

DGALN/PUCA

Responsable : **F. Ménard**

Prebat : Technologie et construction, Energie dans le bâtiment.

Marché n° P 08 23 0800066 du 13 octobre 2008.

Remis en avril 2010.

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 - Axe 1

LES GISEMENTS DU DEVELOPPEMENT URBAIN :

*Analyse quantitative à l'horizon 2050 des
consommations énergétiques et des émissions de CO2
des tissus urbains*

RAPPORT FINAL

Uteam

**Energies
Demains**

**IOSIS
Concept**

IAU

Eifer

LEMA

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

Les gisements du développement urbain : Analyse quantitative à l'horizon 2050 des consommations énergétiques et des émissions de CO2 des tissus urbains.

Responsable scientifique :

MAÏZIA, Mindjid,

Professeur, CITERES-CNRS

DIVERGENT / Université de Technologie de Compiègne, Département Génie des Systèmes Urbains,
Centre Pierre Guillaumat BP 60319, Rue du Docteur Schweitzer, 60203, Compiègne Cedex.

Tel : 03 44 23 49 64

Mel : mindjid.maizia@univ-tours.fr

Composition de l'équipe :

Organisme	Nom des membres de l'équipe
<i>Energies Demain</i>	N. HOUDANT / D. JOLITON / L. RIMMEL
<i>IOSIS Concept-Elioth</i>	R. MENARD / S. BERGE
<i>Laboratoire d'Etudes Méthodologiques Architecturales</i>	J. TELLER
<i>European Institute for Energy Research</i>	P. VIEJO GARCIA
<i>Institut d'Aménagement et d'Urbanisme de la Région d'Ile de France</i>	G. LACOSTE / H. LEROLLES

Résumé :

La première partie de ce rapport est consacrée à une analyse bibliographique dont les articles et les ouvrages abordent la question des consommations d'énergie et d'émissions de CO2 pour les secteurs de l'habitat et du transport à partir de méthodologies quantitatives.

La seconde partie du rapport est destinée à l'examen des caractéristiques énergétiques des tissus urbains. Elle propose de réaliser un bilan des besoins de chauffage et de climatisation. Le tissu urbain y est défini comme un système combinant morphologie de l'espace libre ou ouvert et propriétés constructives et architecturales du bâti qui le compose.

Il s'agit de mettre en évidence, dans la 3ème partie, le lien entre forme urbaine et déplacements et de quantifier l'impact énergétique de ce dernier. Sur la base d'un examen exclusif des déplacements réguliers de personnes, notamment des déplacements domicile –travail, cette partie tente de répondre aux questions suivantes : existe-t-il un lien entre la forme urbaine et l'offre d'infrastructures de transport et, si oui, lequel ? Quel lien entre cette offre, la forme du tissu et la mobilité des habitants d'un tissu ? Quel bilan énergétique découle de cette mobilité ?

La 4ème partie de la recherche est dédiée à la présentation du modèle prospectif pour une mise en application dans la dernière partie de ce rapport. La démarche repose sur le postulat que des liens mécaniques entre variables peuvent être construits à partir d'une ou de plusieurs corrélations empiriques observées à un instant donné (généralement en 1999 et 2006). La dernière partie de ce rapport présente, enfin, des prospectives fondées sur trois scénarios contrastés : le premier, à travers une projection tendancielle, est envisagé comme tenant lieu de référence et présuppose que les ménages poursuivent de 2006 à 2050 leur localisation dans les communes les plus attractives du point de vue de l'emploi et continuent de délaisser celles supposées ne pas l'être ; le second scénario baptisé « scénario d'éloignement » simule à l'horizon 2050 une migration des ménages vers des communes dont les mobilités quotidiennes se réalisent à des distances moyennes de l'emploi de plus de 10 km ; enfin, un troisième scénario, à l'inverse du second, quantifie les effets sur les consommations d'énergie finales et primaires, sur les émissions de Co2 des secteurs de l'habitat et des transports et sur l'occupation de l'espace, des migrations résidentielles vers les communes situées à moins 10 km de l'emploi.

Abstract :

This report is divided into 5 parts: State of art focuses on quantitative researches and issues relating to urban form, housing and transport energy consumptions and CO2 emissions. The second part presents heating and cooling consumptions of 18 types of urban fabrics. Urban fabric is defined here as a combination of outdoor space arrangement and architectural features. Third part tries to establish links between urban form, commuting and energy consumptions in transport sector. One develops here transport model of commuting travels including collective transport systems. The fourth part describes forecasting model and hypothesis of simulations that are applied in the last part of this scientific report. One insists in this part on empiric relationships between variables. The last part presents results of 3 kinds of simulations: trend projection until 2050 of 2000-2006 residential migrations, location of housing at more and at less than 10 kms to employment. Urban land-use is analyzed through artificialisation and urban fabric continuity and discontinuity.

I. SOMMAIRE

I. Sommaire	7
II. Objectifs de la recherche et contexte scientifique.....	9
III. Forme urbaine, bilan de chauffage et de climatisation	33
IV. Forme urbaine, transport et mobilité quotidienne des ménages	59
V. Hypothèses, structure du modèle de prospective	83
VI. Prospective à l'horizon 2050	137
VII. Bibliographie	157
VIII. Tables	167
IX. Annexes	173

II. OBJECTIFS DE LA RECHERCHE ET CONTEXTE SCIENTIFIQUE

[¹]

1. RAPPEL DES OBJECTIFS DE LA RECHERCHE

1.1. CONTEXTE ET PROBLEMATIQUE

Les gestes technologiques à envisager à l'échelle du bâtiment dans le but d'atteindre le facteur 4 (F4) à l'horizon 2050 sont relativement connus ; l'examen de l'état de l'art relatif à ce domaine (cf. bibliographie page 157) permet d'affirmer que la connaissance y est bien plus avancée que pour son équivalent à l'échelle urbaine (dans la limite où l'on pourrait parler de « gestes » urbains). Or, considérer la question de la réduction des émissions dans le secteur résidentiel et tertiaire en se focalisant exclusivement sur le bâtiment (notamment neuf) est forcément réducteur : on nie ainsi le faible taux de renouvellement du parc existant, on risque de favoriser des solutions en sites isolés fortement consommatrices d'espace foncier, de négliger les effets reportés sur les secteurs connexes (principalement les transports), bref, de délaissier les effets systémiques au point de prendre à contre-pied les objectifs initialement fixés.

Cette absence d'analyse systémique contribue à encombrer le débat de diverses controverses liées aux dynamiques urbaines en cours : à titre d'exemple, on peut se demander s'il existe des possibilités de compensation déplacements/logements (par exemple, grâce à la solarisation des toitures en périurbain pour la recharge de petits véhicules électriques) ; le BEPOS est-il de préférence périurbain ? Les possibilités d'atteindre le facteur 4 sont-elles équivalentes pour tous les ménages, indépendamment de la localisation du logement ? Etc.

La recherche devrait apporter des éléments quantitatifs de réflexion et de clarifier les débats sur les leviers actionnables par des politiques urbaines de réduction des consommations et des émissions de gaz à effet de serre (GES).

Nombre d'études auxquelles ont participé plusieurs membres de l'équipe constituée à l'occasion de cette recherche, ont montré comment et combien des actions technologiques sur le bâtiment pouvaient réduire significativement les consommations énergétiques pour chacun des postes de l'habitat et induire une décroissance de leur corollaire en termes d'émission de GES - principalement de CO₂- (Energies Demain, M. Maïzia, Elioth). Dans le secteur des transports, la connaissance des consommations et des émissions de GES à l'échelle du véhicule (R. Jourard) comme à l'échelle de l'ensemble de la mobilité (J.P. Nicolas) est également assez avancée même si l'on peut déplorer son faible degré de spatialisation. Le croisement entre le secteur résidentiel et celui des transports a été également tenté à travers la quantification de la part dans les émissions de GES de la localisation des lieux de résidence dans l'espace urbain (ETHEL).

¹ L'ensemble de ce chapitre a été rédigé par M. MAIZIA et C. SEZE.

Néanmoins, la dimension urbaine, dans le sens où celle-ci dépasse la simple somme des bâtiments et des infrastructures de transport, n'a jamais, tout au moins en France, vraiment été examinée (encore moins d'un point de vue quantitatif). Il s'agit ici de déterminer les modalités de développement urbain et les quantités associées qui pourraient permettre d'atteindre –ou seulement d'approcher- la cible F4 dans le domaine croisé du bâtiment/transport (dépenses énergétiques et émissions directes des ménages dans ce qui relève de l'aménagement urbain).

Amorcer cette recherche par une analyse quantitative paraît indispensable puisque elle devrait permettre d'identifier les masses en jeu et de hiérarchiser plus aisément le poids de chacun des leviers (variables) disponibles dans la réduction des GES. C'est dans un tel cadre méthodologique que la dimension urbaine sera décrite au moyen de variables en nombre limité afin de supporter le jeu de la modélisation. On entendra donc par dimension urbaine, dans ce rapport de recherche, le croisement de trois composantes :

-le bâtiment sera considéré comme un élément constitutif d'un ensemble morphologique plus large. Le bâtiment sera toujours inscrit dans un tissu relativement vaste ; cette inscription permettant de mesurer combien la mitoyenneté, la compacité, etc., du tissu agit sur les consommations énergétiques (on entend ici les consommations liées à l'exploitation des logements et aux déplacements en voitures particulières), et d'identifier les gisements (en termes d'économie comme en termes de ressources) disponibles et directement exploitables ; la structuration de cet ensemble permettra d'établir les bilans énergétique et d'émission de CO₂ des tissus urbains ;

-Les services et l'emploi offerts aux ménages tant du point de vue de l'intensité que des modalités de desserte. Même s'il ne s'agit pas d'établir un bilan énergétique et émissif d'autres secteurs que ceux concernant directement les consommations des ménages (notamment du tertiaire) ; l'introduction de ces éléments permettra de décrire sous un jour « fonctionnel » les tissus urbains. Ces éléments s'articuleront avec la problématique des déplacements, déplacements qui seront définis par leur lien direct avec les modes d'urbanisation et la répartition des différentes fonctions urbaines dans l'espace (zoning ou espaces plurifonctionnels). La notion de fonctionnalités sera approchée indirectement à travers la distance moyenne de déplacement. On présupposera qu'une distance moyenne faible implique une mixité fonctionnelle forte du territoire relativement aux portées des déplacements quotidiens en voiture particulière. L'absence de base de données relative aux fonctions des tissus urbains nous a contraint, à regret, d'adopter ce raccourci méthodologique.

La combinaison de ces dimensions, destinées à la détermination des leviers pertinents dans la dynamique du développement urbain, permet ainsi de construire d'un point de vue statique une typologie « morpho-fonctionnelle » des tissus urbains, un type étant construit à partir d'un jeu de modalités de chacune des variables retenues (ce que nous appellerons dans le chapitre IV « modèle de commune »). A chacun de ces types correspond un niveau de consommation, d'émission, de potentiel de réduction (économie d'énergie), de gisements en termes de ressources, d'espace urbanisable disponible, etc. Citons par exemple, le type morpho-fonctionnel du tissu compact, central, pourvu de nombreux services de proximité, de transport en commun, etc., en « opposition » au type discontinu, peu compact, dominé par un habitat individuel peu dense, etc.

1.2. OBJECTIFS DE LA RECHERCHE

- a) Objectif principal : établir des bilans énergétiques intégrant la dimension urbaine et réaliser une prospective à l'horizon 2050

Cette recherche vise à répondre aux questions suivantes : quelle est la part de chaque type morpho-fonctionnel dans le bilan global des consommations énergétiques et des émissions à l'échelle nationale pour les secteurs résidentiels et les déplacements induits ? Que deviendraient ces consommations et ces émissions si les types d'urbanisation dominants se poursuivaient ? Et si l'un d'entre eux devenait dominant ? Quels sont les leviers disponibles à l'échelle urbaine pour stabiliser ou infléchir des tendances d'accroissement ? Quel scénario de développement urbain pour atteindre le F4 dans le résidentiel et les transports ?

Répondre à ces questions revient à identifier, d'un point de vue dynamique, comment l'organisation urbaine, agit, à l'échelle temporelle de 2050 et à l'échelle spatiale nationale, sur la part dans la consommation d'énergie et les émissions de GES de l'habitat et des transports.

La méthodologie sera inscrite dans une démarche prospective à l'horizon 2050 dont il faut rappeler les principaux objectifs : la prospective doit être entendue comme la représentation de possibles et ne doit nullement être confondue avec la prévision, encore moins avec la prédiction. Ces possibles représentent des univers atteignables dans le cadre de scénarios envisagés et envisageables. Les conditions de leur réalisation (comment mettre en œuvre ces scénarios) ne seront pas explicitement énoncées. Cela étant dit, l'étude veillera à les caler sur des variables dynamiques exogènes à partir d'une prise en compte rigoureuse des tendances lourdes de l'évolution démographique, de l'amélioration des rendements des équipements techniques, etc. Des vérifications statistiques sur les évolutions antérieures des mouvements à l'intérieur du parc de logement, des durées et des longueurs des déplacements, de l'évolution de la tache urbaine, etc., seront réalisées afin d'introduire une analyse rétrospective remontant à au moins un quart de siècle.

