L'utilisation de la voiture devient également importante lorsque le nombre d'enfants par ménage augmente. L'automobile peut s'avérer indispensable pour véhiculer les enfants à l'école par exemple. Au contraire, la proportion de familles monoparentales est négativement corrélée avec l'utilisation de la voiture.

La corrélation entre composition familiale et mobilité a déjà fait l'objet de plusieurs études. Celles-ci soulignent l'influence du nombre d'enfants (Rjamani et al., 2003) et du nombre d'actifs par ménage (Dieleman et al., 2002) sur les parts modales. Ces études tendent à prouver que l'augmentation de la taille des ménages entraîne un accroissement des besoins de mobilité, et incite ainsi à l'équipement automobile, mode qui permet de réaliser des chaînes de déplacements complexes (Pouyanne, 2004 ; Toint, 2002).

b) Motorisation et comportements de mobilité

Tableau 49. Possession d'une voiture et déterminants de mobilité

	% des personnes avec				Nombre de voitures par occupant
	Pas de voiture	1 voiture	2 voitures	+ de 2 voitures	
IPE (kg éq CO ₂ /trajet)	-,385**	-,227**	,369**	,175**	,373**
Moyenne des km/trajet	-,320**	-,196**	,321**	,114**	,307**
Part modale voiture	-,566**	-,288**	,487**	,347**	,547**
Part modale moto/scooter	,253**	,278**	-,318**	-,206**	-,313**
Part modale bus/tram/méto	,491**	,104**	-,335**	-,204**	-,398**
Part modale train	,102**	-,008	-,030	-,114**	-,085**
Part modale vélo	,158**	,222**	-,234**	-,135**	-,216**
Part modale marche	,446**	,320**	-,462**	-,241**	-,462**

** Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

La possession d'une voiture est fortement liée aux GES émis, principalement par le fait qu'elle constitue le mode de transport qui émet le plus de CO₂ au kilomètre et par personne. Ainsi, les ménages sans voiture ont tendance à émettre moins de CO₂. La part modale de la voiture est directement liée au nombre de voitures par occupant. En contrepartie, la part modale des bus et métro est inversement liée au nombre de voitures par occupant. Plus la population possède de voitures, plus elle aura tendance à l'utiliser et à effectuer de kilomètres.

c) Niveau d'éducation et comportements de mobilité

Tableau 50. Niveau d'éducation et déterminants de mobilité

	% des personnes d'un niveau d'éducation				
	Primaire	Secondaire inférieur	Secondaire supérieur	Post-second. non supérieur	Enseignement supérieur
IPE (kg éq CO ₂ /trajet)	-,206**	-,244**	,056*	,016	,178**
Moyenne des km/trajet	-,241**	-,262**	,054*	-,009	,203**
Part modale voiture	-,112**	-,163**	,031	,061	,109**
Part modale moto/scooter	,252**	,262**	,065*	-,041	-,259**
Part modale bus/tram/méto	,160**	,205**	-,064*	-,031	-,135**
Part modale train	-,177**	-,152**	-,084**	-,081**	,194**
Part modale vélo	,109**	,138**	,001	,021	-,118**
Part modale marche	,219**	,237**	,085**	,029	-,253**

** Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

* Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

Le niveau d'éducation est également lié aux kilomètres moyens parcourus et à l'utilisation des différents modes de transports. Plus la part des résidents qui possèdent un niveau d'éducation élevé augmente, plus la part modale de la voiture augmente. Ainsi, l'utilisation de la voiture est davantage liée à des navetteurs ayant un niveau d'éducation élevé (enseignement supérieur), et l'utilisation du bus et du métro ainsi que des modes doux (vélo et marche à pied) est liée à un niveau d'éducation bas (primaire et secondaire inférieur). L'interprétation de l'utilisation du train est par contre différente. Il semble que la part modale du train et la moyenne des kilomètres parcourus par trajet soient positivement corrélées à l'importance du niveau d'éducation, ce qui laisse présager une utilisation du train par les détenteurs de diplômes d'enseignement supérieur sur de longues distances.

d) Revenus et comportements de mobilité

Tableau 51. Revenus et déterminant de la mobilité

	Revenu moyen
IPE (kg éq CO ₂ /trajet)	,287**
Moyenne des km/trajet	,268**
Part modale voiture	,320
Part modale moto/scooter	-,277**
Part modale bus/tram/méтро	-,306
Part modale train	,120**
Part modale vélo	-,149**
Part modale marche	-,348**

** Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

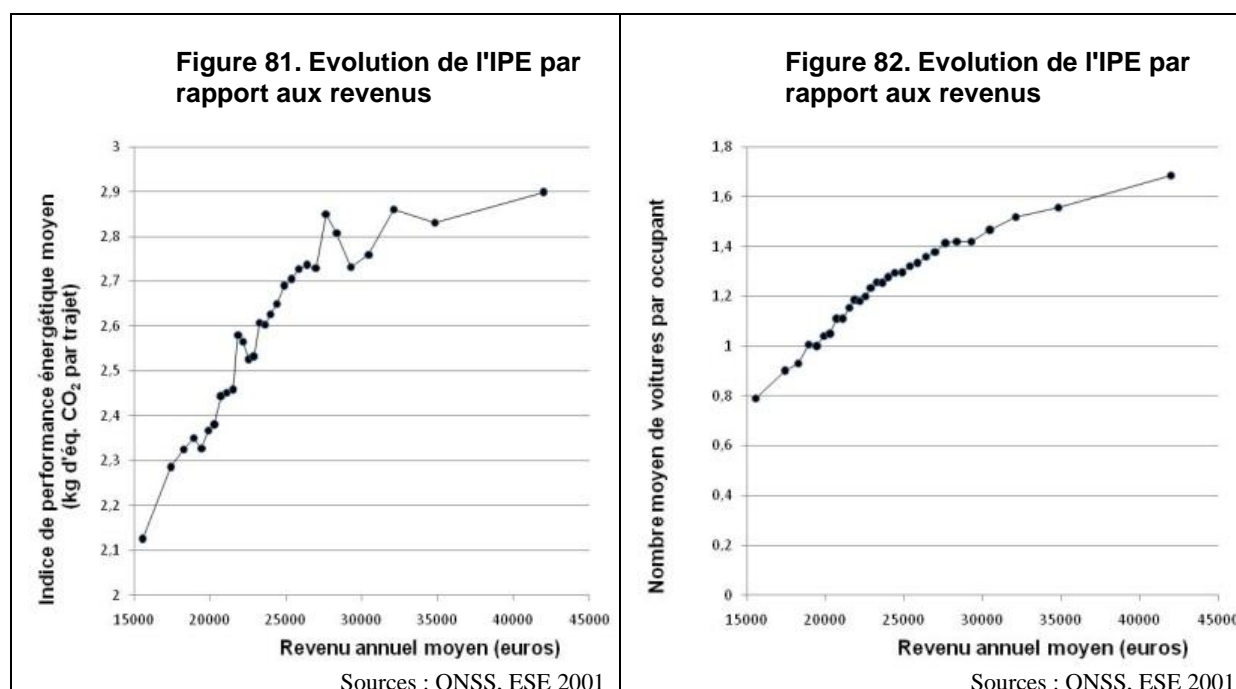
Tableau 52. Corrélation entre les revenus et le nombre de voitures

	Nombre de voitures par occupant
Revenu moyen	,543**

** Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

Le revenu moyen des ménages est positivement corrélé aux consommations énergétiques. Cette covariance s'explique sans doute en grande partie par l'effet que le revenu a sur la motorisation individuelle. Le tableau 52 ci-dessus illustre en effet que le revenu exerce une influence sensible sur le nombre de voitures par occupant, ce qui rejoint les résultats observés par ailleurs (Pouyanne, 2004 ; Froud et al., 2000 ; Jullien, 2002). Bien que la voiture se soit démocratisée ces dernières décennies, le coût d'accès à l'automobile reste trop élevé pour toute une tranche de la population.

Les deux graphes ci-dessous mettent en relation, pour l'un, les émissions de CO₂ avec le revenu moyen. De toute évidence, ces deux variables sont corrélées : les populations aisées ont tendance à émettre d'avantages de CO₂ comparé aux populations plus pauvres. Le revenu moyen par habitant permet d'expliquer l'utilisation de la marche à pied et, dans une moindre mesure, l'utilisation du bus. Notons cependant que le revenu est également fortement corrélé au nombre de voitures par ménage ce qui confirme nos observations ci-dessus concernant le nombre de voitures par occupant et les distances moyennes parcourues.



e) Statut professionnel et comportements de mobilité

Tableau 53. Statut professionnel et déterminants de mobilité

	Indépendants	Statutaires et contractuels du public, et employés du privé	Ouvrier et aidant (d'indépendant)
IPE (kg éq CO ₂ /trajet)	-,413**	-,308**	-,368**
Moyenne des km/trajet	-,353**	-,280**	-,320**
Part modale voiture	-,470**	-,316**	-,416**
Part modale moto/scooter	,014	-,044	-,015
Part modale bus/tram/métro	,435**	,264**	,347**
Part modale train	,165**	,131**	,144**
Part modale vélo	,089**	,044	,094**
Part modale marche	,325**	,239**	,325**

** Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

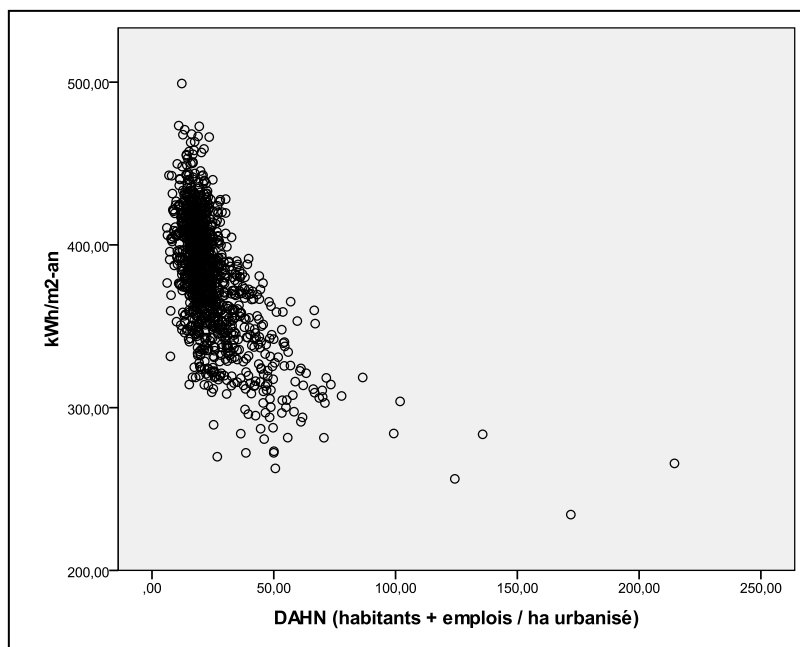
L'analyse des résultats qui concernent l'influence du statut professionnel est particulièrement délicate. Les coefficients de corrélation semblent assez bons pour l'échelle des anciennes communes, mais lorsque l'échelle d'analyse descend aux secteurs statistiques, les tendances s'inversent. Face à une spécialisation et une complexification de l'emploi, nous pourrions en effet nous demander dans quelle mesure le statut professionnel, décliné en 12 catégories (Patron, indépendant, statutaire, etc.) pourrait expliquer les comportements de mobilité.

5.4.1.8 Corrélation entre variables territoriales et les consommations du bâti

Cette partie présente les premiers résultats de l'analyse de corrélation entre les variables territoriales de densité et mixité, et les consommations du secteur résidentiel.

Le chapitre 4 s'est penché sur l'élaboration d'un cadastre des consommations énergétique du milieu bâti résidentiel en Région wallonne. La méthodologie bottom-up adoptée a fait intervenir une série de variables liées aux bâtiments (âge, taux de mitoyenneté, superficie de plancher, etc). Or, à l'instar des comportements de mobilité, certaines des caractéristiques du milieu bâti sont liées aux variables territoriales de densité et de mixité. Le graphique ci-dessous permet de constater la diminution des consommations énergétiques par m² lorsque la densité d'activité augmente.

Figure 83. variation des consommations énergétiques du bâti (KWh/m² par an) avec la densité d'activité humaine nette



Sources : PICC, INS, ONSS, COSW, Documentation Patrimoniale

Les résultats des tests de corrélation bivariés présentés dans le tableau ci-dessous nous indiquent que les consommations du bâti entretiennent un coefficient de corrélation supérieur à 0,5 avec l'ensemble des variables de densité présentées dans ce chapitre. De manière générale, ces consommations diminuent lorsque la densité et la mixité augmentent.

Tableau 54. Test de corrélation entre les consommations énergétiques du milieu bâti et les variables territoriales principales (échelle des anciennes communes)

	Densité de logements nette	Densité de bâtiments nette	Densité de population brute	Densité de population nette	DAHN	Age moyen des bâtiments	Mixité fonctionnelle nette
Consommation énergétique du bâti (KWh / m ²)	-,547**	-,515**	-,555**	-,585**	-,603**	-,560**	-,545**

** . Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

Ces résultats vont dans le même sens que ceux obtenus pour les consommations énergétique liées aux déplacements domicile-travail. Ce premier aperçu de l'influence des variables territoriales sur les consommations du bâti renforce donc l'idée que les espaces urbains denses sont relativement peu consommateurs par rapport au volume de population et de bâti qu'ils abritent.

5.4.1.9 Corrélation entre les performances énergétiques des déplacements domicile-travail et du bâti

Le graphe ci-dessous compare l'énergie journalière dépensée pour les déplacements domicile-travail et pour le chauffage du bâti résidentiel en Wallonie. L'énergie dépensée par les déplacements des actifs est exprimée en kWh par navetteur et par jour. Elle tient compte du mode de transport utilisé (voiture, moto/scooter, bus et métro, train, vélo, marche à pied) et de la distance moyenne parcourue lors de chaque trajet. L'énergie consommée pour le bâti est basée sur une approche bottom-up expliquée au chapitre 4. Afin de pouvoir comparer ces deux unités de mesures différentes, nous avons calculé l'écart à la moyenne régionale en pourcent. Ainsi, dans le troisième quadrant du graphique (coin inférieur gauche) se trouvent les anciennes communes jugées globalement comme performantes à la fois en termes de mobilité et de bâti. Inversement, les communes peu performantes se situent dans le deuxième quadrant, c'est-à-dire où les résidents consomment davantage d'énergie à la fois pour se chauffer et se déplacer comparé à la moyenne régionale. Les anciennes communes sont classées selon le découpage territorial de la hiérarchie des communes de Van Hecke (1998). De cette manière, les anciennes communes appartenant à des régions « urbaines » peuvent être comparées à celles plus « rurales ».

Figure 84. Croisement des performances énergétiques des déplacements domicile-travail et du bâti selon la hiérarchie des communes de Van Hecke



GV= Grande ville ; VR = Ville régionale; PVBE = Petite ville bien équipée ; PVME = Petite ville moyennement équipée ; PVFE = Petite ville faiblement équipée ; CNUBE = Commune non urbaine bien équipée ; CNUME = Commune non urbaine moyennement équipée ; CNUFE = Commune non urbaine faiblement équipée

Sources : Van Hecke, ESE 2001, Documentation Patrimoniale 2010

Une lecture du graphique par type de région met en évidence la bonne performance des entités à caractère urbain. Les anciennes communes de grandes villes et la majorité des anciennes communes de villes régionales contiennent des habitants qui dépensent peu d'énergie à la fois pour se déplacer et pour se chauffer. En ce qui concerne les dépenses énergétiques pour les déplacements domicile-travail, les communes de grandes villes sont systématiquement en dessous de la moyenne régionale. Les trois anciennes communes les plus performantes sont Chênée, Ans et Grivegnée dans l'agglomération de Liège. Par contre, en ce qui concerne le bâti, certaines anciennes communes appartenant à la commune de Charleroi (Mont-sur-Marchienne, Gilly et Roux par exemple) dépensent plus d'énergies comparées à la moyenne régionale. Par ailleurs, ce sont les habitants des anciennes communes du centre de Liège (Meuse sud et Meuse nord) et de Charleroi qui dépensent le moins d'énergie pour se chauffer.

A l'opposé, les habitants des régions au caractère rural (communes non urbaines) dépensent généralement plus d'énergie que la moyenne pour se rendre au travail et pour se chauffer. Généralement, d'avantage d'énergie est dépensée pour les déplacements que pour le bâti. En ce qui concerne ce dernier poste, parmi les trente anciennes communes les plus consommatrices, plus de la moitié sont issues des Provinces de Namur et de Luxembourg. En ce qui concerne la mobilité, bon nombre d'anciennes communes rurales fortement énergivores se situent à l'est de la Province du Brabant Wallon. Notons cependant que bon nombre de communes de ce même type de région se situent au même rang que les anciennes communes de grandes villes et de ville régionale peu consommatrice d'énergie.

Les anciennes communes de petites villes connaissent une situation intermédiaire aux régions urbaines (villes et grandes villes) et aux communes rurales. Certaines d'entre elles peuvent être très performantes (Mouscron centre par exemple) alors que des localités rurales peu denses appartenant à ces petites villes peuvent être très énergivores à la fois pour les déplacements et pour le bâti (notamment Thysne dans la commune de Dinant par exemple) comparé à la moyenne régionale.

5.5 LEVIERS DE L'AMENAGEMENT DU TERRITOIRE POUR LA REDUCTION DES EMISSIONS DE GES EN WALLONIE

Cette section avait pour but de définir les variables territoriales et socio-économiques prises en compte dans notre recherche et d'étudier les liens existants entre celles-ci et les consommations énergétiques issues des déplacements domicile-travail et du bâti résidentiel.