- b) Objectifs secondaires : construire une base de données nationale des formes urbaines

Le parc de logement est relativement bien connu en tant qu'ensemble d'entités individuelles et isolées. Les principales bases de données décrivent ce dernier à l'échelle nationale avec une précision suffisante lorsqu'on réalise des bilans globaux. Or, ces bases de données ne possèdent aucun attribut urbain (par exemple, un descripteur relatif au type de voisinage du logement) permettant d'isoler les effets de ce dernier sur les consommations. L'introduction de ce type d'attribut a déjà été tenté (cf. M.Maïzia, Clip N°18) grâce à des croisements d'autres bases de données (notamment Corine Land Cover de l'Institut Français de l'Environnement –IFEN) et de « dire d'experts ». Mais ces tentatives n'ont pas fait l'objet d'une validation statistique substantielle et il serait heureux de poursuivre cet exercice afin de mieux décrire et de mieux connaître le parc dans sa dimension urbaine.

A travers la mise en œuvre de cette recherche, on a ainsi pu construire une base de données du parc de logements intégrant cette dimension primordiale dans les enjeux auxquels devront faire face, à l'horizon 2050, la collectivité et les ménages.

1.3. LES ETAPES DE LA RECHERCHE

La recherche est ici structurée selon deux modes d'organisation : d'une part, on a procédé à un découpage des tâches entre équipe concernée par un domaine d'expertise et, d'autre part, par des tâches intégratives réalisées collectivement, grâce à un comité de pilotage, dans le but d'harmoniser la modélisation et d'assurer une chaîne de calcul cohérente.

Cette recherche se divise en trois grandes étapes dont chacune a été subdivisée en tâches :

a) ETAPE A : Structuration préliminaire du modèle

Construire une typologie morpho-fonctionnelle des tissus urbains : cette phase de l'étude a eu pour objectif de construire une base de données fiable en comparaison à ce qui existe déjà à l'échelle nationale. Cette étape a été décomposée en trois tâches :

Tâche A1 : *Constitution du système de variables relatives à la dimension urbaine.*

-Construire un ensemble de variables urbaines envisagées comme « impactant » les consommations d'énergie et les émissions de CO2 directes des ménages. Cet ensemble concerne les deux volets évoqués plus haut (morphologique et fonctionnel) et est établi à une échelle pertinente (du quartier à la commune) prise comme conventionnelle. Cette élaboration a été confiée au comité de pilotage de la recherche. Elle aborde les questions de morphologie du bâti et des mitoyennetés, d'insulations, de distances aux services et à l'emploi, de caractéristiques de l'enveloppe du bâti, du profil moyen d'usage des bâtiments, des apports internes, de la perméabilité à l'air et de système de renouvellement d'air, etc.

Tâche A2 : *Construction de l'échantillon de tissus urbains*

-Constituer un échantillon représentatif selon cette typologie urbaine et formaliser une base de données à l'échelle nationale. Rechercher des relations empiriques/théoriques entre ces tissus urbains et la composition de leur parc résidentiel et des modalités de déplacement. Ces relations ont été employées par la suite pour une ventilation des types morpho-fonctionnels vers le RGP.

Tâche A3 : *Modèle dynamique de parc intégrant la dimension urbaine*

-Le modèle dynamique de parc établi par LTMU/UTC (cf. ETHEL en bibliographie) a été enrichi ici de variables relevant de l'échelle urbaine et modifié grâce au RGP 2006. Ce modèle théorique intègre les mouvements inhérents au parc (sortie, entrée et vacance des logements) à deux horizons temporels 2030 et 2050. En outre de la formalisation de la demande de logements neufs corrélée au jeu des soldes à l'intérieur du parc et aux évolutions démographiques, on a veillé à intégrer au modèle les diverses modalités d'occupation du sol observées rétrospectivement

(notamment à l'échelle nationale à partir des analyses de l'IFEN et à l'échelle régionale à partir du MOS de l'IAURIF).

b) ETAPE B : Bilan statique des consommations d'énergie et des émissions de CO2 des tissus urbains à l'échelle nationale

Réalisations d'un bilan énergie/CO2 pour chacun des types de tissu urbain : trois types de calcul énergie/CO2 ont été réalisés en parallèle :

Tâche B1 : *Calcul du bilan énergie/CO2 des bâtiments selon la typologie morpho-fonctionnelle des tissus urbains*

-Les besoins énergétiques de chauffage et de climatisation ont été calculés pour chacun des logements à l'intérieur de chaque classe de tissu urbain. Ces calculs ont été réalisés à partir des modèles développés par les membres de l'équipe (notamment ENERTER et CLIMELIOTH).

Tâche B2 : *Détermination des ressources énergétiques propres aux tissus urbains*

-Les gisements énergétiques en termes de ressources disponibles dans les espaces urbains exploitable par des dispositifs de type EnR ont été quantifiés : il s'agit principalement de solaire convertible en énergie thermique et/ou électrique.

Tâche B3 : *Bilan énergétique et émissions de CO2 des déplacements induits par type de tissu urbain*

-On la réalisé dans un troisième temps un bilan énergie/CO2 des déplacements en fonction des variables fonctionnelles (réduites à la portée moyenne des navettes domicile-travail) des tissus urbains identifiées dans l'étape A (tâche A1).

Tâche B4 : *Relation théorique/empirique entre la dynamique de l'occupation du sol et celle du parc*

-On la établi le lien entre ces « lois » urbaines et les consommations du parc de logements typifiés selon les modalités d'entrées du RGP. Un travail analogue a été réalisé pour les consommations et les émissions de CO2 induites par les déplacements hors longues-distances.

-On a procédé ensuite à la ventilation de la typologie urbaine à l'intérieur du RGP en veillant à caler les quantités énergétiques à l'échelle nationale.

Tâche B5 : *Mise en place d'un système de relations entre consommations énergétiques et émissions de CO2 et dimensions urbaines*

-Construction d'un système de relations entre consommations/CO2 par poste par type urbain morpho-fonctionnel : l'élaboration des bilans énergie/CO2 pour chaque type de tissu a permis d'établir des relations entre les consommations/émissions des ménages (logement et transport) et le jeu de variables décrivant chaque type de tissu. Cette phase cruciale, a permis de construire un modèle intégré pouvant être généralisé à l'ensemble du parc du RGP.

Tâche B6 : Construction du modèle intégré dynamique urbaine

-Le couplage de l'ensemble des modèles développés pour les étapes A et B a été réalisé afin de construire un système intégré modélisant les dynamiques urbaines à l'horizon 2050. Ce travail, articulé au modèle ENERTER, ainsi qu'à la simulation dynamique du parc a permis de quantifier avec une précision substantielle les consommations et les émissions de GES pour le secteur résidentiel. Le couplage au modèle COPERT a permis de quantifier les mêmes éléments pour les transports.

c) ETAPE C : Prospective et élaborations de scénarios de développement urbain.

La dernière étape de l'étude a consisté à explorer des scénarios prospectifs de consommations et d'émissions de CO2 directement liées aux ménages. En d'autres termes, il s'est agi d'établir des scénarios de développement urbain au regard des enjeux de localisation des ménages.

Tâche C1 : Scénario référence

-Il s'agit du scénario le plus difficile à mettre en œuvre. En effet, un scénario « zéro » sert de repère ou de référence pour les autres. Cette tâche a consisté à isoler les effets du développement urbain sur les consommations et les émissions directes des ménages des autres effets propres aux tendances lourdes (démographiques principalement) et/ou des leviers technologiques à l'échelle du bâtiment ou des modes de transport. Ce scénario a été conçu collectivement au sein du comité de pilotage de la recherche.

Tâche C2 : Scénario étalement urbain/concentration urbaine

-Ce scénario repose sur la poursuite de l'étalement urbain observé depuis un quart de siècle. Il permet de déterminer l'écart quantitatif entre l'exacerbation de l'étalement urbain et une concentration extrême et volontariste de l'urbanisation.

Tâche C3 : Scénario F4

-On a proposé dans cette phase quelques scénarios de développement urbain susceptibles d'atteindre le F4 dans le secteur du bâtiment et des transports. Ces scénarios cherchent en priorité à mobiliser les leviers disponibles à l'échelle urbaine, puis, le cas échéant, font appel aux leviers technologiques disponibles à l'échelle du bâtiment ou des modes de transport.

Tâche C4 : Communication des résultats web/validation

-Les principaux résultats de la recherche seront prochainement consultables à partir d'une plateforme web. Ils concernent des scénarios urbains présentés à l'échelle régionale.

Tâche C5 : Synthèse et présentations des principaux résultats

-Un séminaire de synthèse, au cours duquel les principaux résultats de l'étude et une présentation de l'outil seront présentés, sera organisé pour clôturer la recherche. Ce séminaire sera organisé en collaboration avec le PUCA. Vu la richesse des résultats-clés dans ce rapport, nombre de

publications collectives dans des revues internationales à comité de lecture sont envisageables. Deux communications internationales avec actes sont déjà prévues.

L'ordonnement de ces tâches ne se retrouve pas directement dans le plan adopté dans ce rapport de restitution. En effet, afin de faciliter la lecture, nous avons préféré présenter les résultats de cette recherche selon un fil logique partant des considérations les plus méthodologiques aux résultats induits par les diverses simulations. Le lecteur trouvera en annexes des détails calculatoires.

2. ETAT DE L'ART : LA FORME URBAINE ET SON COROLLAIRE ENERGETIQUE

2.1. OBJECTIFS DE L'ETAT DE L'ART ET METHODE BIBLIOGRAPHIQUE

L'état de l'art a ici pour objectif de dresser un bilan synthétique des différentes recherches mettant en relation ville et consommation d'énergie et émissions de CO₂. Le but de cette partie est double : présenter un aperçu de la connaissance acquise dans le domaine et positionner notre recherche dans le paysage scientifique international, notamment en ce qui concerne la méthodologie et la scénarisation que l'on adoptera en termes prospectifs dans la dernière partie de ce rapport. Cette localisation dans le champ scientifique est suffisamment large d'un point de vue disciplinaire et temporel (de la fin des années 80, période pendant laquelle s'est amorcé le débat environnemental sur la ville, jusqu'à nos jours) pour que le lecteur situe assez précisément la nature des développements des divers chapitre de ce rapport.

Il convient avant tout de préciser les termes clés qui encadrent la recherche bibliographique. Sachant que l'étendue des articles et des ouvrages abordant la question des consommations d'énergie et d'émissions de CO₂ pour les secteurs de l'habitat et du transport est extrêmement large, il a été retenu ici, au regard de nos choix méthodologiques, les seuls travaux qui mobilisent des méthodes quantitatives.

L'entrée sur laquelle se focalise ce travail d'analyse de l'état de l'art est bien entendu la forme urbaine. Il faut entendre ce terme dans toute sa polysémie. On parle parfois de type urbain à l'image des analyses typo-morphologiques même si nous puiserons peu dans ce corpus scientifique². En effet, la littérature sur la forme urbaine sous-entend généralement trois niveaux d'analyse : la morphologie physique des tissus (leur géométrie et la typologie architecturale), la morphologie des tracés (leur géométrie et leur topologie) et la morphologie de l'espace social³ (la

² Les nombreux travaux concernant la forme urbaine, dans sa dimension géographique et architecturale, sont largement représentés par la bibliographie de l'ISUF (International Seminar on Urban Form). Il n'est pas utile ici de la développer vu l'importante production réalisée sur ce thème depuis les années 1950.

³ Qualité (la) de la forme urbaine. Problématiques et enjeux.- Albert Levy. Dans cet ouvrage, la définition de la morphologie urbaine est complétée de « la morphologie de l'espace bioclimatique, et la morphologie de l'espace plastique ». Nous ne prendrons pas en compte ces dimensions dans notre étude.

structure sociale autant que les usages). Ce dernier aspect, même s'il n'est jamais absent de notre développement, ne sera pas examiné de manière explicite.

Afin de faciliter la lecture d'ensemble et la comparaison de tous ces travaux, nous nous sommes contraints à examiner la littérature conformément à la grille d'analyse suivante :

- Secteur concerné (habitat, transport ou les deux secteurs pris simultanément)
- Objectif de l'étude ou de la recherche
- Échelle et nature de l'objet d'étude (selon la sémantique de la notion de forme urbaine)
- Méthodologie et type de modélisation
- Types de variables retenues
- Principaux résultats produits

Ce découpage permet de décomposer les recherches sous une forme standardisée afin de faciliter les comparaisons bibliographiques.

Une synthèse de chacune des composantes de cette grille de lecture permettra dans un premier temps d'envisager l'étendue des connaissances produites dans le domaine de la recherche urbaine, notamment pour les secteurs de l'habitat et des transport.

2.2. DE LA DENSITE A L'ORGANISATION FONCTIONNELLE DES TERRITOIRES URBANISES

Steadman, 1979, semble être le premier auteur à prendre en compte simultanément les questions de transport et d'habitat. Son point de vue théorique relatif à l'aménagement urbain concerne déjà la forme de la ville et sa densité. Son attention se porte d'avantage sur les consommations d'énergie par les secteurs du transport, des commerces et du logement que celles de l'industrie, car cette dernière est prise comme indépendante de la forme physique de l'espace urbain. Il suppose qu'une densité urbaine élevée devrait minimiser les besoins énergétiques du secteur des transports tout en contribuant à alourdir les factures énergétiques des bâtiments (à cause notamment de besoins en éclairage et en rafraîchissement plus importants en raison de la rareté des gisements solaires induits par la densité). Hui, 2001, explique que l'inverse est également vrai et qu'un aménagement urbain peu dense contribuerait à un rendement énergétique plus intéressant grâce aux gains solaires mais au prix d'une plus grande dépense d'énergies consacrée au transport.