Les analyses de corrélation ont montré que les déterminants des comportements de mobilité (distances parcourues, parts modales), et donc que l'indice de performance énergétique, covarient de manière significative avec certaines variables territoriales clefs. Nous pouvons résumer ces premiers résultats comme suit :

- la **densité**, et plus particulièrement la densité d'activité humaine nette, est inversement corrélée avec les consommations énergétiques, les distances moyennes parcourues et la part modale de l'automobile;
- la **mixité fonctionnelle**, calculée sur base des occupations du sol au COSW, affiche un coefficient de corrélation plus élevé que la densité avec l'IPE;
- la **mixité** et la **densité** sont toujours corrélées positivement avec les parts modales des bus, des trams, et du métro;
- la **mixité**, mesurée par le rapport emplois/population active, est particulièrement bien corrélée avec l'augmentation de la part modale de la marche à pied;
- l'**offre d'emploi**, calculée dans un rayon de **10 km**, est la variable affichant le meilleur coefficient de corrélation négatif avec les distances moyennes parcourues;
- l'**offre d'emploi** locale, calculée dans un rayon d'**1 km**, explique particulièrement bien les parts modales de la marche à pied.

- l'indice d'**accessibilité au bus** est particulièrement bien corrélé aux parts modales observées. Ceci souligne l'importance de la forte proximité des arrêts et de la fréquence de passage des bus à ceux-ci;
- l'indice d'**accessibilité au train** est le seul qui arrive à expliquer les parts modales du train de manière significative;

Cette recherche met l'accent sur la nécessité de prendre les variables socio-démographiques en compte dans les analyses statistiques, car elles forment les comportements de mobilité. Les composantes socio-démographiques (revenus, motorisation, âge, composition des ménages, etc.) doivent être intégrées comme variables dites « de contrôle ». Comme leur nom l'indique, ces variables permettent de contrôler les influences autres que celles de la forme urbaine (Pouyanne, 2004). Nos analyses de corrélation ont donc permis de souligner que :

- la **taille** des ménages est importante. Au plus la taille d'un ménage augmente, au plus les distances parcourues et la part modale de la voiture ont tendance à être grandes;
- la **motorisation** est déterminante. Les consommations énergétiques entretiennent une corrélation positive avec le nombre de voiture par occupant;
- le **revenu**, qui conditionne notamment l'accès à la voiture individuelle, est également positivement corrélé avec les consommations énergétiques;

De manière similaire aux résultats issus du chapitre mobilité de cette recherche, la densité urbaine et la mixité fonctionnelle sont elles aussi fortement corrélées aux performances énergétiques du bâti.

La détermination des relations de **causalité**, à travers une analyse de régression multivariée, devront dans les prochains mois se baser sur les résultats des corrélations résumés ci-dessus.

Finalement, les premiers croisements entre les performances énergétiques des déplacements domicile-travail et du bu bâti ont permis de mettre en évidence la bonne performance énergétique du milieu « urbain » comparé au milieu « rural » (au sens de la hiérarchie des communes de Van Hecke 1998).

Ces premières conclusions portent à dire que densité et mixité doivent dans le futur rester au centre de nos investigations pour évaluer les leviers majeurs de l'aménagement du territoire permettant de réduire les émissions de gaz à effet de serre liées aux déplacements domicile travail et au bâti.CO₂

6. LISTE DES ENTRETIENS RÉALISÉS

Infrabel: **Alain ANGE**, Gestionnaire réseau

SRWT: **Nadia NEVEN**, Chef de projet « développement durable » au TEC

IWEPS: **Julien CHARLIER**, Chercheur

IWEPS: **Julien JUPRELLE**, Chercheur

AWAC: **Annick FOURMEAUX**, Directrice

AWAC: **Pascal THEAT**, Chercheur

CELINE: **Olivier BIERNAUX**, Chercheur

CERTU: **Dr. Damien VERRY**, Chef de groupe "Analyse et prospection de la mobilité"

LVMT: **Dr. Thierno AW**, Chercheur

Caisse des dépôts - Mission Climat: **Ian COCHRAN**, Doctorant

LET : **Dr. Aurélien MERCIER**, Chargée de recherche

7. RÉFÉRENCES

7.1 RAPPORTS DE SUBVENTION CPDT

CPDT (2003). *Mutations spatiales et structures territoriales*. Rapport final de subvention (2002-2005). Thème 1, septembre 2004

CPDT (2005). *Contribution du développement territorial à la réduction de l'effet de serre*. Rapport final de subvention (2002-2005), Thème 2, septembre 2005

7.2 BIBLIOGRAPHIE

ADEME (2007) *Guide des facteurs d'émissions*. Version 5.0. 240 pp.

BAKER N., STEEMERS K. (2000). *Energy and environment*. In *Architecture: A technical design guide*. Londres : E&F Spon.

BANISTER D. (1996). 'Energy, quality of life and the environment: the role of transport', *Transport Revue*, Vol. 16, n°1, pp. 23–35.

BANISTER D., WATSON, S., WOOD C. (1997) *Sustainable cities – transport, energy and urban form*. *Environment and Planning B*, Vol. 24, n°1, pp. 125–143.

BEELEN M., HALLEUX J.-M., LAMBOTTE J.-M., RIXHON G., THOMAS I., VAN HECKE E., VERHETSEL A. (2009) *Le mouvement pendulaire en Belgique – Monographie n°10*. SPF Economie, P.M.E., Classes moyennes et Energie.

BOUSSAUW K., WITLOX F. (2009). *Introducing a commute-energy performance index for Flanders*. *Transportation Research Part A*, n°43, pp. 580-591.

BOUYER J. (2009). *Modélisation et simulation des microclimats urbains, Étude de l'impact de l'aménagement urbain sur les consommations énergétiques des bâtiments*. Nantes : thèse de doctorat, ENSAN, 306pp.

BREHENY M. (1995). *The compact city and the transport energy consumption*. *Transactions of the institute of British Geographers*, Vol. 50, n°1, pp. 285-304

BREHENY M. (1997). *Urban compaction: Feasible and acceptable?* *Cities*, Vol. 14, n°4, pp. 209–217.

BRUHNS H., HERRING H., STEADMAN P. (2000). *A Database for modeling energy use in the non-domestic building stock of England and Wales*. *Applied Energy*, n°66, pp.277-297.

- CERVERO R. (1996). *Jobs-Housing Balancing Revisited*. Journal of the American Planning Association, Vol. 62, n°4, pp.492-511.
- DE VLIÉGER I., CORENELIS E., PANIS L., SCHROOTEN L., GOVAERTS, L., PELKMANS L., LOGGHE S., VANHOVE F., DE CEUSTER G., MACHARIS, C., PEKIN, E., VAN MIERLO J., TIMMERMANS J.-M., MATHEYS J., VAN BLADEL K., DE JONG M., DE GEEST C., VAN WALSUM E. (2006) *Milieurapport Vlaanderen - MIRA, Achtergronddocument - Sector Transport*. Aalst: Vlaamse Milieumaatschappij, pp 131.
- DEJARDINS X., LLORENTE M. (2009). *Quelle contribution de l'urbanisme et de l'aménagement du territoire à l'atténuation du changement climatique ?* CSTB pour le MEDEDDM, pp. 123.
- DUHAYON J.-J., PAGES A., PROCHASSON F. (2002). *La densité : concept, exemples, mesures. Eclairages sur le concept de densité et sur les différents usages de ses mesures*, Rapport, Lyon : CERTU, 88pp.
- ECOTEC (1993). *Reducing transport emissions through land use planning*. HMSO.
- ELECTRABEL (2006) Rapport environnemental 2005
- ELECTRABEL (2007) Rapport environnemental 2006
- ELECTRABEL (2008) Chiffres clés 2007
- ENERDATA S.A. (2004) *Efficacité Energétique des Modes de Transport: Rapport Final*. Grenoble-Gières, pp 156.
- EWING R., RONG F. (2008). *The impact of urban form on U.S. residential energy use*. housing policy debate. Metropolitan, Vol. 19, pp. 30.
- FARTHING S., WINTER J., COOMBES T. (1997) *Travel behaviour and local accessibility to services and facilities*. In Jenks, M., Burton, E. and Williams, K. (eds.) *The Compact City. A Sustainable Urban Form?* London: E & FN Spon, pp. 181–189.
- FOUCHIER V. (1997). *Les densités urbaines et le développement durable : le cas de l'Île de France et des villes nouvelles*, Paris : Secrétariat général du groupe central des villes nouvelles, 211pp.
- GIEC (2007) *Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat* [Équipe de rédaction principale, Pachauri, R.K. et Reisinger, A. (publié sous la direction de~)]. GIEC, Genève, Suisse, 103 pp. (http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr_fr.pdf)
- GORDON P., KUMAR A., RICHARDSON H.W. (1989a). *Congestion, changing metropolitan structure and city size in the United States*. International Regional Science Review, Vol. 12, n°1, pp. 45–56.
- GORDON P., KUMAR, A., RICHARDSON H.W. (1989b). *Gender differences in metropolitan travel behaviour*. Regional Studies, Vol. 23, n°6, pp. 499–510.
- GORDON P., RICHARDSON H.W. (1997). *Are compact cities a desirable planning goal?* Journal of the American Planning Association, Vol. 63, n°1, pp. 95–106.
- GORDON P., RICHARDSON H.W., JUN M.-J. (1991). *The commuting paradox: evidence from the top twenty*. Journal of the American Planning Association, Vol. 57, n°4, pp. 416–420.
- GRAZI F., VAN DEN BERGH J., VAN OMMEREN J.N. (2008). *An Empirical Analysis of Urban Form, Transport and Global Warming*. The Energy Journal Vol.29, n°4.

GUNS A., et PERRIN

wallon, Cellule Air, Région wallonne, Namur, 42 pp.

HALL P. (1998) Conclusions , *In BANISTER D. (ed.) Transport Policy and the Environment*. London: E & FN Spon, pp. 333–336.

HANSON S. (1982). *The determinants of daily travel-activity patterns: relative location and sociodemographic factors*. *Urban Geography*, Vol. 3, n°3, pp. 179–202.

HEADICAR P. (1996) *The local development effects of major new roads: M40 case study*. *Transportation*, Vol. 23, n°1, pp. 55–69.

HEADICAR P., CURTIS C. (1998). *The location of new residential development: its influence on car-based travel*. *In BANISTER D. (ed.) Transport Policy and the Environment*. London: Spon, pp. 220–240.

HOLDEN., NORLAND I. (2004). *Sustainable urban form: household consumption of energy and transport in eight Norwegian Residential areas*. Cambridge : ENHR Conference.

HUBERT J.-P., TOINT P. (2002). *La mobilité quotidienne des belges*. Collection « Mobilité et Transports », n°1. Namur: Presse universitaire de Namur, pp. 352.

HUI S. (2001). *Low energy building design in high density urban cities*. *Renewable Energy*, n°24, pp.627-640.

IAURIF (2005). - « Appréhender la densité. Les repères historiques », Notes Rapides sur l'Occupation des Sols n°382, 383, 384, 2005.

ICEDD (2009) Bilan énergétique de la région wallonne 2007 – Consommation des transports.

IWEPS - DPDTM (2008) Analyse des données des enquêtes régionales sur la mobilité des ménages 2002 et 2004. Document non publié.

IWEPS (2007) Chiffres clés de la Wallonie. N°7.

JENKS M., BURTON E., WILLIAMS K. (1996). *The compact City : A Sustainable Urban Form ?*. Oxford: Oxford Brookes University.

JONES P., LANNON S., WILLIAMS J. (2001). *Modelling building energy use at the urban scale*. Rio de Janeiro : 7th International IBSPA conference, Brazil, August 13-15th.

KITAMURA R., MOKHTARIAN P., LAIDET L. (1997). *A Micro-Analysis of Land Use and Travel in Five Neighborhoods in the San Francisco Bay Area*. *Transportation*, Vol. 24, pp. 125-158.

LAMPIN L., GRAZI F. (2009). *Forme urbaine et impact climatique du secteur résidentiel*. Paris : CIRED.

LARIVIERE I., LAFRANCE, G. (1999). *Modelling the electricity consumption of cities: effect of urban density*. *Energy Economics*, n°21, pp.53-66.

MA K.-R., BANISTER D. (2006). *The Extended excess commuting technique as a jobs-housing balance mismatch measure*. *Urban Studies*, Vol. 43, n°11, pp. 2009-2113.

MAIZIA M., MENARD R., NICOLAS J.P., TELLER J., VIEJO P., LACOSTE G.

(2008). *Les gisements du développement urbain : Analyse quantitative à l'horizon 2050 des consommations énergétiques et des émissions de CO₂ des tissus urbains*. Rapport PREBAT (non publié).

MAIZIA M. (2009). *L'énergétique urbaine et la morphologie des villes. Analyse du bâti parisien*. Paris, La transition énergétique. pp.79-85.

MAIZIA M. (2007). Réponse à la proposition de recherche « Incidence des formes urbaines et des dynamiques d'agglomération sur les émissions de gaz à effet de serre et l'efficacité énergétique liées aux bâtiments ». DIVERGENT-PREBAT (non publié).

MARENNE Y (2006)

l'environnement wallon. Cellule Air, Région wallonne, Namur, 15 pp.

MARTIN L., MARCH L. (1972). *Urban Space and Structures*, Cambridge : Cambridge University Press, 279pp.

MINDALI O., RAVEH A., SALOMON I. (2004). *Urban density and energy consumption: a new look at old statistics*. Transportation Research Part A, 38, pp.143-162.

MITCHELL G. (2005). *Urban développement, form and energy use in buildings : a review for the SOLUTION project (Sustainability Of Land Use and Transport In Outer Neighbourhoods)*. Cambridge : Report to the EPSRC, 7pp.EPSRC, 28pp.

MURAKAMI M., SAKAMOTO K. (2005). *Relationship between urban thermal environment and urban form*. London : The Computers in Urban Planning and Urban Management conference, UCL. 16pp.

NAESS P., SANDBERG S.L. (1996). *Workplace location, modal split and energy use for commuting trips*. Urban Studies, Vol. 33, n°3, pp. 557–580.

NEWMAN P.W.G., KENWORTHY J.R. (1989a). *Cities and Automobile Dependence – An International Sourcebook*. Aldershot: Gower.

NEWMAN P.W.G., KENWORTHY J.R. (1989b). *Gasoline consumption and cities: a comparison of US cities with a global survey*. Journal of the American Planning Association, Vol. 5, n°1, pp. 24–37.

NEWMAN P.W.G., KENWORTHY J.R. (1999) *Sustainability and Cities: Overcoming Automobile Dependence*. Washington DC: Island Press.

OWENS S. (1986). *Energy, Planning and Urban Form*. London : Pion Ltd.,117pp.

RATTI C., BAKER N., STEEMERS K. (2005). *Energy consumption and urban texture*. Energy and Buildings, n°37, pp. 762-776.

RATTI C., RAYDAN D., STEEMERS K. (2003). *Building form and environmental performance : Archétypes, analysis and an arid climat*. Energy and Buildings, n°35, pp. 49-59.

RICKABLY P., BURHNS H. MORTIMER N., STEADMAN J.P., CLARCK E. (1996). *Mechanical ventilation and air conditioning in UK buildings*. Building Services Journal (formerly the CIBSE Journal).

SCHWANEN T., DIELEMAN F.M., DIJST M. (2001) *Travel Behaviour in Dutch Monocentric and Polycentric Urban Systems*. Journal of Transport Geography, Vol. 9, pp. 173-186.

SHIMODA Y., FUJII T., MORIKAWA T. MIZUNO M. (2004). *Residential end-use energy simulation at city scale*. Building and Environment , n°39, pp. 959-967.

STEAD D. (2001). *Relationship between land use, socio-economic factors, and travel patterns in Birtain*. Environment and planning B, Vol. 28, n°4, pp. 499-528.

STEADMAN J.P., BURHNS H., GARKOVIC B. (2000). *A classification of built form*. Environnement and Planing. Boston : Planning an Design, n°27, pp.73-91.

STEADMAN J.P., HOLTIER S., BROWN F. TURNER J., DE LA BARRA T., RCKABILY P. (1998). *An integrated building stock, transport and energy model of a medium sized city*. Cambridge : Report to the EPSRC, 7pp.

STEEMERS K. (2003). *Energy and the city: density, buildings and transport*. Energy and Buildings, n°35, pp. 3-14.

VAN HECKE E., HALLEUX J.-M., DECROLY J.-M., MERENNE-SCHOUMAKER B. (2009) Noyaux d'habitat et régions urbaines dans une Belgique urbanisée. Monographie n°9. SPF Economie, P.M.E., Classes moyennes et Energie.

VAN HECKE E. (1998) *Actualisation de la hiérarchie urbaine de Belgique*. Bulletin du Crédit Communal, Vol. 3, n° 205, pp. 45-76.

VANNESTE D., THOMAS I., GOOSSENS L. (2007) *Woning en Woonomgeving in België*. SPF Economie et Statistique, SPF Politique scientifique, 199 p.

VERHETSEL A., THOMAS I., VAN HECKE E., BEELEN M. (2006) *Pendel in België – Deel I: de woon-werkverplaatsingen*. Sociaal-economische enquête 2001. Monografieën. Brussel: FOD Economie, pp170.

WILLIAMS J. (1998). *How Big is Sustainable? The Interaction Between Settlement Size and Travel Behaviour*. European Transport Conference Proceedings, PTRC.

WILLIAMS K. (2005) *Spatial Planning, Urban Form and Sustainable Transport*. Aldershot: Ashgate.

YAMAGUSHI Y., SHIMODA Y., MIZUNO M. (2007). *Proposal of a modeling approach considering urban form for évaluation of city level energy management*. Energy and Building, n°39, pp.580-592.