Mais, dès les années 1980, la densité n'est déjà plus un indicateur exclusif pour Steadman. En s'appuyant sur les premières théories de formes urbaines de Lionel March, l'auteur démontre qu'une organisation urbaine peut, pour une même densité, relever de formes physiques totalement différentes. Ainsi un développement urbain le long d'axes majeurs ou selon une configuration en grille, peut posséder la même densité qu'une organisation radiale autour d'un centre et induire des bilans énergétiques, notamment pour des raisons d'éclairage, de ventilation naturelle ou d'apports solaires, très contrastés.

A l'instar de la polysémie de la forme urbaine, la recherche relative aux performances énergétiques des espaces urbains est extrêmement hétérogène tant dans les objets qu'elle examine que dans

les échelles qu'elle appréhende. L'échelle varie généralement en fonction du secteur concerné : les travaux scientifiques relatifs à la mobilité envisagent le plus souvent le périmètre spatiale des analyses à travers celui de l'agglomération ou de la métropole, voir de la région, tandis que ceux relatifs à l'élaboration de bilans énergétiques du bâti se limitent à des échelles plus réduites allant du bâtiment au quartier. La définition donnée à la forme urbaine est alors tributaire de l'échelle considérée. Citons à titre d'exemple le projet SOLUTION, Mitchell, 2005, relatif aux effets environnementaux du développement urbain à partir d'une définition de la forme fondée sur une classification fonctionnelle de l'occupation du sol, de la localisation des activités dans l'espace géographique les unes par rapport aux autres, et de la densité construite. Le tableau suivant illustre les niveaux de besoins énergétiques en fonction de ces nombreux descripteurs de formes urbaines et des échelles afférentes.

Tableau 1: Variables de formes urbaines et échelles

Variabes	Region	Aire urbaine	Quartier	Bâtiment
Structure de l'aire urbaine (taille et étendue)	x			
Réseaux entre les aires urbaines	x			
Taille de l'aire urbaine	x	x		
Forme de l'aire urbaine (circulaire, linéaire...)	x	x		
Réseau à l'intérieur de l'aire urbaine	x	x		
Densité		x	x	
Répartition des activités, occupation du sol		x	x	
Degré de centralisation des équipements		x	x	
Plan			x	
Orientation du bâti et groupe de bâti			x	x
Implantation relative au microclimat				x
Conception				x

Source : G.Mitchell, d'après Owen.S, *Energy Planning and Urban Form*, Pion, Londres, 1986.

Ce type de définition vectorielle, fondée sur une compilation d'indicateurs urbains très hétérogènes, est assez représentatif des recherches quantitatives sur le sujet. On la retrouve appliquée à des territoires aussi divers que le Chili (Cortès et al), le Brésil (Rodriguez Da Silva et al), le Royaume-Uni (Steadman, Breheny, Steemers), la France (Pouyanne, Vanco), les Etats-Unis (Ewing, Khan), le Japon (Shimoda, Mizuno) ou l'Indonésie (Permana).

a) De la densité à la compacité des espaces de mobilité quotidienne :

Le débat sur l'impact énergétique de la forme urbaine s'intensifie et prend de l'ampleur (et se poursuit aujourd'hui encore) avec la question de la densité et des processus de densification. L'établissement par Newman et Kenworthy, 1989, de bilans annuels individuels (par personne) des

consommations d'énergie consacrées à la mobilité et au bâtiments de plusieurs capitales et grandes villes, permet de distinguer des modèles de villes plus ou moins énergivores. La construction de ce bilan conduit, empiriquement, à l'établissement d'une relation négative entre densité et consommation d'énergie tant au niveau interurbain qu'intra urbain. La densité serait le paramètre le plus opérant sur les choix modaux de déplacement, sur les distances parcourues et sur les consommations d'énergie connexes (Banister et al., 1997). La densité agirait directement sur l'usage de l'automobile et, couplée au mode de conduite et aux habitudes de mobilité, sur la consommation de carburant. Une réduction de la densité de 1000 logements/ha conduirait ainsi à une augmentation des distances parcourues par ménage et par an de l'ordre de 2000 km (soit 4,8%) et de consommation de carburant d'environ 300 litres (soit 5.5%) (Brownstone et al, 2008). Si certains travaux ont tenté d'assoir l'idée que la ville dense pouvait être considérée comme la configuration de la ville la plus économe (économie des sols non-urbanisés, des coûts d'urbanisation et d'énergie, réduction des émissions de polluants, Naess, 1996), on repère très tôt une production scientifique contestant leurs conclusions (Gordon, Richardson, 1989). Breheny en 1995 et Gordon et Richardson de nouveau en 1996, désapprouvent l'idée que la ville compacte est l'unique modèle permettant de diminuer les émissions de polluants, et ce à cause des effets de congestion qu'elle engendre et des mesures draconiennes que la diffusion d'un modèle fondé sur de fortes densités imposerait. Ces recherches tentent de démontrer que la multipolarisation du territoire peut également réduire les distances de déplacements (Breheny, 1995). Une « concentration décentralisée » serait, pour ces contradicteurs de la densité stricto sensu, un modèle de développement urbain plus efficace pour réduire les déplacements automobiles (Jenks et al, 1996). Owen recentre le débat un an après en démontrant qu'une forte densité est une condition nécessaire mais non suffisante pour voir décroître significativement la mobilité en voiture particulière.

D'un point de vue strictement analytique, la contestation d'une approche fondée sur la densité vue comme unique descripteur de la forme urbaine revient à élargir le nombre de déterminants des consommations d'énergie à l'échelle urbaine, en y intégrant des indicateurs notamment socio-économiques ou fonctionnels, bien plus pertinents, dotés d'un meilleur pouvoir explicatif du point de vue des comportements de mobilité. Mindali et al., 2004, proposent ainsi d'étudier le lien entre densité et consommation de carburant à partir des données de Newman et Kenworthy en y joignant des variables relatives à la structure fonctionnelle du sol. L'auteur démontre qu'il n'y a pas d'effet direct de la densité urbaine sur les consommations d'énergie mais, avec plus de nuances, qu'il existe des relations indirectes entre consommation d'énergie et d'autres aspects de la densité : la densité d'emploi dans la ville-centre et les centres tertiaires se révèle ainsi être un facteur déterminant dans la diminution des consommations d'énergie du transport dédié à la mobilité quotidienne. La forte corrélation négative entre consommations d'énergie et taux d'utilisation des transports en commun couplée à la corrélation positive entre ce dernier et la densité d'emploi dans les centres, plaide en faveur des parcours radiants des trajets domicile-emploi. En France, les conclusions de Fouchier vont dans un sens assez similaire. Selon l'auteur, une forte densité de population peut induire une augmentation de l'usage des modes de transports alternatifs à la voiture mais seulement pour des déplacements réguliers du type domicile-travail : l'effet de la densité demeure assez faible pour les déplacements de banlieue à banlieue et/ou pour des motifs de déplacements autres que celui du travail.

Dans le même sens, Rodrigues da Silva et al., 2007, dans leurs travaux réalisés pour 27 capitales régionales brésiliennes et 184 villes majeures de la région de Sao Paulo, mettent en corrélation statistique les niveaux d'émissions de CO₂ avec des variables de morphologie urbaine, principalement la densité et la compacité, combinées à des variables socio-économiques assez classiques dans le domaine des transports (revenu, niveau d'instruction et catégorie socioprofessionnel). L'étude des capitales régionales met en évidence que la densité, tout comme la configuration de la croissance urbaine, ont un impact direct sur la consommation d'énergie, alors que l'analyse des 184 villes moyennes de Sao Paulo, montre que le poids des formes urbaines est plutôt inférieur à celui des caractéristiques socio-économiques des ménages.

Marquez et al., 1999, modélise grâce à TRANPLAN la qualité de l'air de 4 modèles de développement urbain. Si la finalité de l'étude ne consiste pas en une comptabilité strictement énergétique mais plus largement environnemental, la méthodologie permet de disposer d'un bilan relatif aux comportements de mobilité. Les configurations de dynamique urbaine analysées sont alors les suivantes :

- *Le développement compact* : soit une augmentation du nombre de logements et de la densité de population dans le centre et la première couronne qui supposeraient réduire l'étalement urbain
- *Le développement polycentrique* : soit une forte densité dans différents pôles, centres secondaires autour de l'aire métropolitaine qui ont les caractéristiques de centres tertiaires (CBD). Ces centres seraient alors indépendants avec une certaine concentration d'emplois, de commerces et de loisirs ; ils seraient accessibles par des voies radiales (réseau ferré, avenues, voies rapides, autoroutes)
- *Le développement en corridor* : soit un développement qui émanerait de la première couronne et s'étalerait le long des réseaux majeurs
- *Un développement au fil de l'eau* : soit un développement qui poursuivrait la tendance actuelle en termes de croissance urbaine

Tableau 2 : *Bilan environnemental en fonction des tissus urbains*

Scénario de développement	Emissions de CO2	Consommation de carburant	Distances parcourues	Durée des trajets
Compact	++++	++++	++++	++++
Polycentrique	+++	+++	+	+++
Corridor	++	+	+++	+
Fil de l'eau	+	++	++	+

Les résultats du modèle TRANPLAN appliqué à ces diverses configurations vont plutôt en faveur de la ville compacte mais montrent également une certaine efficacité environnementale de la ville polycentrique.

b) De la densité à l'organisation fonctionnelle des territoires

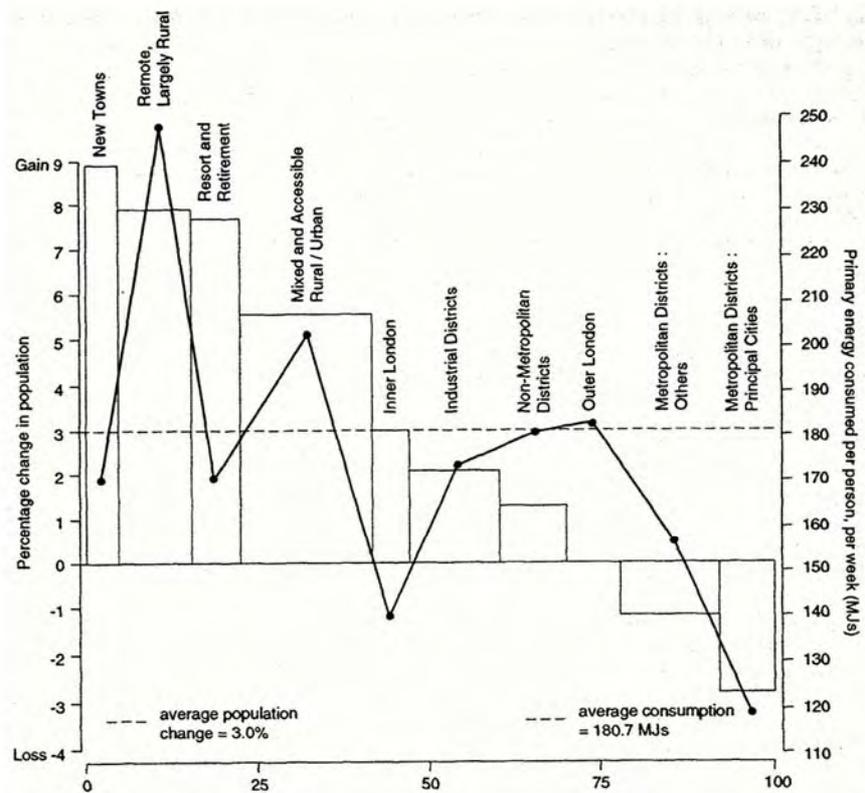
Autre variable pouvant peser sur les déplacements : l'ampleur démographique des aires urbaines analysées (nombre d'habitants et d'actifs). A l'instar de Gordon et al., 1997, n'observant quasi aucune corrélation entre la taille de la population et les choix modaux de déplacements, le rapport ECOTEC de 1993 au Royaume-Uni montre que les grandes villes (de plus de 250 000 habitants) sont plutôt associées à de faibles distances de déplacement et à un recours restreint à la voiture particulière. Williams, 1998, ajoute que la taille de ville la plus performante du point de vue des transports serait celle dont la taille varierait entre 25 et 100 000 habitant ou dépasserait 250 000 habitants.

Précision ici que Breheny, 1994, se fonde sur les résultats d'ECOTEC pour développer une méthodologie intéressante à plusieurs titres, notamment par la notion de « types urbains » construite à partir des données du Bureau des enquêtes et recensements de la population de 1993-1994. Cette enquête permet en effet de distinguer 10 types de ville à la manière des unités urbaines de l'INSEE :

- Londres intérieur
- Londres extérieur
- Aire métropolitaine : villes principales
- Aire métropolitaine : autres villes
- Aire non métropolitaine : villes
- Aires industrielles
- Nouvelles villes
- Villes balnéaires et de villégiatures
- Aires « rurbaines »
- Zone rurale étendue et isolée

Breheny, 1994, prolonge le rapport ECOTEC de 1993 pour déterminer les consommations d'énergie primaire par type urbain et par mode de transport (voiture particulière, bus, transport ferré, marche à pieds). Cette modélisation permet de classer les types urbains selon leur niveau de consommation et de rapporter ces derniers à la structure démographique observée dans chaque type d'unité urbaine. Il constate ainsi que la population des villes principales des grandes aires métropolitaines représente moins de 10% de la population totale, qu'elles connaissent la plus forte décroissance et enfin, qu'elle consomme le moins d'énergie primaire. A l'inverse, la population des aires « rurbaines » représente plus de 25% de la population totale du pays, et se retrouve en seconde position dans le classement des types les plus consommateurs et en quatrième place de ceux qui connaissent une croissance de population.