7.3 WEBOGRAPHIE

CPDT : <http://cpdt.wallonie.be>

COPERT : <http://lat.eng.auth.gr/copert/>

GIEC : <http://www.ipcc.ch/>

Actes et glossaire du GIEC : <http://www.greenfacts.org/fr/index.htm>

8. ANNEXE I: HIÉRARCHIE DES COMMUNES WALLONNES SELON VAN HECKE (1998)

Niveau d'urbanisation fonctionnelle	Commune		
Grande ville (GV)	CHARLEROI	LIEGE	
Ville régionale (VR)	ARLON	MONS	TOURNAI
	LA LOUVIERE	NAMUR	VERVIERS
Petite ville bien équipée (PVBEa)	ATH	MARCHE-EN-FAMENNE	NIVELLES
	EUPEN	MOUSCRON	WAVRE
	HUY		
Petite ville moyennement équipée (PVMEb)	BASTOGNE	LIBRAMONT-CHEVIGNY	SPA
	CINEY	MALMEDY	VIRTON
	DINANT	OTTIGNIES-LOUVAIN-LA-NEUVE	WAREMME
Petite ville faiblement équipée (PVFEc)	ANDENNE	HANNUT	SAMBREVILLE
	BINCHE	JODOIGNE	SERAING
	BRAINE-L'ALLEUD	PERUWELZ	SOIGNIES
	CHIMAY	PHILIPPEVILLE	WISE
	COUVIN	SAINT-GHISLAIN	WATERLOO
	GEMBLOUX	SAINT-VITH	
Commune rurale bien équipée (CNUBEA)	AMAY	ENGHIEN	MANAGE
	ANS	ERQUELINNES	MESSANCY
	AUBANGE	ESNEUX	MONTIGNY-LE-TILLEUL
	AYWAILLE	FLEMALLE	MORLANWELZ
	BEAURAING	FLERON	NEUFCHATEAU
	BELOEIL	FLEURUS	QUAREGNON
	BERTRIX	FLORENNES	RIXENSART
	BOUILLON	FLORENVILLE	ROCHFORT
	BOUSSU	FONTAINE-L'EVEQUE	SAINT-HUBERT
	BRAINE-LE-COMTE	FRAMERIES	SAINT-NICOLAS
	CHATELET	HERSTAL	STAVELLOT
	CHAUDFONTAINE	HERVE	THUIN
	COLFONTAINE	HOUFFALIZE	TUBIZE
	COMINES	KELMIS/LA CALAMINE	VIELSALM
	COURCELLES	LESSINES	WALCOURT
	DOUR	LEUZE-EN-HAINAUT	WELKENRAEDT
	DURBUY		
	Commune rurale moyennement équipée	AISEAU-PRESLES	FRASNES-LEZ-ANVAING

(CNUMEB)	AMEL/AMBLEVE	GEDINNE	ORP-JAUCHE
	ANDERLUES	GENAPPE	OUFFET
	ANHEE	GERPINNES	OUPEYE
	ANTOING	GESVES	PALISEUL
	AUBEL	GOUVY	PECQ
	AWANS	GRACE-HOLLOGNE	PEPINSTER
	BASSENGE	GREZ-DOICEAU	PERWEZ
	BEAUMONT	HABAY	PLOMBIERES
	BEAUVECHAIN	HAMOIR	PONT-A-CELLES
	BERNISSART	HAMOIS	PROFONDEVILLE
	BEYNE-HEUSAY	HAM-SUR-HEURE-NALINNE	QUEVY
	BIEVRE	HASTIERE	QUIEVRAIN
	BLEGNY	HAVELANGE	RAEREN
	BRAINE-LE-CHATEAU	HONNELLES	REBECQ
	BULLINGEN-BULLANGE	HOTTON	SAINTE-ODE
	BUTGENBACH	HOUYET	SENEFFE
	CHAPELLE-LEZ-HERLAIMO	ITTRE	SIVRY-RANCE
	CHAUMONT-GISTOUX	JEMEPPE-SUR-SAMBRE	SOMBREFFE
	CHIEVRES	JURBISE	SOUMAGNE
	CHINY	LA HULPE	SPRIMONT
	COMBLAIN-AU-PONT	LA ROCHE-EN-ARDENNE	St.-GEORGES-SUR-MEUSE
	COURT-SAINT-ETIENNE	LASNE	TELLIN
	DISON	LE ROEULX	THEUX
	ECAUSSINES	LENS	TINTIGNY
	EGHEZEE	LES BONS VILLERS	TROIS-PONTS
	ELLEZELLES	LIERNEUX	TROOZ
	ENGIS	LIMBOURG	VILLERS-LA-VILLE
	EREZEE	LOBBES	VILLERS-LE-BOUILLET
	ESTAIMPUIS	MARCHIN	VIROINVAL
	ESTINNES	MARTELANGE	VRESSE-SUR-SEMOIS
	ETALLE	METTET	WAIMES
	FARCIENNES	MOMIGNIES	WANZE
	FERRIERES	NANDRIN	WELLIN
	FLOREFFE	NASSOGNE	YVOIR
	FOSSÉS-LA-VILLE		
Commune rurale faiblement équipée (CNUFEC)	ANTHISNES	FERNELMONT	MONT-SAINT-GUIBERT
	ASSESE	FEXHE-LE-HAUT-CLOCHER	MUSSON
	ATTERT	FLOBECQ	OHEY

	BAELEN	FROIDCHAPELLE	OLNE
	BERLOZ	GEER	ONHAYE
	BERTOGNE	HELECINE	OREYE
	BRAIVES	HENSIES	RAMILLIES
	BRUGELETTE	HERBEUMONT	REMICOURT
	BRUNEHAUT	HERON	RENDEUX
	BURDINNE	INCOURT	ROUVROY
	BURG-REULAND	JALHAY	RUMES
	CELLES	JUPRELLE	SAINT-LEGER
	CERFONTAINE	LA BRUYERE	SILLY
	CHASTRE	LEGLISE	SOMME-LEUZE
	CLAVIER	LIBIN	STOUMONT
	CRISNEE	LINCENT	TENNEVILLE
	DALHEM	LONTZEN	THIMISTER- CLERMONT
	DAVERDISSE	MANHAY	TINLOT
	DOISCHE	MEIX-DEVANT- VIRTON	VAUX-SUR-SURE
	DONCEEL	MERBES-LE- CHATEAU	VERLAINE
	FAIMES	MODAVE	WALHAIN
	FAUVILLERS	MONT-DE- L'ENCLUS	WASSEIGES

9. ANNEXEII: LE LOGICIEL COPERT

Dans le secteur des transports, l'outil de référence qui est utilisé pour évaluer les émissions de GES liés aux transports routier est le logiciel COPERT. Mis au point par l'Université de Thessalonique dans le cadre d'un financement européen (Agence Européenne de l'Environnement), il a pour but d'aider les états membres à réaliser leurs inventaires nationaux sur une base commune. Il reprend le calcul des émissions des polluants atmosphériques majeurs (CO, NOx, VOC, PM, NH3, SO2, métaux lourds) produits par différentes catégories de véhicules (voitures individuelles, véhicules utilitaires, poids lourds, moto et scooter) ainsi que les émissions de gaz à effet de serre (CO₂, N₂O, CH₄).

Différentes sources d'émissions sont prises en compte, à savoir : les émissions engendrées par le moteur « à chaud », les émissions au démarrage en fonction de la température ambiante (démarrage à froid et effet de réchauffement) et les émissions de composés organiques volatiles non-méthaniques (COVNM) dus à l'évaporation du carburant. Les émissions de particules fines non émises résultantes des pneus et des freins sont également incluses. Les émissions totales sont calculées comme le produit des données sur l'activité fournie par l'utilisateur et des facteurs d'émission calculés par le logiciel.

En Wallonie, l'Agence Wallonne Air Climat (AWAC) a développé sa méthode d'évaluation sur base du logiciel COPERT. Selon la même logique, une première approche *top-town* reprend des données relatives à la consommation de carburants³⁹ pour l'ensemble du territoire wallon. Ensuite, une approche *bottom-up* prend en compte les particularités régionales via les données sur la composition du parc de véhicules⁴⁰, la circulation (comptages régionaux) ou encore la température. Ainsi, les consommations globales sont restituées par catégorie de véhicule.

Une correction est cependant apportée par rapport à l'âge des véhicules. Au plus ces derniers sont vieux, au moins ils circulent. C'est pourquoi, en plus de répartir les données de mobilité par catégorie de véhicules selon le carburant utilisé, la cylindrée, et la classe EURO, le parc étudié est également discrétisé en fonction de l'âge du véhicule. En termes d'émissions d'oxyde d'azote par exemple, cette amélioration a un impact significatif.

Les résultats obtenus sont des facteurs d'émissions moyens par voiture. Le taux d'occupation par voiture n'est pas pris en compte.

³⁹ Ces données se basent sur les chiffres de vente de carburants en Wallonie publiés par le Service Public Fédéral Economie. Les véhicules qui se fournissent à l'étranger (ex : Luxembourg) mais qui circulent majoritairement en Wallonie ne sont donc pas pris en compte dans l'évaluation.

⁴⁰ Données généralement issues de la Division Immatriculation Véhicules (DIV).

10. ANNEXE III: FICHES BIBLIOGRAPHIQUES

Fiche bibliographique 1	
Titre : Energy Planning and Urban Form Auteur : OWENS S. Année : 1986	Type de document : Livre Nombre de pages : 118

Résumé orienté

Cet ouvrage compile et développe d'avantages l'ensemble des idées émises suite à la crise énergétique des années 70 sur la relation entre les systèmes d'énergie et la structure spatiale de la société. Trois problématiques majeures sont étudiées en détail : les liens entre énergie et structure spatiale à l'échelle régionale, sous-régionale et locale ; les effets possibles des contraintes énergétiques sur l'évolution des villes et des régions ; et les potentialités de modifier la forme urbaine pour réduire les besoins énergétiques des transports et du bâtiment.