Figure 1 : Répartition de la population et consommation d'énergie en fonction des tissus urbains.



Source : Breheny Michael "The compact city and transport energy consumption"

Au-delà de la densité, de nombreux travaux se consacrent à l'étude de la mobilité à travers l'examen des formes d'occupation fonctionnelle du sol. Bien que la mixité d'usage du sol ne soit pas considérée comme aussi déterminante que la densité (tout au moins d'après Owen, 1996), Cervero, à partir du Royaume-Uni, démontre qu'une plus grande proximité géographique entre lieux fonctionnels (résidences et emplois) limiterait les distances parcourues par les véhicules particuliers, le débit sur les grandes infrastructures autoroutières, et par conséquent les émissions de GES. Banister conforte cette démonstration en assurant que la diversité et la proximité des services et des équipements réduisent la durée des déplacements et encouragent la multi et l'inter-modalité dans les transports.

La littérature relative à l'analyse fonctionnelle des territoires appartient plutôt au champ de la géographie urbaine. On retrouve à partir de l'examen de ce champs appliqué aux transports des grandes familles de variables pouvant déterminer les choix de modes de déplacements, les distances migratoires et les consommations d'énergie associées. Il s'agit, dans la plupart de ces recherches, de :

- La densité
- L'ampleur démographique en termes de population
- L'occupation du sol
- La localisation dans le territoire
- La structure socio-économique des migrants
- La configuration des déterminants de mobilité (notamment la valeur du temps)
- L'organisation spatiale

Citons ici l'un des modèles les plus représentatifs de ce type d'approche : le modèle LUTI (Land Use Transport Interaction). Ce modèle est généralement employé pour déterminer les changements d'occupation du sol et les besoins énergétiques induits par les transports. Ces besoins sont estimés grâce à l'application d'un coefficient énergétique propre à chaque variable d'occupation du sol.

Citons également le modèle LAND couplé au modèle TRANSTEP. Young et al., 1996, développe ce modèle afin d'estimer les émissions et la consommation de carburant selon divers scénarios de développement urbain. La deuxième partie de leur recherche emploie TRANSTEP, outil de planification articulant transport et occupation du sol. Il est alors mobilisé pour étudier les effets induits par des variations de densité résidentielle avec celles des modes d'occupation du sol et de simuler les modifications structurelles de la mobilité dans le sud-ouest de Melbourne.

Les modèles LUTI connaissent de nombreuses déclinaisons. A ce titre, TRANUS tout comme MEPLAN sont assimilés à cette famille de modèles pour lesquels les caractéristiques d'occupation du sol sont très nettement améliorées.

La démarche de modélisation LUTI repose sur l'hypothèse que l'intensité et la répartition spatiale de l'activité industrielle ou tertiaire offrent des indications sur la quantité d'emplois directs et indirects (les services locaux selon les hypothèses dites de Lowry). Le modèle calcule, à partir de ces quantités, la localisation des activités en fonction des réserves de terrains disponibles et des diverses opportunités de transport (notamment en termes d'accessibilité). La simulation de la localisation des activités permet, dans un second temps, d'estimer le besoin de mobilité et d'allouer ces derniers à un réseau de transport. L'examen des recherches portant sur la consommation d'énergie à partir des modèles LUTI, révèle qu'il est assez difficile de les adapter au secteur du bâtiment. Selon EPA, 2001, on constate que sur 22 modèles LUTI développés jusqu'en 2001, seuls 4 envisageaient de déterminer les consommations d'énergie du bâti. Il apparaît que peu de recherches employant des modèles de ce type (notamment TRANUS) ont pour objectif explicite d'évaluer des effets de la forme urbaine sur les consommations globales du bâti. Citons néanmoins Rickaby, 1987, 1991, qui mesure les consommations d'énergie des secteurs du transport et de l'habitat en fonctions de modes de développement urbain contrastés, et Steadman et Brown, 1998, qui, en poursuivant les travaux de Rickaby, étudient, à travers le cas de Swindon,

les effets de quatre scénarios d'organisation urbaine (compact, fortement dense, périphérique, et « au fil de l'eau »). Signalons aussi que Steadman et Brown élargissent leur problématique aux politiques générales d'aménagement du territoire et de transport en fondant leur analyse sur le cas d'une ville existante et en y intégrant la question du bâti dédié à l'activité tertiaire.

En France, ce sont les travaux de Pouyanne qui représentent cette catégorie de recherche. L'auteur considère que « *les différences locales de mobilité (au-delà des déterminants socio-économiques habituels : revenu, CSP, composition familiale) sont attribuables aux formes prises par l'urbanisation, c'est-à-dire aux modalités de l'occupation du sol* ». Pour Pouyanne, les variables qui décrivent l'occupation du sol sont quant à elles limitées à la forme urbaine (densité humaine, population active, indice de spécialisation sectorielle, écart-type des densités résidentielles) et le type de logement (logements individuels isolés, logements individuels accolés, petit collectif, grand collectif, et nombre de personnes par pièces). Pouyanne reconstitue pour la France la relation décroissante entre densité et distances parcourues par habitant. Ses résultats montrent également que pour des valeurs élevées du taux d'emplois de la population active, du taux de logements individuels isolés et du nombre de personnes par pièce correspondent des distances parcourues par habitant relativement importantes.

c) Entre déterminants socioéconomiques et territoriaux

Outre l'organisation du territoire, nombre de recherches ont cherché à mesurer les dépenses énergétiques entraînées par les liens topologiques qu'entretiennent les éléments fonctionnels des territoires. Ces recherches ont porté sur la notion générique de localisation et tout particulièrement sur celle de l'emploi et des espaces résidentiels. La localisation (distance au centre, accessibilité aux infrastructures primaires) comme déterminant de la forme urbaine et des modes de consommations d'énergie a été mise en lumière par Headicar et Curtis, 1994. D'après ces auteurs, l'implantation de lotissements résidentiels hors des aires urbaines ou à proximité des grandes infrastructures de transport routier contribue à accroître les déplacements et à diminuer la part modale des transports collectifs. Banister soutient cette hypothèse en ajoutant que la localisation dans l'aire métropolitaine est un facteur prépondérant dans la question de la dépendance à l'automobile et des consommations de carburant. La dilution des activités vers la périphérie ou les villes nouvelles incitent à recourir à l'automobile pour tous les motifs de déplacement (domicile-travail, loisir...) au dépend des transports publics, de la marche à pieds ou du vélo.

Bien entendu, plusieurs auteurs contestent l'exercice consistant à privilégier les dimensions spatiales surtout lorsqu'il minimise le poids d'autres variables socioéconomiques. Druckman et Jackson, 2008, Hanson, 1982, à l'image de la plupart des recherche relevant des sciences socioéconomiques, montrent que le nombre de déplacements, tout mode confondu, est très sensible à la taille des ménages, au revenu et à la motorisation. Ces variables expliquent largement les distances parcourues, la part de la mobilité réalisée en voiture particulière et la consommation d'énergie consacrée à ce poste (Naess, 1996). L'affirmation selon laquelle les caractéristiques socioéconomiques des ménages sont plus déterminantes que la répartition des activités et la morphologie des territoires semble être partagée par la communauté scientifique du

transport (surreprésentée par l'économie). Stead, 2001, démontre que ces caractéristiques expliquent à hauteur de 21% à 58% la variation des distances de déplacements et ce tant à l'échelle du ménage qu'à celle du district. D'après Hickman et Banister, dans une étude appliquée au comté de Surrey au Royaume, les variations de forme urbaine ne contribuent qu'à hauteur de 9% aux variations de consommation d'énergie des transports tandis que les variables socioéconomiques en expliquent 28%.

D'après Ewing et Cervero, les déplacements, en termes de flux, sont directement liés aux caractéristiques socioéconomiques des actifs avant toutes considérations liées au contexte urbain dans lequel ils se réalisent. En termes de distances, ce serait plutôt le contexte territorial qui surpasserait les niveaux de revenu ou la motorisation des ménages, tandis que le choix modal dépendrait, à égal mesure, des deux facteurs. La structure spatiale, en termes de polarités, impliquerait également des coûts supportés par les ménages ou les actifs, notamment en termes énergétiques. Vanco, 2008, observe que pour deux grandes métropoles françaises (Lille et Marseille) une configuration étalée avec un centre dominant et un pôle secondaire important, éloigné et composé d'une population aisées, conduit à un usage intensif de la voiture particulière et donc à des dépenses de transport élevée en valeur absolue. Signalons ici que Vanco insiste sur la forte proportion de ménages vulnérables au coût des transports, notamment énergétiques, qu'induit un tel modèle d'urbanisation. En revanche, une ville dense, mixte, peu étalée et dotées de pôles secondaires, proches du centre et indépendants, engendrerait, selon l'auteur, des dépenses de transport plus faibles en raison de la modération de l'usage de la voiture et une relative égalité dans accessibilité face à l'offre de transport en commun.

Malgré des divergences notables dans les résultats quantitatifs, la majorité des recherches, qu'elles soient empiriques ou basées sur une modélisation théorique, acceptent l'idée que le jeu des combinaisons entre taux de compacité, niveau de concentration autour d'un centre économique, densité, structure des déplacements et localisation des emplois et des services sont d'autant de leviers urbains pour réduire les consommations d'énergie et les émissions de CO₂.

2.3. DE LA DENSITE A LA GEOMETRIE DE LA FORME URBAINE

a) La géométrie de la forme urbaine comme déterminant des propriétés des microclimats

Repérer des études qui mettent en parallèle forme urbaine et énergie dans le bâti, revient souvent à explorer le domaine de la climatologie car on y trouve des travaux analysant les effets induits par l'îlot de chaleur urbain⁴, ces derniers étant extrêmement sensibles à la configuration du

4 Les îlots de chaleur urbain (ICU) sont des microclimats artificiels qui s'expriment par des élévations localisées des températures, notamment les températures maximales, dans les aires urbaines par rapport au zones rurales ou forestières voisines ou par rapport aux températures moyennes régionales. Ces variations importantes de températures dépendent de la nature d'occupation du sol (ville dense, forêt, périphérie moins dense...), le relief et l'exposition (versant sud ou nord).

tissu urbain. Ces études s'appuient sur des modélisations à des échelles macroscopiques (plutôt géographiques) et à des analyses microclimatiques afin d'évaluer les effets du relief et de la canopée urbaine sur l'ensoleillement, les mouvements d'air, le transport des polluants, etc. Ces recherches résument le plus souvent la forme urbaine à une géométrie assez grossière, à une canopée plus ou moins rugueuse ou à une « texture urbaine » (Oke, Clapier⁵). Citons ici l'exemple de Masahiro, Sakamoto, 2005, qui partent d'un examen cartographique pour déterminer les caractéristiques de formes urbaines qui modifient l'ambiance thermique de Tokyo. Ce type d'étude peut théoriquement quantifier les effets directs de la forme urbaine sur la facture énergétique d'un bâtiment (par exemple à travers les variations des températures extérieures). Le prolongement de ces modèles et des applications à des fins énergétiques sont abordés par Steemers, 2003, et Ratti, 2008, qui partent d'une modélisation d'un ensemble urbain pour évaluer plus précisément la portée du contexte bâti sur le bilan énergétique d'un bâtiment (cf. plus bas).

b) La géométrie de la forme urbaine comme déterminant des performances énergétiques du bâti

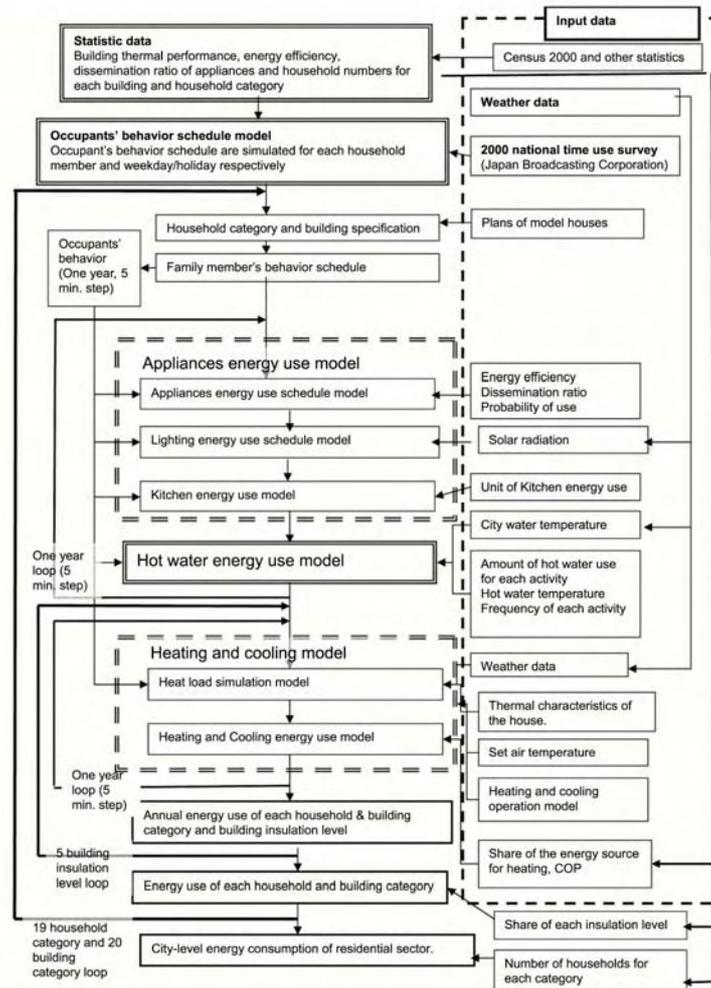
De façon analogue au secteur des transports, nombre d'études s'attachent à évaluer les besoins et des consommations énergétiques des bâtiments, notamment du logement (Baker 2008, Druckman et al, 2008, Michalik et al, 1997, Wei Yi-Ming, 2007) pour des postes plus ou moins hiérarchisés (Sailor, Lu, 2003, puis Heiple, Sailor, 2008, se concentrent par exemple sur l'évaluation des besoins en chauffage). La considération de la forme urbaine est alors assez faible puisque les auteurs adoptent généralement des modèles microscopiques à l'échelle du logement (cf. plus bas). Dans le même ordre d'idée, d'autres travaux se limitent à évaluer l'efficacité de mesures politiques sectorielles sur l'habitat à l'échelle d'actions techniques et/ou socioéconomiques sur le bâti ou en faveur des ménages (Hens, 2001, Kikegawa, 2006).

Pour le secteur du bâtiment, Nikjamp et Perrel's, 1994, dans un bilan bibliographique des différents modèles d'estimation énergétique à l'échelle locale et régionale, montrent qu'il est plutôt difficile de repérer des modèles capables de prendre explicitement en compte la forme urbaine. Les travaux portent généralement sur les bilans énergétiques du bâti selon une démarche dite « bottom-up ». Du logement, la consommation d'un ménage est extrapolée à l'échelle d'un quartier ou d'une ville selon une méthodologie de classification en type. C'est le cas des travaux de Shimoda et al., , dans lesquels est développé un modèle complexe permettant d'évaluer nombres de mesures politiques concernant le secteur résidentiel.

Yamaguchi et al., 2007, réalisent un travail similaire pour un quartier d'affaire au Japon. Le modèle permet de simuler plusieurs scénarios techniques et d'évaluer les conséquences sur les consommations énergétiques.

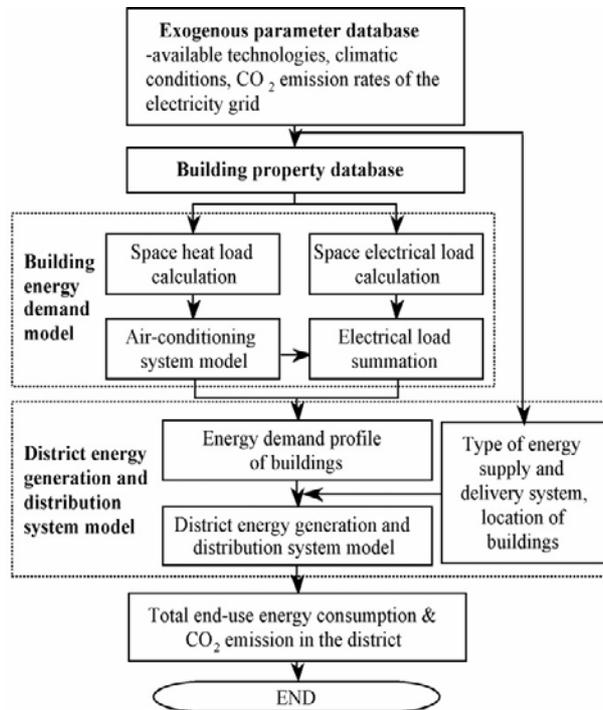
*5 T.R.Oke : Professor Department of Geography and Member, Atmospheric Science Programme
Clapier Alain : modélisation, LPAS/EPFL (Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne)*

Figure 2 : Architecture du modèle de Shimoda et al.



Source : Shimoda.Y, Mizuno.M, Asahi.T, Taniguchi.A, "Evaluation of city-scale impact of residential energy conservation measures using the detailed end-use simulation model"

Figure 3 : architecture du modèle de Yamguchi et al.



Source :Yamaguchi.Y, Shimoda.Y, Mizuno.M, , "Proposal of a modeling approach considering urban form for evaluation of city level energy management.

Nombre de méthodes de ce type ont été développées aux fils des besoins de la recherche scientifique (ENERTER, BETEL, etc.). Citons ici l'une des plus citées dans la littérature, la « Lighting and Thermal method » .

La méthode LT se présente, d'un point de vue opératoire, comme un outil de calcul conçu par Nick Baker, avec la contribution de David Hoch et Koen Steemers, au Martin Centre for Architectural and Urban Studies, à l'Université de Cambridge, et de Michael Baker au Cambridge architectural Research Ltd. Graphics and design. A l'origine un simple tableur, cet outil emploie une trentaine de variables pour estimer les consommations totales dues aux systèmes de chauffage, rafraîchissement, éclairage et ventilation et pour aider les utilisateurs du modèle à comparer différentes esquisses de bâtiment à un stade précoce de la conception.

Steemers applique cet outil au cas de Londres et l'article à un « modèle d'élévation numérique » (Digital Elevation Mode, DEM) pour étendre le bilan énergétique à une aire urbaine de 400mx400m, le but de cette étude étant de tester la sensibilité des résultats à des variations de forme urbaine relativement aux caractéristiques microscopiques des bâtiments (conductances de l'enveloppe, taux de vitrage, etc.). Toute chose égale par ailleurs du point de vue des caractéristiques du bâti, il s'agit alors d'évaluer des variations de densité à travers celles de trois paramètres morphologiques : profondeur du bâtiment, prospect entre bâtiments et compacité.

Ratti et al., 2005, utilise le même outil pour étudier les relations entre énergie et forme urbaine. Les variables sont alors la distance entre les façades, l'orientation de la façade, l'angle d'horizon urbain et le pourcentage de voûte céleste visible (angle solide au ciel). L'objet d'étude est ici de taille plus réduite (250mx250m) et s'applique à plusieurs cas internationaux : Londres, Toulouse, Berlin. Là encore, l'étude est complétée d'un modèle DEM construit à partir d'informations morphologiques résultant de divers traitements d'images, et ce afin d'alimenter l'outil LT.

Ce type de recherches semble adapté à l'échelle du quartier ou à des ensembles réduits de bâtiments. Il accorde plus d'intérêt à la question de la géométrie urbaine qu'à celle de la fonction.

Un autre modèle d'analyse des performances énergétiques de type bottom-up a été développé par Jones et al, 2001. Il s'agit du modèle EEP (Energy and Environment Prediction model) ayant le même objectif que la LT method, à savoir évaluer l'efficacité énergétique de certaines solutions constructives (double-vitrage, U des façades,...) pour un groupe de bâtiment ou une aire urbaine. Le modèle s'appuie sur une base de données nationale (SAP, Standardises Assesment Procedure) qui donne un niveau de consommation d'énergie en fonction d'un type de bâtiment.

Cinq variables entrent en jeu : la surface de plancher des locaux chauffés, la surface des façades, le taux de vitrage, l'aire des parties non-couvertes, la période de construction et la typologie de bâtiments. Afin d'évaluer les consommations à l'échelle d'une aire urbaine, l'ensemble urbain analysés peut être subdivisé par pas moins de 100 types de bâtiment. Pour réaliser un bilan complet, le modèle EEP prend également en compte les bâtiments tertiaires. Cet outil permet de comparer l'efficacité de différentes mesures énergétiques prise à l'échelle de l'aire urbaine.

Au regard des différents travaux analysés, citons les paramètres consensuels agissant directement sur la consommation énergétique des bâtiments, il s'agit principalement :

- Du type d'activité (habitat, commerce, industrie) et comportement des occupants
- De la géométrie urbaine au regard des angles d'obstruction au rayonnement solaire (résultant de la hauteur, de la profondeur et des prospects entre bâtiments).
- De la géométrie du bâti au regard de l'orientation des façades et du taux de vitrage
- Des caractéristiques constructives des enveloppes (conductances et inerties des matériaux employés).
- Du rendement des systèmes (chauffage et éclairage, climatisation notamment pour les bureaux)
- Du rendement des réseaux de distribution
- Des températures de l'air extérieur et intérieur (de consigne)
- Du prix de l'énergie

L'étendue des facteurs relatifs à la consommation énergétique explique celle des recherches sur le sujet.

Dans son étude, Ratti, en citant Bakers et Steemers, met en évidence 4 variables agissant sur les performances énergétiques : le contexte urbain, la conception du bâtiment, les systèmes d'éclairage et de chauffage des chacune de ces variables.

Figure 4 : Facteurs affectant la consommation énergétique dans le bâtiment.



D'après Baker and Steemers Source: C.Ratti "Energy consumption and Urban texture"

Selon la méthode LT, la pertinence des calculs tient aux critères qui délimitent ce que l'on entend par morphologie urbaine. La densification du tissu peut être considérée comme un processus d'augmentation de la hauteur, de la profondeur des bâtiments et/ou de la réduction des prospects (ce qui réduit la part de voûte céleste visible entrant dans le calcul du rayonnement solaire direct et diffus).

Steemers, 2003, considère que deux paramètres modifiant la densité peuvent perturber le bilan énergétique du bâti. L'augmentation de la profondeur des bâtiments a pour effet, dans la plupart des cas, de faire croître les besoins de ventilation naturelle ou mécanique (et donc les déperditions de chaleur) et, à cause d'une plus grande surface plancher par étage, d'imposer des besoins de chauffage et d'éclairage artificiel plus importants. Selon l'auteur, une telle configuration engendre un surcroît de l'ordre de 5% à 10% des besoins énergétiques totaux du bâti.

L'augmentation de la hauteur des bâtiments, ou la réduction des prospects se traduit quant à elles par l'amplification de l'angle d'obstruction limitant l'exploitation des gisements solaires. Les apports solaires constituant une part relativement faible du bilan des besoins de chauffage (selon certaines conditions de taux de vitrage) engendrent des surconsommations comprises entre 6% et 15%. Steemers estime que le gain apporté par des configurations relativement denses correspondant à un angle d'obstruction de 30°, s'élève à 23% dans le cas d'un bâtiment à air-conditionné et de 45% dans le cas d'un bâtiment ventilé naturellement. Au-delà de cet angle, le gain énergétique ne serait plus vraiment significatif. Signalons que l'auteur précise que pour des immeubles sur cour ou en gradins, un angle de 30° correspond à une densité de 200 logements/ha (de surface moyenne de 125m²). A titre de comparaison, la densité moyenne en Angleterre est de 25 logements/ha et le plan gouvernemental de développement urbain prône dans ses politiques d'aménagement à des densités proches du double. Steemers démontre donc qu'il est possible de doubler la densité⁶ sans dégrader le confort des logements en termes d'éclairage naturel et de confort thermique.

Bien entendu, le poids de ces paramètres varie avec le type d'architecture et d'activité qu'abrite le bâti : le chauffage demeure le poste le plus consommateur dans l'habitat avec un différentiel de l'ordre de 40% selon la typologie alors que dans les bureaux la demande en énergie résulte avant tout des systèmes de contrôle des ambiances (la climatisation est de loin le poste le plus important dans un bureau avant l'éclairage).

6 Si Steemers est l'un des rares à apporter des données quantifiées, il ne faut cependant pas prendre pour unique référence ces préconisations.

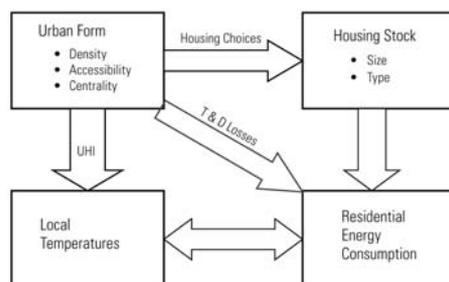
La solution la plus efficace selon Steemers reste donc des bureaux peu denses, avec une épaisseur réduite de 12m à 15m permettant un éclairage et une ventilation naturelle.

Enfin, il ressort que le rafraîchissement par ventilation naturelle permet de réduire de 40% la demande en climatisation et représente le levier le plus pertinent dans le cas du bureau. Steemers termine sa démonstration en argumentant que le bruit et la pollution sont des facteurs en défaveur de la climatisation naturelle. Une densification du bâti passe donc par une réflexion sur la place de l'automobile et la pollution qu'elle provoque.

Bien qu'il ne s'appuie pas sur des données quantitatives, Hui, 2001, parvient à la même conclusion admettant qu'il est possible d'obtenir une grande densité urbaine à partir d'un mélange de bâtiments de hauteurs variables et d'une généralisation de la ventilation naturelle.

Ewing, quant à lui, évalue les effets de la forme urbaine à travers un indicateur d'étalement urbain couplé à celui du type et de la taille de logement.

Figure 5 : Facteurs impactant la forme urbaine et les consommations d'énergie résidentielles- Architecture du modèle.



Source : Ewing Reid, Rong Fang, "The Impact of Urban Form on U.S. Residential Energy Use"

Selon cette recherche, les consommations énergétiques résidentielles varient simultanément en fonction du type et de la taille des logements, ces derniers éléments étant directement liés au niveau d'étalement de la ville. Un foyer moyen d'une ville compact est ainsi 20% moins énergivore que celui d'une ville étalée. En outre, l'îlot de chaleur des villes compactes permet de réduire les consommations d'énergie de l'ordre de 1.6% par rapport à celle d'une ville étalée. La *Sun Belt* (états les plus ensoleillés des Etats-Unis formant la ceinture du sud), déroge néanmoins à ces observations : son développement plus compact permet de réaliser des économies d'énergies grâce à la prédominance des maisons mitoyennes et des petits logements mais entraîne des dépenses énergétiques supplémentaires à cause de fortes demandes en refroidissement. En climat tempéré et froid, les effets structurels du parc de logement sont bien plus forts que ceux induit par l'îlot de chaleur. Le bénéfice de la ville compacte pour les transports est compris quant à lui entre 20 à 40% (cf. Ewing, 2008).