Méthodologie

Le livre se base à la fois sur des expériences pratiques et sur des fondements théoriques. Il s'inscrit dans un contexte international (uniquement les pays développés), mais il se focalise principalement sur des cas d'étude anglais.

Intérêt de l'ouvrage pour la recherche

Les arguments au sujet des relations entre forme urbaine et déplacements sont les suivants: la densité constitue une condition nécessaire mais non suffisante pour limiter les déplacements ; il est peu probable qu'une relation simple existe entre la taille des formes urbaines et les comportements de mobilité ; la mixité des fonctions n'influence pas de manière aussi importante que la densité sur les déplacements.

Une vision détaillée de l'étendue des besoins énergétiques liés à différentes variables structurelles significatives, selon différentes échelles d'organisation territoriale, est présentée (voir figure ci dessous).

Variable structurelle	Echelle
Structure du territoire (par exemple, taille et distances entre les pôles, etc.)	régionale
Réseau de communication entre les pôles	
Taille du pôle (surface urbanisée)	subrégionale
Forme des espaces urbanisés (circulaire, linéaire, etc.)	Echelle de la ville
Réseau de communications dans le pôle (radial, grille, etc.)	
Densité	Quartier
Mixité des fonctions	
Degré de centralisation des services	bâtiment
Agencement (quartiers, etc.)	
Orientation (des immeubles ou groupes d'immeubles)	
Relation au site (en relation avec le microclimat)	
Design	

Quares (1999). Traduction L. Lepur

Pour élargir

A la suite de cet ouvrage, le débat sur l'efficacité énergétique de la forme urbaine a fortement évolué. Des auteurs tels que M. Bréheny (fiche n°3) ont remis en question l'efficacité d'une ville compacte pour réduire les besoins énergétiques liés aux déplacements. Par ailleurs, les études récentes mettent d'avantages en évidence l'importante complexité du système énergie - forme urbaine (analyse en cycle de vie) et la nécessité d'inclure les caractéristiques socio-économiques dans l'évaluation des besoins énergétiques liés aux déplacements (voir fiche n°5).

Fiche bibliographique 2

Titre : Cities and automobile dependence: a sourcebook
Auteur : NEWMAN P., KENWORTHY J.
Année : 1989

Type de document : Livre
Nombre de pages : pp. 81-101

Résumé orienté

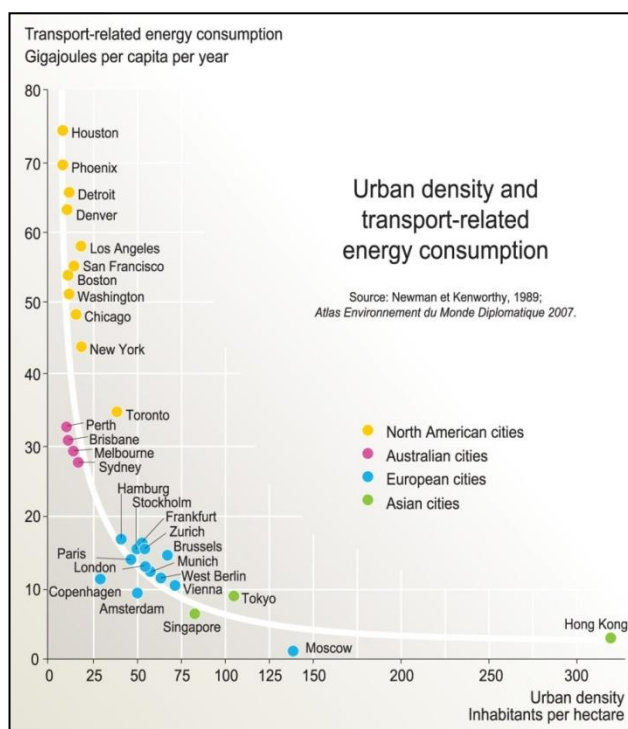
Les travaux des deux chercheurs australiens ont été très vite popularisés car ils mettent en relation de manière forte la densité des agglomérations et la consommation de carburant pour les transports de personnes. Dans les résultats, trois groupes de villes se distinguent : les villes nord-américaines et australiennes qui sont caractérisées par de faibles densités urbaines et une forte consommation d'énergie ; les villes européennes qui se démarquent par un niveau moyen de densité ainsi que de consommation énergétique ; et les villes asiatiques qui sont les plus denses et les moins énergivores.

Méthodologie

L'étude se base sur l'analyse de 37 métropoles dans le monde. Les variables prises en compte sont : les kilomètres parcourus en voiture et en transport en commun ; le taux moyen d'occupation des voitures et des transports en commun ; et une estimation de la consommation énergétique des différents modes de transports.

Intérêt de l'ouvrage pour la recherche

L'étude permet de distinguer les modèles de villes qui sont les moins consommatrices en énergie. La densité influencerait sur des choix de modalités, des distances de déplacements et des consommations d'énergie.



La critique principale qui émerge de ce genre d'étude comparative est qu'il est peu probable que les auteurs aient pu récolter des données entièrement comparables à cette échelle. De plus, la définition du périmètre des zones métropolitaines n'est pas systématique. Ainsi, ce sont des limites très hétérogènes telles que le *Los Angeles County*, le *Greater London*, la région Île-de-France, et les limites nationales de Hong Kong qui sont comparées. Les résultats empiriques obtenus sont d'une fiabilité incertaine et doivent donc être interprétés avec beaucoup de précaution. Par ailleurs, la méthodologie suivie ne tient pas compte des déplacements inter-urbains.

Pour élargir

Malgré les biais de cette étude comparative, de nombreux auteurs citent encore Newman et Kenworthy actuellement. Ces derniers ne pouvant pas prouver le contraire, ils se sont d'avantage attachés à nuancer les effets de la densité sur les consommations énergétiques (voir fiche n°4).

Fiche bibliographique 3

Titre : The compact city and transport energy consumption
Auteur : BREHENY M.
Année : 1995

Type de document : Article
Nombre de pages :

Résumé orienté

M. Breheny remet en cause le consensus jusqu'alors acquis sur le fait qu'une politique d'aménagement du territoire en faveur de la ville compacte soit un levier efficace pour réduire les consommations énergétiques liées aux transports. D'une part l'auteur met en évidence que ce sont les villes qui consomment le moins qui connaissent la plus forte décroissance. A l'inverse, les aires « urbaines » sont les plus consommatrices d'énergie et accusent de fortes croissance de population. D'autre part, deux scénarios et leurs gains énergétiques respectifs sont évalués. Le scénario « taux le plus faible » démontre que 34,0% des consommations énergétiques pourrait être épargné si toutes les régions se comportaient comme les régions métropolitaines britanniques au taux le plus faible. Dans le scénario « croissance uniforme », seulement 2,5% des consommations aurait pu être économisé si la population avait évolué de manière uniforme sur l'ensemble du territoire, et donc si la périurbanisation n'avait pas eu lieu. Il n'existe donc pas de lien simple et linéaire entre la taille de la ville et le nombre de kilomètres parcourus.

Méthodologie

-Exploitation du rapport ECOTEC (1993) pour déterminer les consommations énergétiques primaires par type de région (de la plus urbaine à la plus rurale) et par mode de transport (voiture, bus, réseau ferré, piéton, autre).

-Classement des régions en fonction de leurs consommations et mise en relation avec l'évolution de la population entre 1981 et 1991.

-Evaluation de deux scénarios « taux le plus faible » et « croissance uniforme » à travers une analyse *ex-post* comparant d'une part les consommations « réelles », et, d'autre part, les consommations « idéales ».

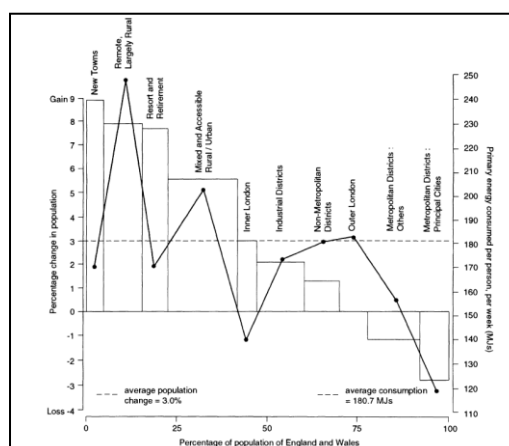
Intérêt de l'ouvrage pour la recherche

La ville compacte n'est pas l'unique modèle à suivre pour diminuer les émissions des transports car elle engendre des problèmes de congestion et nécessite des mesures draconiennes. Cependant, malgré l'apparence simpliste de la démarche, l'interprétation des résultats est claire et leur pertinence réside dans la simplicité des variables étudiées.

L'analyse à petite échelle ne tient pas compte des particularités locales des déplacements alors que bien souvent c'est à l'échelle locale que des comportements énergivores peuvent s'observer. Finalement, les hypothèses « lourdes » que fait l'auteur (non prise en compte du solde naturel dans le calcul d'évolution de la population par exemple), méritent d'être réévaluées et précisées.

Pour élargir

Dans une réponse à M. Breheny, S. Owens (1995) réagit par rapport à cet article et recentre le débat en insistant que la densité est une condition nécessaire mais non suffisante à la réduction des consommations énergétiques.