Cependant, la conclusion d'Ewing selon laquelle l'étalement urbain entraîne des logements plus grands et des maisons individuelles qui consomment d'avantage que de petites maisons

mitoyennes spécifique à des organisations urbaines plus dense est selon Randolph⁷ intuitive et tautologique. Son modèle semble trop compliqué et l'utilisation de 4 bases de données différentes pose de nombreux problèmes méthodologiques.

2.4. UNE ARCHITECTURE SCIENTIFIQUE COMPLEXE IMBRIQUEE DANS LE DEBAT OPERATIONNEL

On remarque que peu de recherches abordent simultanément les questions de l'habitat et du transport même lorsqu'elles annoncent explicitement comme entrée une objectivisation de la forme urbaine. Ces deux postes de consommations énergétiques et d'émissions de CO2 sont encore abordés par la littérature (à l'image de l'action opérationnelle) comme des composantes sectorielles distinctes.

Par exemple, en ce qui concerne les transports, les recherches sont très souvent limitées à la production de modèles de simulation dédiés à l'évaluation des émissions de CO2 sur un territoire donné (Cortès et al., 2008) mais dans lesquelles la forme urbaine est peu prise en compte (ou à un seul de ses aspects, notamment celui de l'étalement urbain, Stone, 2008, De Ridder et al., 2008).

Les outils le plus souvent utilisés dans ce type de recherches sont à classer dans les modèles dynamiques intégrés. Il s'agit alors d'une représentation géographique des territoires alimentés par des informations socio-économiques géoréférencées. Les modèles LUTI, à l'image de TRANUS, MEPLAN ou TranPlan, permettent, comme on l'a vu, de quantifier la mobilité par motif et par mode de déplacement, d'allouer ces derniers à des réseaux de transport et, à partir de l'intégration de modèles d'estimation des consommations d'énergies et d'émission de polluants (TEMMS⁸, COPERT) dans lequel sont détaillées les caractéristiques du parc de véhicules (taille, carburant, etc.), de réaliser les bilans énergétiques et environnementaux des systèmes de transport à l'échelle locale ou nationale. Ces outils permettent également, grâce à un grand nombre de variables, de dégager les indicateurs les plus pertinents dans la réduction de consommation de carburant et d'émission de CO2.

Le survol de la littérature montre que les corrélations et les liens de causalité sont difficiles à démêler à cause notamment du grand nombre d'interactions empiriques et de l'hétérogénéité tant des méthodes que des cas d'étude. La hiérarchisation des variables selon leur poids sur les consommations d'énergie est donc un exercice extrêmement délicat.

A quels acteurs et à quelles finalités s'adressent le plus souvent les recherches sur la forme urbaine et ses implications énergétiques et environnementales ? Outre la production académique, on serait tenté de dire qu'elles renseignent quasi exclusivement la politique de la ville et de l'aménagement du territoire. Cette finalité scientifique et opérationnelle est bien entendu le moteur des recherches sur la densité urbaine, thématique très largement abordé et débattu dans le champ de l'urbanisme et l'aménagement. Au point où Breheny, l'un des principaux contributeur à ce

⁷ Randolph J, « Comment on Reid Ewing and Fang Rong's « The impact of Urban Form on U.S Residential Energy use »

⁸ Transport Emissions Modelling and Mapping Suite.

débat, observe dès 1994 qu'un consensus surprenant s'est installé en très peu de temps sur le fait que l'aménagement urbain en faveur de villes compactes est considéré comme le levier le plus efficace pour réduire les consommations d'énergie et les émissions de CO₂. En témoigne, les directions prises par la Commission Européenne en 1991, par le Ministère de l'Environnement anglais et le gouvernement allemand.⁹

Ainsi, le premier objectif de ces études est d'ordre politique avant celui d'être strictement technique ou académique. Il s'agit alors de confirmer ou d'infirmer l'efficacité de certaines mesures en faveur de la ville dense ou compacte ou, dans une autre mesure, de contribuer simplement au débat sur la pertinence du modèle d'une telle ville. Débat qui a démarré avec la question de la mobilité mais qui s'est étendu au logement et plus généralement au bâti. En effet, même si l'étude de la compacité est antérieure au débat de la ville dense dans le domaine de l'énergétique¹⁰, Steemers, puis Ratti ont évalué dans plusieurs travaux, comme on l'a évoqué plus haut, l'impact d'une plus grande densité urbaine sur les consommations énergétiques des bâtiments. Pour les protagonistes, le procès de la ville étalée est alors le suivant : l'habitat individuel y est dominant, il est plus consommateur d'énergie à cause de sa faible contiguïté, il incite à une mobilité sur de longues distances et favorise les déplacements en véhicules particulier et est donc tributaire des ressources énergétiques fossiles. La ville dense au contraire permet une mobilité sur de courtes distances, elle facilite l'usage des transports en commun et, outre la mutualisation des moyens de transports, réduit substantiellement le recours aux combustibles fossiles. Face à ces deux modèles de développement littéralement opposés, plusieurs études cherchent des leviers alternatifs à la simple densité. Tandis que d'autres travaux élaborent des scénarios de développement urbains variés allant du développement contenu jusqu'à l'étalement en passant par une organisation polycentrique.

Dans la famille des études portant strictement sur la dimension énergétique consacrée à la forme urbaine et au logement, l'objectif peut parfois se limiter à analyser quantitativement les besoins en mobilisant des méthodes adaptées aux échelles macroscopiques.

9 Department of the environment – UK Strategy for sustainable development – 1993. En Allemagne, la ville compacte est une notion clé du National Physical Plan (National Physical Planning Agency 1991)

10 Traisnel, Maizia, adolphe

III. FORME URBAINE, BILAN DE CHAUFFAGE ET DE CLIMATISATION

[¹¹]

Cette partie du rapport est consacrée à l'examen des caractéristiques énergétiques des tissus urbains. Elle propose de réaliser un bilan des besoins de chauffage et de climatisation car ces derniers, plus que pour tout autre poste (hormis peut-être l'éclairage), sont extrêmement sensibles aux propriétés emmenées par l'échelle urbaine. Le tissu urbain est ici défini comme un système combinant morphologie de l'espace libre ou ouvert (à distinguer de l'espace public) et propriétés constructives et architecturales du bâti qui le compose.

Ce bilan dépend ainsi des dimensions morphologiques et constructives des bâtiments mais également du contexte spatial dans lesquels ils s'inscrivent. Outre la compréhension du fait énergétique urbain, il permet d'un point de vue opérationnel ou de prospective (cf. chap.VI page 137) , de mettre en évidence les leviers disponibles relatifs au contexte spatial qui permettraient, s'ils étaient actionnés, d'améliorer les performances énergétiques (principalement thermiques) de l'ensemble bâti.

1. METHODOLOGIE ET OBJETS D'ETUDE

Aucune étude ne semble s'être attaquée à l'exercice périlleux d'un «catalogue» typologique systématique des formes des tissus urbains, notamment en France. Pour pallier ce manque, on pourrait procéder à une sélection aléatoire d'échantillons sur le territoire, la typologie étant alors constituée par des parcelles de surface constante. Bien qu'elle garantisse une bonne représentativité de l'échantillonnage, cette méthode, qui a été testée dans le cadre de cette recherche, s'est avérée difficilement réalisable à cause de la quasi impossibilité d'obtenir pour chaque échantillon l'ensemble des informations nécessaires à une modélisation thermique cohérente (géométrie et composition des bâtiments).

Cette partie de la recherche a finalement contourné ces obstacles en recourant à Bordes-Pagès , 1995, de l'IAURIF¹² , étude construisant un « *Référentiel de densités et de formes urbaines* »¹³. Y sont recensés 25 types de forme urbaine en Ile de France, chaque type étant décrit sur la base d'informations homogènes : plan masse, géométrie globale (emprise au sol, nombre de niveaux moyen, densité nette), et photographies (Cf. Figure 6). Les détails de ce référentiel sont présentés

¹¹ Ce chapitre l'été rédigé par M. MAIZIA et S. BERGE.

¹² l'IAURIF l'Institut d'Aménagement et Urbanisme de la Région Ile de France

¹³ Bordes-Pagès Elisabeth « Référentiel de densités et de formes urbaines » laurif 1995, 97 p.

en annexe 2 Parmi ces tissus urbains, seuls 18 types ont été sélectionnés en fonction de leur pertinence pour mener l'étude.

La nomenclature servant à désigner les types urbains est composée de deux chiffres que l'on retrouvera tout le long de ce chapitre. Le premier correspond à la catégorie générale de l'échantillon et le deuxième à une sous-catégorie correspondant à une forme.

Les catégories utilisées dans l'étude sont les suivantes :

- 1 : Habitat individuel : 1.1.
- 2 : Habitat individuel identique : 2.1, 2.2, 2.3, 2.4.
- 4 : Habitat continu bas : 4.1, 4.2, 4.3, 4.4.
- 5 : Habitat collectif haut : 5.1, 5.2, 5.3, 5.4.
- 6 : Habitat collectif discontinu : 6.1, 6.2, 6.3, 6.4, 6.5.

Figure 6 : Extrait de "Référentiel de densités et formes urbaines »..



Evaluer les effets de la forme urbaine sur les consommations d'énergie revient à adopter une démarche en trois temps.

1. Circonscrire le périmètre de l'objet de l'étude, en l'occurrence les formes urbaines en s'appuyant sur un inventaire de types morpho-fonctionnels d'échelle comparable.

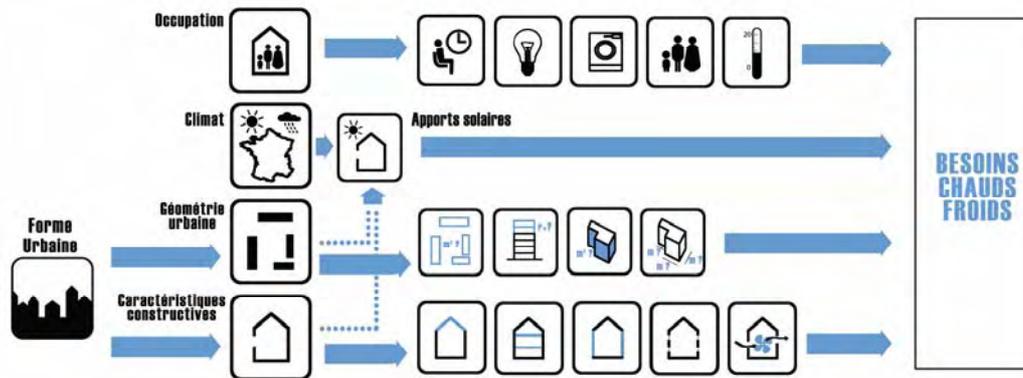
2. Emettre des hypothèses de calcul à travers l'adoption d'une méthode conventionnelle. Faciliter la comparaison et mettre en évidence les indicateurs strictement morphologiques, on décide de ne pas comparer les consommations énergétiques qui dépendent des systèmes de production et de distribution, mais de plutôt les besoins nécessaires à la régulation thermique du logement (chauffage, rafraîchissement).
3. Pour confirmer ou infirmer ces hypothèses, on procède, dans un troisième temps, à une série de simulations thermiques. Celles-ci sont complétées par d'autres simulations complémentaires afin d'exclure les facteurs intrinsèques à chaque bâtiment et de rendre explicites les effets énergétiques de la forme urbaine en tant que système morphologique.

2. HYPOTHESES GENERALES DU CALCUL ENERGETIQUE A L'ECHELLE URBAINE

Les entrants d'un calcul thermique sont nombreux et imposent une description fine de chacun des éléments constitutifs du bâti. L'échelle urbaine, par l'ampleur et l'hétérogénéité de ses composantes, interdit, à l'instar de l'ingénierie thermique, toute prétention à modéliser dans le détails les consommations d'énergie. A l'image des démarches typo-morphologiques, il est alors indispensable de simplifier la description des tissus urbains tout en veillant à conserver les variables pertinentes du calcul. Cette simplification revient à admettre que la modélisation repose sur un certain nombre d'hypothèses que l'on a choisies ici de classer en quatre grands groupes.

- Les hypothèses relatives à la géométrie de l'ensemble bâti
- Les hypothèses relatives aux caractéristiques constructives des bâtiments (nature et composition de l'enveloppe, taux de vitrage, etc.)
- Les hypothèses relatives aux modes d'habiter et aux scénarii d'occupation.
- Les hypothèses relatives au climat (localisation dans l'espace géographique national).

Figure 7 : Architecture du modèle de calcul des besoins énergétiques résidentiels .