Fiche bibliographique 4

Titre: Transport and reduced energy consumption: What role can urban planning play?

Auteur: HICKMAN R., BANISTER D.

Année : 2007

Type de document : Working paper

Nombre de pages : pp 28

Résumé orienté

Avec les travaux de J. Williams, les recherches de R. Hickman et D. Banister mènent actuellement le débat sur la contribution de l'aménagement du territoire à la réduction des consommations énergétiques des transports. En croisant différentes variables territoriales qui ont une influence sur les comportements de mobilité, les chercheurs évaluent à 10% la contribution de la forme urbaine sur la consommation énergétique des transports. Ces variables comprennent par exemple : la densité, la taille, la distance au centre, le réseau de transport, le ratio emploi/habitants et l'accessibilité. Ensembles, les variables d'occupation du sol et les caractéristiques socioéconomiques permettent d'expliquer 60% de la variation de la consommation énergétique. Par ailleurs, les auteurs recommandent la prise en considération de facteurs comportementaux pour expliquer les déplacements.

Méthodologie

Le cadre de la recherche se base sur une large gamme d'études menées précédemment dans le domaine (voir figure). L'étude cherche à investiguer la problématique d'un aménagement du territoire durable dans sa globalité. Elle est essentiellement empirique. Les recherches sont effectuées dans le comté de Surrey (sud-est de Londres). L'approche teste à travers des analyses de régressions et des analyses multivariées les relations entre variables d'occupation du sol et caractéristiques socioéconomiques, ainsi que leurs effets individuels et combinés sur l'utilisation d'énergie pour les transports.

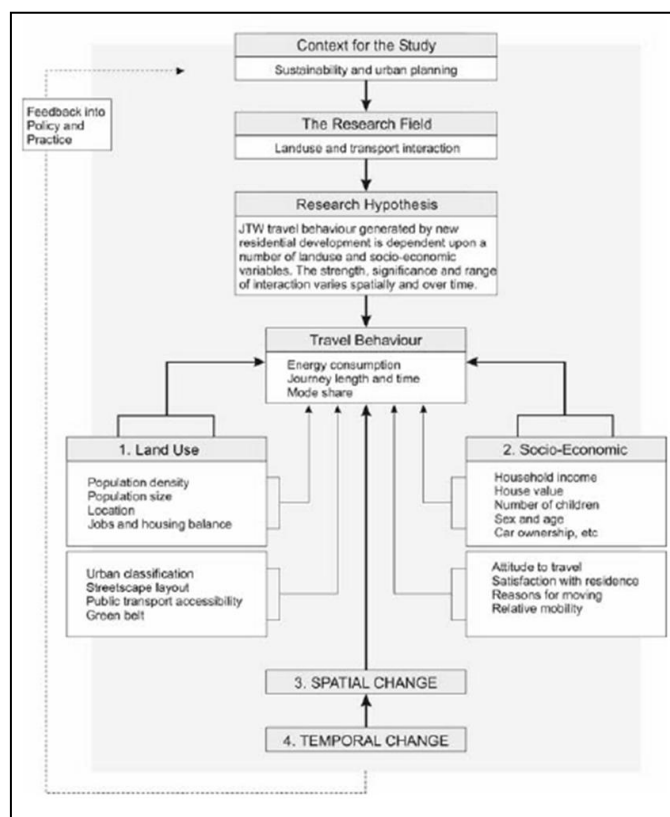
Intérêt de l'ouvrage pour la recherche

Des stratégies de "croissance intelligente" peuvent réduire les consommations énergétiques des transports via une orientation claire de la forme et de la localisation des nouveaux développements. L'analyse menée ici répond à la nécessité d'étudier les comportements de mobilité et leurs consommations énergétiques associées à l'échelle régionale.

Des effets plus importants pourraient être observés si l'échantillonnage se concentrait uniquement sur la population active.

Pour élargir

Les travaux de Hickman et Banister s'inscrivent dans la continuité de ceux de Stead (voir fiche n°5) qui met en évidence la nécessité de prendre en compte les caractéristiques socioéconomiques de la population dans l'étude des déplacements.



Fiche bibliographique 5

Titre : Relationships between land use, socioeconomic factors, and travel patterns in Britain

Auteur : STEAD, D.

Année: 2001

Type de document : Article

Nombre de pages : pp. 499-528

Résumé orienté

D. Stead complète la vision traditionnelle qui analyse les déplacements de manière simpliste à travers la relation occupation du sol - forme urbaine en considérant une dimension supplémentaire : les variables socioéconomiques. A l'échelle de la Grande-Bretagne, les variables clés qui permettent d'expliquer les déplacements de manière significative (19% à 24%) sont : le nombre moyen de voiture par personne, la proportion d'actifs, et le statut socioprofessionnel du chef de ménage. Les caractéristiques socioéconomiques typiquement expliquent environs la moitié de la variation des distances parcourues par personnes au sein de différents districts, alors que les caractéristiques de l'occupation du sol souvent n'expliquent qu'un tiers de la variation de ces distances. Par ailleurs, intégrer à la fois les variables socioéconomiques et les variables d'occupation du sol dans l'analyse de régression n'augmente pas le pouvoir d'explication de l'équation. Finalement, une très faible proportion des distances parcourues peuvent être expliquées à l'échelle désagrégée de l'individu.

Méthodologie

Les analyses de régressions se basent sur des données d'enquête mobilité de 1978/79, 1985/86, 1989/91 et 1991/93 en Grande-Bretagne, ainsi que sur des études locales sur les déplacements dans le comté de Kent et de Leicestershire. La taille de l'échantillon varie de 712 à 738 répondants. Des analyses de régressions multiples sont opérées à l'échelle régionale et individuelle.

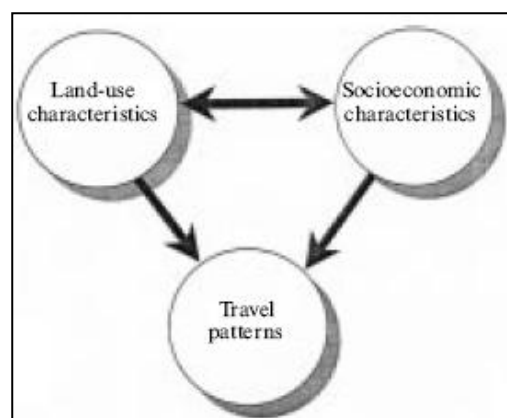
Intérêt de l'ouvrage pour la recherche

La prise en compte des caractéristiques socioéconomiques dans l'évaluation de l'impact de la structure du territoire sur les déplacements semble incontournable pour déterminer les variables structurantes qui définissent les comportements de mobilité des individus à l'échelle régionale. La fenêtre temporelle considérée et la faible variabilité des résultats au cours du temps démontrent l'importante stabilité des relations entre occupation du sol, caractéristiques socioéconomiques et déplacements. Ces derniers constituent en réalité un indicateur fiable pour évaluer les émissions du transport ainsi que l'énergie consommée par ce dernier secteur.

L'étude n'offre pas la possibilité d'établir des liens de causalités.

Pour élargir

R. Hickman et D. Banister (2007) ont par la suite développé des méthodes de régressions multivariées qui ont pour but cette fois d'établir des liens de causalités ainsi que d'intégrer les deux type de variables ainsi que leurs influences respectives (voir fiche n°4).



Fiche bibliographique 6

Titre: Introducing a commute-energy performance index for Flanders
Auteur: BOUSSAUW K., WITLOX F.
Année: 2009

Type de document : Article
Nombre de pages : pp. 580-591

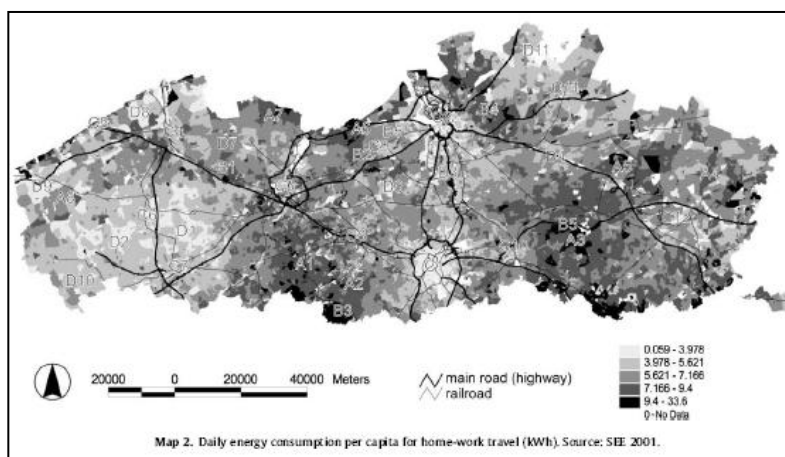
Résumé orienté

Sur base du recensement de 2001, K. Boussauw et F. Witlox cartographie pour la Flandres et Bruxelles les niveaux de consommation énergétique liés aux déplacements domicile travail. Les distances parcourues, la part modale, les infrastructures de transport et la densité de population sont pris en compte. L'analyse révèle que le choix modal a peu d'impact en termes de performance énergétique comparé à la proximité de la résidence au lieu d'emploi. La densité résidentielle à une part importante à jouer dans la performance énergétique des déplacements domicile-travail. Cependant, l'accessibilité par rapport aux réseaux de communication majeurs (autoroutes, lignes de chemin de fer) est également à prendre en considération ; une proximité aux infrastructures engendre de longs mouvements pendulaires.

Méthodologie

-Création d'un indice de « performance énergétique des mouvements pendulaires » définit comme:

$$CEP_s = \frac{D_s \cdot \sum_i \bar{E}_i \cdot c_{i,s}}{N_s}$$



CEP_s est la performance énergétique par actif pour les déplacements domicile-travail et pour un secteur statistique (s) donné, D_s le total des distances parcourues (un trajet), E_i la moyenne d'énergie consommée par passager par mode i , $c_{i,s}$ le facteur correctif pour le mode i , et N_s le nombre total d'actif.

Intérêt de l'ouvrage pour la recherche

La méthode employée identifie à une échelle fine les consommations énergétiques générées par les déplacements domicile-travail et apporte des nuances aux biens faits de la densité par rapport à la réduction des émissions de GES. Les auteurs proposent des valeurs pour la consommation énergétique spécifique des modes de transport qui, dans une certaine mesure, peut être utilisée dans le cas de la Wallonie.

Un des modes de transport de l'ESE 2001 agrège « train, tram, métro ». Les auteurs ont donc été obligés d'évaluer la proportion d'utilisateur par mode. Etant donnée la forte variation spatiale de la part modale par région, cette correction apporte une imprécision non-négligeable à leurs mesures. Par ailleurs, ils jugent le nombre de répondants de l'enquête significatif pour tous les secteurs statistiques de la Flandres. En Wallonie, de nombreux secteurs statistiques présentent une représentativité trop faible.

11. ANNEXE IV: LISTE DES VARIABLES SOCIO-ECONOMIQUES

Type de variable	Nom	Description	Echelle				Sources données	Année
			COM	AC	SS	Bâti		
Socio-économique et démographique								
1. Taille des ménages	TM1	Pourcentage de personnes seules	X	X	X		INS ESE 2001	– 2001
	TM2	Pourcentage de ménages à 2 personnes						
	TM3	Pourcentage de ménages à 3 personnes						
	TM4	Pourcentage de ménages à 4 personnes						
	TM5	Pourcentage de ménages à 5 personnes et plus						
2. Composition des noyaux familiaux	CNOYFAM1	Pourcentage de couples sans enfants	X	X	X		INS ESE 2001	– 2001
	CNOYFAM2	Pourcentage de couples avec un ou plusieurs enfants						
	CNOYFAM3	Pourcentage de parent seul (père ou mère) avec un ou plusieurs enfants						
	CNOYFAM4	Nombre d'enfants par noyaux						
3. Moyens de transport dont un ménage dispose	MTRSPTLGMT_V1	Pourcentage de logements sans vélo	X	X	X		INS ESE 2001	– 2001
	MTRSPTLGMT_V2	Pourcentage de logements avec un vélo						
	MTRSPTLGMT_V3	Pourcentage de logements avec 2 vélos						
	MTRSPTLGMT_V4	Pourcentage de logements avec 3 vélos ou plus						
	MTRSPTLGMT_V5	Nombre de vélos par logement						
	MTRSPTLGMT_MV1	Pourcentage de logements sans moto/vélocycle						
	MTRSPTLGMT_MV2	Pourcentage de logements avec un(e) moto/vélocycle						
	MTRSPTLGMT_MV3	Pourcentage de logements avec 2 motos/vélocycles						
	MTRSPTLGMT_MV4	Pourcentage de logements avec 3 motos/vélocycles ou plus						
	MTRSPTLGMT_MV5	Nombre de motos/vélocycles par logement						
	MTRSPTLGMT_VP1	Pourcentage de logements sans voiture personnelle						
	MTRSPTLGMT_VP2	Pourcentage de logements avec une voiture personnelle						

	MTRSPTLGMT_VP3	Pourcentage de logements avec 2 voitures personnelles							
	MTRSPTLGMT_VP4	Pourcentage de logements avec 3 voitures personnelles ou plus							
	MTRSPTLGMT_VP5	Nombre de voitures personnelles par logement							
	MTRSPTOCC_V1	Pourcentage d'occupants sans vélo							
	MTRSPTOCC_V2	Pourcentage d'occupants avec un vélo							
	MTRSPTOCC_V3	Pourcentage d'occupants avec 2 vélos							
	MTRSPTOCC_V4	Pourcentage d'occupants avec 3 vélos ou plus							
	MTRSPTOCC_V5	Nombre de vélos par occupant							
	MTRSPTOCC_MV1	Pourcentage d'occupants sans moto/vélocycle							
	MTRSPTOCC_MV2	Pourcentage d'occupants avec un(e) moto/vélocycle							
	MTRSPTOCC_MV3	Pourcentage d'occupants avec 2 motos/vélocycles							
	MTRSPTOCC_MV4	Pourcentage d'occupants avec 3 motos/vélocycles ou plus							
	MTRSPTOCC_MV5	Nombre de motos/vélocycles par occupant							
	MTRSPTOCC_VP1	Pourcentage d'occupants sans voiture personnelle							
	MTRSPTOCC_VP2	Pourcentage d'occupants avec une voiture personnelle							
	MTRSPTOCC_VP3	Pourcentage d'occupants avec 2 voitures personnelles							
	MTRSPTOCC_VP4	Pourcentage d'occupants avec 3 voitures personnelles ou plus							
	MTRSPTOCC_VP5	Nombre de voitures personnelles par occupant							
4. Niveau d'enseignement	NIVEDU1	Pourcentage de la population ayant complété le niveau d'enseignement primaire	X	X	X		INS ESE 2001	-	2001
	NIVEDU2	Pourcentage de la population ayant complété le niveau d'enseignement secondaire inférieur							
	NIVEDU3	Pourcentage de la population ayant complété le niveau d'enseignement secondaire supérieur							
	NIVEDU2_3	Pourcentage de la population ayant complété le niveau d'enseignement secondaire							
	NIVEDU4	Pourcentage de la population ayant complété le niveau d'enseignement post-secondaire non supérieur							
	NIVEDU5	Pourcentage de la population ayant complété le niveau d'enseignement							

		supérieur (type court, type long ou université)						
5. Revenus	REVM0Y	Revenu moyen de la population	X	X	X		IWEPS	2002
6. Age	PAO_AGE1	Pourcentage de la population active de moins de 20 ans	X	X	X		INS ESE 2001	– 2001
	PAO_AGE2	Pourcentage de la population active de 20 à 29 ans						
	PAO_AGE3	Pourcentage de la population active de 30 à 39 ans						
	PAO_AGE4	Pourcentage de la population active de 40 à 49 ans						
	PAO_AGE5	Pourcentage de la population active de 50 à 64 ans						
	PAO_AGE6	Pourcentage de la population active de 65 ans et plus						
7. Secteur d'activité	SECTACT1	Pourcentage des actifs travaillant dans l'agriculture, la sylviculture et la pêche						
	SECTACT2	Pourcentage des actifs travaillant dans l'industrie						
	SECTACT3	Pourcentage des actifs travaillant dans le bâtiment et le génie civil						
	SECTACT4	Pourcentage des actifs travaillant dans le commerce de gros et de détail						
	SECTACT5	Pourcentage des actifs travaillant dans la réparation de biens (de consommation) ou de véhicule						
	SECTACT6	Pourcentage des actifs travaillant dans le transport, l'entreposage, la communication						
	SECTACT7	Pourcentage des actifs travaillant dans l'HORECA						
	SECTACT8	Pourcentage des actifs travaillant dans les finances (banques, assurances)						
	SECTACT9	Pourcentage des actifs travaillant dans l'immobilier, la location						
	SECTACT10	Pourcentage des actifs travaillant dans les services fournis aux entreprises						
	SECTACT11	Pourcentage des actifs travaillant dans les services domestiques						
	SECTACT12	Pourcentage des actifs travaillant dans l'administration publique						
	SECTACT13	Pourcentage des actifs travaillant dans l'éducation, l'enseignement						
	SECTACT14	Pourcentage des actifs travaillant dans les organismes internationaux						
	SECTACT15	Pourcentage des actifs travaillant dans les forces armées						
	SECTACT16	Pourcentage des actifs travaillant dans la santé et l'action sociale						

	SECTACT17	Pourcentage des actifs travaillant dans d'autres services						
8. Statut socio-professionnel	STATPROF1	Chef d'entreprise sans contrat d'emploi						
	STATPROF2	Indépendant travaillant pour une personne ou une société						
	STATPROF3	Autre indépendant, profession libérale						
	STATPROF4	Chef d'entreprise sous contrat d'emploi						
	STATPROF5	Statutaire du secteur public						
	STATPROF6	Contractuel du secteur public						
	STATPROF7	Autre employé du secteur privé						
	STATPROF8	Ouvrier du secteur privé, apprenti						
	STATPROF9	Aidant (d'un indépendant)						
	STATPROF10	Personnel domestique						
	STATPROF11	Autre statut (ex : ALE)						
	STATPROF12	Sans statut						
Taux de chômage								