Source : Uteam

2.1. GEOMETRIE DE LA FORME URBAINE

Dans cette partie de la recherche, un ensemble urbain est assimilé à un « morceau » isolé de ville. Cet isolement artificiel présuppose que l'on admet que les conditions aux limites de l'espace urbain sont pertinemment calibrées : en d'autres termes, l'ensemble urbain est suffisamment étendu pour que son bilan énergétique ne soit pas perturbé par les effets de bords, notamment en termes de rayonnement solaire. La taille des types urbains élaborés par l'IAU (entre 2000 et 5000 m² d'emprise au sol) ne répond pas entièrement à cette condition. Une étude sur des étendues plus larges serait donc souhaitable (mais demanderait une puissance de calcul significative). Néanmoins, il ne faut pas ici surestimer les effets que pourraient produire l'élargissement de l'aire d'analyse. En effet, même si l'isolement du tissu peut éventuellement conduire à une surestimation des gisements solaires, d'autres caractéristiques du bâti pondèrent rapidement, comme on le verra plus bas, ce type d'apports gratuits (notamment le taux de vitrage des façades). Or, les taux de vitrage caractérisant le tissu bâti susceptible d'être sensible aux effets de bord sont plutôt faibles. Outre cette simplification, dans cette partie, les tissus urbains sont assimilés d'un strict point de vue géométrique à une composition de prismes obtenus par extrusion verticale des surfaces d'emprise au sol. Cette méthode, adaptée à des objets de taille significative, à l'image des types urbains examinés ici, revient à considérer les toitures comme des surfaces planes. Cette trop grande simplification a fait l'objet d'une correction de l'ensemble des résultats. Enfin, afin de ne pas favoriser les orientations spécifiques, on admet dans cette partie que le vitrage est uniformément réparti à toutes les parois verticales non contiguës.

Les descripteurs de la géométrie des tissus urbains peuvent être résumés par les quantités suivantes :

- Surface d'emprise au sol
- Nombre moyen de niveaux
- Surface totale des façades verticales
- Périmètre de façade

Rappelons que les 18 types sélectionnés dans cette partie de la recherche se répartissent en 5 périodes de construction : avant 1914 (période se distinguant par un taux de vitrage très faible), 1915-1948, 1949-1967, 1968-1975 et 1975-1981. Cette dernière période correspond à des constructions respectant la première réglementation thermique (les types urbains 4.1, 6.2 et 6.4 sont donc à examiner en prenant en compte ce paramètre).

La hauteur moyenne des logements individuels est a minima de 1,59 niveaux et a maxima de 3,05. Les logements collectifs se caractérisent par des nombres de niveaux compris entre 3,06 et 8,58. Ces écarts significatifs permettent d'apprécier les corollaires de la hauteur moyenne en termes de demandes en chauffage et climatisation.

Afin de faciliter la lecture des résultats on a regroupé les 18 typologies de tissu urbain en 4 groupes de telle manière à distinguer les logements individuels des logements collectifs et de mettre en lumière les différentiels de densité. On remarque, grâce à ce découpage, ainsi que les types de logements individuels se répartissent en deux familles : d'une part un habitat plutôt épars (types 2.1, 2.2, 1.1), de l'autre, un habitat plutôt compact, proche de l'organisation en bande (2.3, 4.1, 2.4). De façon analogue, les logements collectifs s'organisent dans des formes tantôt continues, en îlot (types 5.1, 4.4, 4.2, 4.3, 5.2, 5.4), tantôt selon des configurations discontinues, en tours ou barre (6.1, 6.2, 6.3, 6.4, 6.5).

Tableau 3 : Synthèse de la géométrie des échantillons.

TYPE URBAIN	1.1	2.1	2.2	2.3	2.4	4.1	4.2	4.3	4.4
DESCRIPTION	Habitat individuel à Colombet	Habitat individuel identique à Saint Nom le Bretèche	Habitat individuel identique à Cergy ville nouvelle	Habitat individuel identique à Cergy ville nouvelle	Habitat individuel identique à Colombet	Habitat individuel continu bas Cergy ville nouvelle	Habitat collectif continu bas à Rueil-Malmaison	Habitat collectif continu bas à Le Vésinet	Habitat collectif continu bas à Poissy
IND./COL.	IND	IND	IND	IND	IND	IND	COL	COL	COL
PLAN MASSE									
Date de construction	de 1915 à 1948	de 1968 à 1974	de 1975 à 1981	de 1915 à 1948	de 1915 à 1948	av. 1914			
Emprise au sol nette (m ²)	5835	9228	4225	3247	3830	3597	6413	2588	2893
Hauteur moyenne (Nbr de niveaux)	2.23	2.4	1.59	2.2	1.76	3.05	4.37	3.06	3.18
Surface de façade verticale (m ²)	14373	17255	7650	6560	5947	9017	17467	5349	7220
périmètre de façade (m)	2149	2396	1609	994	1126	986	1332	582	756
TYPE URBAIN	5.1	5.2	5.3	5.4	6.1	6.2	6.3	6.4	6.5
DESCRIPTION	Habitat collectif continu haut à Levallois	Habitat collectif continu haut à Boulogne-Billancourt	Habitat collectif continu bas à Mantes-la-Jolie	Habitat collectif continu bas à Paris, Porte de Champerret	Habitat collectif discontinu à Cergy ville nouvelle	Habitat collectif discontinu à Cergy ville nouvelle	Habitat collectif discontinu à Suresnes	Habitat collectif discontinu à Le Chesnay	Habitat collectif discontinu à Beaugregard (Poissy)
IND./COL.	COL	COL	COL						
PLAN MASSE									
Date de construction	av. 1914	de 1915 à 1948	de 1949 à 1967	de 1915 à 1948	de 1949 à 1967	de 1975 à 1981	de 1915 à 1948	de 1975 à 1981	de 1968 à 1974
Emprise au sol nette (m ²)	4106	4798	2533	5284	4587	1427	1969	4711	2525
Hauteur moyenne (Nbr de niveaux)	5.19	4.89	3.73	8.58	4.15	3.92	4.89	5.88	4.86
Surface de façade verticale (m ²)	14741	15646	6715	27003	10528	3385	6441	16231	10176
périmètre de façade (m)	946	1066	600	1049	845	288	439	920	698

Source : Elioth

2.2. CARACTERISTIQUES CONSTRUCTIVES DES BATIMENTS

Le principal élément déperditif d'un bâtiment, lorsque l'on ne se situe pas dans les très hautes performances énergétiques, est l'enveloppe en contact avec l'environnement extérieur. L'enveloppe dépend en premier lieu des modes architecturaux et constructifs adoptés à un instant de l'histoire urbaine. Dans une démarche fondée sur la classification typologique, ces modes

peuvent être approchés par la période de construction du bâti. La datation des constructions, non explicite dans le référentiel de l'IAU, est réalisée ici à « dires d'expert ». Elle est enrichie d'hypothèses relatives à la constitution des parois de l'enveloppe. Ces dernières permettent de dégager les conductances de chaque surface opaque ou vitrée (façades, toitures, planchers, etc.), les taux de vitrage correspondant à l'esthétique architecturale dominant une période historique (ou révélant une contrainte réglementaire), et les taux de renouvellement de l'air intérieur (en effet, ce dernier dépend de la perméabilité à l'air des bâtiments dont l'intensité est fonction de l'âge de la construction et des modes constructifs des liaisons et des ouvrants). Signalons néanmoins que ces dernières hypothèses font rarement l'objet de consensus parfaitement établis et qu'elles pourraient paraître discutables à beaucoup d'experts. Elles reposent toutefois sur un échantillonnage rigoureux.

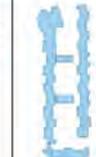
Tableau 4 : Caractéristiques thermiques des éléments constitutifs de l'enveloppe par période de construction.

Année de construction	Individuel/ collectif	U toiture W/m ² .C°	U Fenêtres W/m ² .C°	U Murs ext. W/m ² .C°	U planchers W/m ² .C°	% vitrage de l'enveloppe	Taux de renouvellement d'air Volumes/heure
av 1914	IND	1.9	2.8	2	1.5	1.1	1.1
	COL	1.9	2.8	2.1	1.5	25	0.9
de 1915 à 1948	IND	1.5	2.8	1.8	1.5	24	1
	COL	1.6	2.8	1.9	1.5	32	0.9
de 1949 à 1967	IND	1.5	2.7	2	1.6	27	1
	COL	1.6	2.8	2.2	1.6	26	0.9
de 1968 à 1974	IND	2	2.3	1.6	2.1	27	0.9
	COL	2.2	2.4	1.8	2.1	35	0.7
de 1975 à 1981	IND	0.6	2.6	1.1	1	25	0.9
	COL	0.7	3.3	1.8	1.8	30	0.7
de 1982 à 1989	IND	0.6	2.2	0.7	0.7	25	0.9
	COL	0.6	2.5	1.1	1.2	30	0.7
de 1990 à 2000	IND	0.6	2.7	0.7	0.6	26	0.9
	COL	0.6	2.6	0.8	0.7	28	0.7

Source: *Energie Demain*

La reconstitution des caractéristiques constructives permet ainsi de qualifier l'enveloppe de chaque type de tissu urbain.

Tableau 5 : Caractéristiques des typologies de formes urbaines

TYPE URBAIN	1.1	2.1	2.2	2.3	2.4	4.1	4.2	4.3	4.4
DESCRIPTION	Habitat individuel à Colombet	Habitat individuel identique à Saint Nom le Bretèche	Habitat individuel identique à Cergy ville nouvelle	Habitat individuel identique à Cergy ville nouvelle	Habitat individuel identique à Colombet	Habitat individuel continu bas Cergy ville nouvelle	Habitat collectif continu bas à Rueil-Malmaison	Habitat collectif continu bas à Le Vésinet	Habitat collectif continu bas à Poissy
IND./COL.	IND	IND	IND	IND	IND	IND	COL	COL	COL
PLAN MASSE									
Date de construction	de 1915 à 1948	de 1968 à 1974	de 1975 à 1981	de 1915 à 1948	de 1915 à 1948	av. 1914			
U toiture W/m².°C	1,5	2	2	0,6	2	0,6	1,6	1,6	1,9
U Murs extérieurs W/m².°C	1,8	1,6	1,6	0,7	1,6	1,1	1,9	1,9	2
U Fenêtres W/m².°C	2,8	2,3	2,3	2,2	2,3	2,6	2,8	2,8	2,8
U planchers W/m².°C	1,5	2,1	2,1	0,7	2,1	1	1,5	1,5	1,5
% Vitrage sur la façade	24	27	27	25	27	25	32	32	11
Taux de renouvellement d'air Volumes/Heure	1	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	1,1
TYPE URBAIN	5.1	5.2	5.3	5.4	6.1	6.2	6.3	6.4	6.5
DESCRIPTION	Habitat collectif continu haut à Levallois	Habitat collectif continu haut à Boulogne-Billancourt	Habitat collectif continu bas à Mantes-la-Jolie	Habitat collectif continu bas à Paris, Porte de Champerret	Habitat collectif discontinu à Cergy ville nouvelle	Habitat collectif discontinu à Cergy ville nouvelle	Habitat collectif discontinu à Suresnes	Habitat collectif discontinu à Le Chesnay	Habitat collectif discontinu à Beauregard (Poissy)
IND./COL.	COL	COL	COL	COL	COL	COL	COL	COL	COL
PLAN MASSE									
Date de construction	av. 1914	de 1915 à 1948	de 1949 à 1967	de 1915 à 1948	de 1949 à 1967	de 1975 à 1981	de 1915 à 1948	de 1975 à 1981	de 1968 à 1974
U toiture W/m².°C	1,9	1,6	1,6	1,6	1,6	0,7	1,6	0,7	2,2
U Murs extérieurs W/m².°C	2	1,9	2,2	1,9	2,2	1,8	1,9	1,8	1,8
U Fenêtres W/m².°C	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	3,3	2,8	3,3	2,4
U planchers W/m².°C	1,5	1,5	1,6	1,5	1,6	1,8	1,5	1,8	2,1
% Vitrage sur la façade	11	32	26	32	26	30	32	30	35
Taux de renouvellement d'air Volumes/Heure	1,1	0,9	0,9	0,9	0,9	0,7	0,9	0,7	0,7

source Elioth

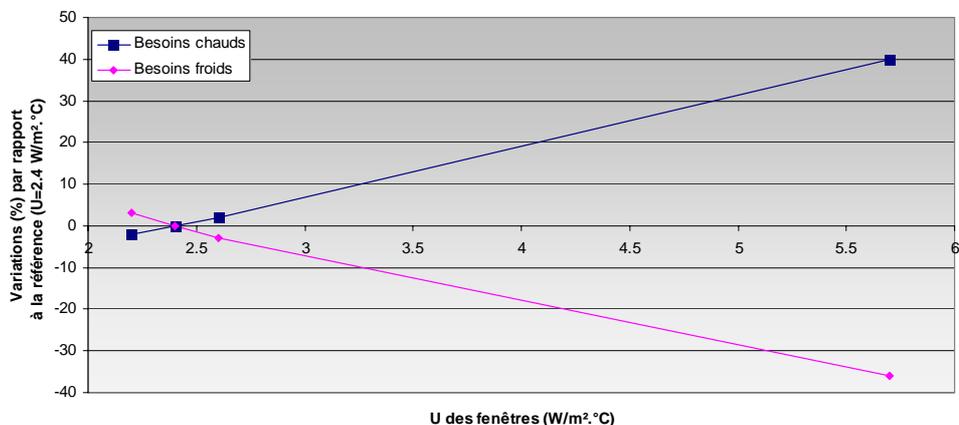
a) La performance thermique des ouvrants et le taux de vitrage

On sait que les besoins de chauffage sont très sensibles aux performances du vitrage. Un test de sensibilité permet de quantifier l'ampleur des variations des besoins en fonction de celles des taux et des conductances. Le coefficient moyen de conductivité thermique (ou conductance U) des ouvertures des différents ensembles bâtis oscille selon les hypothèses précédentes entre 2,2 et 3,3 W/m².°C. Le test de sensibilité des besoins a été réalisé, dans des conditions de climat rigoureux et très contrasté (Strasbourg), pour le type urbain 6.5 dont le taux de vitrage avoisine les 35%.

Tableau 6 : Propriété du type urbain 6.5

TYPE URBAIN	DESCRIPTION	IND / COL	PLAN MASSE	Date de construction	Emprise au sol nette (m ²)	Hauteur moyenne (Nbr de niveaux)	Surface de façade verticale (m ²)	périmètre de façade (ml)	U toiture W/m ² .°C	U Fenêtres W/m ² .°C	U Murs extérieurs W/m ² .°C	U planchers W/m ² .°C	% Vitrage sur la façade	Taux de renouvellement d'air Volumes/Heure
6.5	Habitat collectif discontinu à Beaugard(Pois sy)	COL		de 1968 à 1974	2525	4.86	10176	698	2.2	2.4	1,8	2.1	35	0,7

Figure 8 : Variations des besoins chauds et froids en fonction du U fenêtres.



Source: Elioth

Les variations de conductance des ouvrants évoluant dans un intervalle de 2.2 à 5.7 W/m².°C résultent sur une relation quasi linéaire entre les performances thermiques des parois vitrées et les besoins d'énergie nécessaires à la régulation thermique. On note, à partir d'une baisse des performances du vitrage, que les besoins en froid diminuent moins vite que n'augmentent les besoins en chauffage. Le passage d'un simple vitrage peu performant (U = 5,7 W/m².°C) à un double vitrage (U = 2,2W/m².°C) , soit une diminution de 12%, de la conductance conduit à une réduction de l'ordre de 40% des besoins de chauffage et à une augmentation quasi identique des besoins de climatisation.

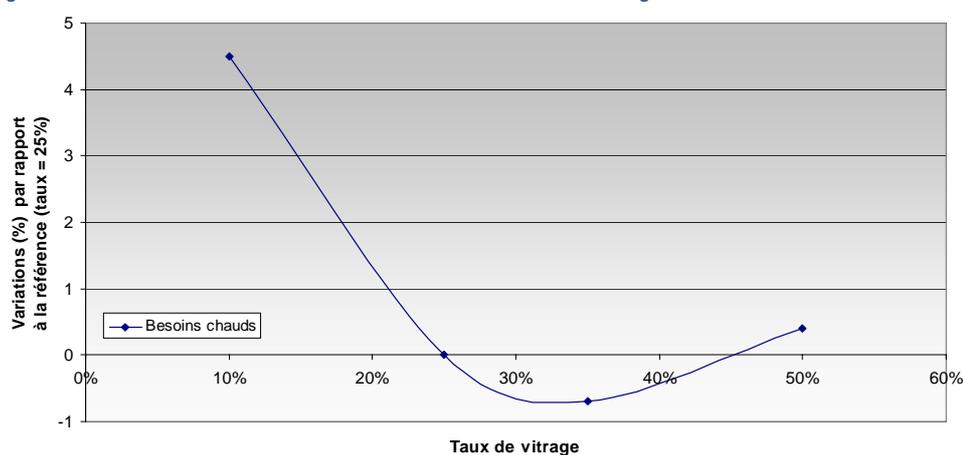
De façon analogue, il paraît intéressant de mesurer la sensibilité des besoins de chauffage ou de climatisation en fonction d'une variation du taux de vitrage. La part de ce matériau dans un bâtiment est en effet concernée par deux processus opposés : négativement à travers les déperditions de chaleur par conductivité, positivement à travers les apports calorifiques par rayonnement solaire. La part d'ouvertures dans les façades varie dans les divers ensembles bâtis retenus par cette recherche entre 11% pour les bâtis les plus « fermés » et 35% pour les plus « ouverts ». Ce test a été réalisé pour le type urbain 6.5 qui possède le taux de vitrage le plus élevé.

Tableau 7 : Propriété du type urbain 6.5

TYPE URBAIN	DESCRIPTION	IND/ COL	PLAN MASSE	Date de construction	Emprise au sol nette (m ²)	Hauteur moyenne (Nbr de niveaux)	Surface de façade verticale (m ²)	périmètre de façade (ml)	U toiture W/m ² .°C	U Fenêtres W/m ² .°C	U Murs extérieurs W/m ² .°C	U planchers W/m ² .°C	% Vitrage sur la façade	Taux de renouvellement d'air Volumes/Heure
6.5	Habitat collectif discontinu à Beauregard(Poissy)	COL		de 1968 à 1974	2525	4.86	10176	698	2.2	2.4	1.8	2.1	35	0,7

Les apports solaires, assez logiquement, varient de façon quasi linéaire avec la part de surface vitrée d'une façade. Ainsi, plus une enveloppe sera vitrée, plus la puissance de rayonnement solaire reçue sera élevée.

Figure 9 : Variations des besoins chauds en fonction du taux de vitrage.



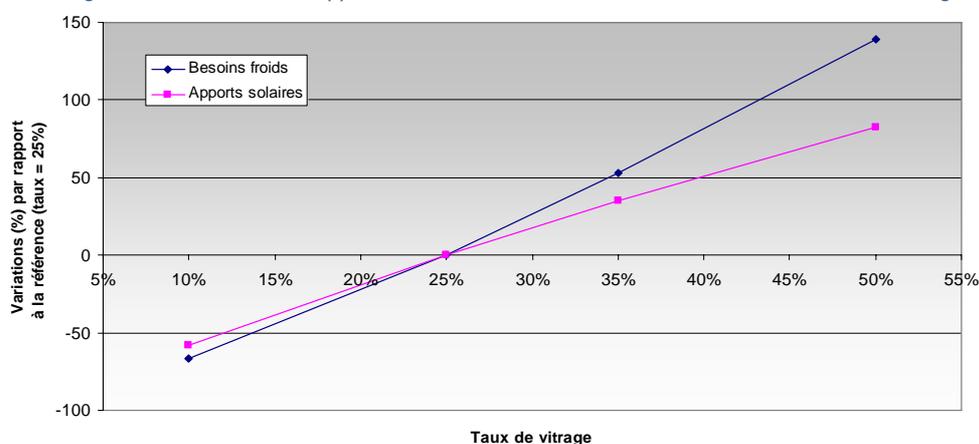
Source : Elioth

Les besoins en chauffage diminuent lorsque les taux de vitrage augmentent. Entre 25% et 35% de part vitrée d'une façade, les besoins sont compensés par les apports solaires, au-delà du seuil de 35%, l'équilibre entre les apports et les déperditions s'inverse : les déperditions deviennent trop importantes pour être contrebalancées par les apports solaires et engendrent un nouvel

alourdissement des charges. En d'autres termes, toute chose égale par ailleurs du point de vue des diverses propriétés d'un tissu urbain (compacité, isolation, température du sol, etc.), un bâtiment très largement vitré (au-delà de 35%) pourra être aussi performant qu'un bâtiment peu vitré, même si ce dernier n'optimise pas la captation du rayonnement solaire. Néanmoins, on peut envisager que, globalement, les gains énergétiques recueillis grâce aux surfaces vitrées progressent moins vite que les déperditions que ces dernières provoquent.

En revanche, ces remarques ne sont plus valables pour le refroidissement ou la climatisation : les besoins en froid croissent plus rapidement que les apports solaires et, au-delà de 35% de taux de vitrage, ils deviennent nettement supérieurs aux apports et mettent en évidence des processus de surchauffe.

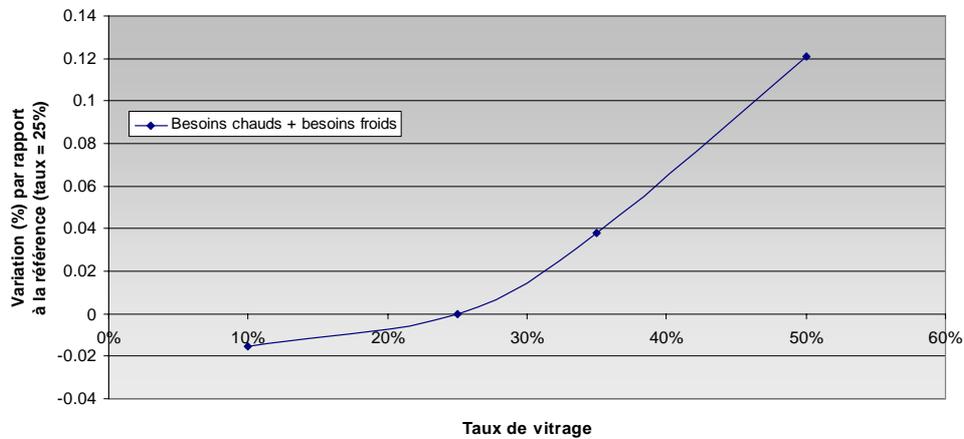
Figure 10 : Variations des apports solaires et des besoins froids en fonction du taux de vitrage.



Source : Elioth

Lorsqu'on additionne l'ensemble des besoins d'énergie nécessaire à la régulation thermique des bâtiments (à savoir chauffage et climatisation), on constate que ces derniers sont strictement croissants vis-à-vis du taux de vitrage. Il est important ici de noter que l'intensité de cette croissance devient significative à partir de 25% de part de surface vitrée. A partir de ce seuil, les besoins en chauffage augmentent notablement car les apports solaires, bien que progressant avec le taux de vitrage, ne permettent plus de compenser les déficits de l'enveloppe.

Figure 11 : Variations des besoins chauds et froids en fonction du taux de vitrage.



Source : Elioth

Ces tests démontrent enfin que les effets sur les apports solaires de la forme urbaine sont bien plus nuancés que ne le laisse supposer les débats sur la question. En milieu urbain dense, ces apports ne deviennent déterminants qu'à partir de parts de vitrage supérieures à 25 ou 30%. Or, dans les centres anciens, la typologie architecturale est associée à des façades qui dépassent rarement ces seuils de manière significative. Les apports solaires sont finalement plus décisifs dans les tissus récents pourvus de vitrages assez performants dont la taille dépasse les seuils de 35 à 40%. Finalement, les constructions les plus sensibles au rayonnement solaire sont plutôt celles s'inscrivant dans les typologies de la maison individuelle construite à partir de 1974 (type urbain 4.1)

b) le niveau d'isolation thermique des parois opaques

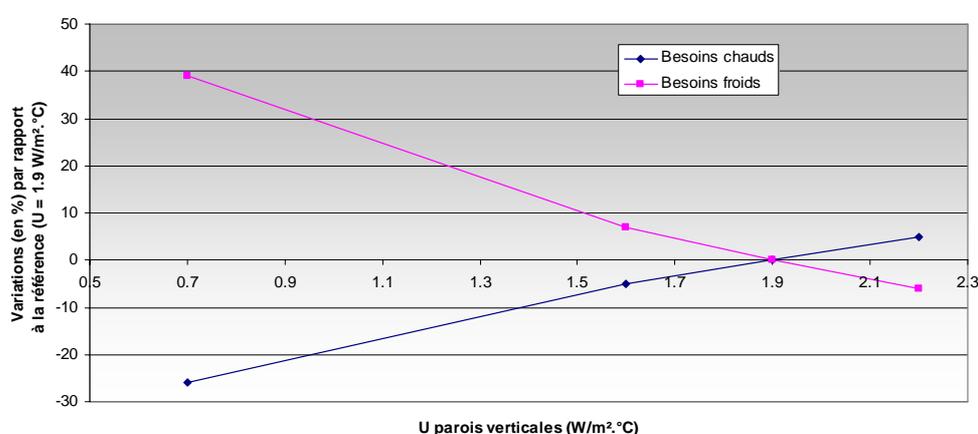
Même si cela peut paraître peu nécessaire, un test de sensibilité des variations des conductances des parois opaques peut fournir des informations intéressantes. Sachant que la conductance moyenne des parois extérieures des différents ensembles bâtis sélectionnés oscille entre 0,7 W/m².°C pour les plus isolés et 2,2 W/m².°C pour les moins performants, on a ici cherché à mesurer les effets d'une variation des niveaux d'isolation des bâtiments. Les tests ont été réalisés pour le type urbain 5.4.

Tableau 8 : Propriété du type urbain 5.4

TYPE URBAIN	DESCRIPTION	IND/ COL	PLAN MASSE	Date de construction	Emprise au sol nette (m ²)	Hauteur moyenne (Nbr de niveaux)	Surface de façade verticale (m ²)	périmètre de façade (ml)	U toiture W/m ² .°C	U Fenêtres W/m ² .°C	U Murs extérieurs W/m ² .°C	U planchers W/m ² .°C	% Vitrage sur la façade	Taux de renouvellement d'air Volumes/Heure
5.4	Habitat collectif continu bas à Paris, Porte de Champerret	COL		de 1915 à 1948	5284	8.58	27003	1049	1,6	2,8	1,9	1,5	32	0,9

Le type 5.4 possède un nombre de niveaux élevé mettant en lumière l'importance relative des parois verticales par rapport à la surface d'enveloppe. Si l'on compare les caractéristiques techniques de cette catégorie de bâti avec celles des autres types urbains, on s'aperçoit que les valeurs U de son enveloppe évoluent, comme son taux de vitrage (32%), dans une tranche supérieure ($1,5 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ à $2,8 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$). Appliqués au climat de Strasbourg, les besoins en chaud et en froid donne la Figure 12. On constate alors que la décroissance des besoins en chaud par rapport à la conductance des parois verticales opaques est quasi linéaire.

Figure 12 : Variations des besoins chauds et froids en fonction de la conductivité des parois.



Source : Elioth

c) Orientation du bâti

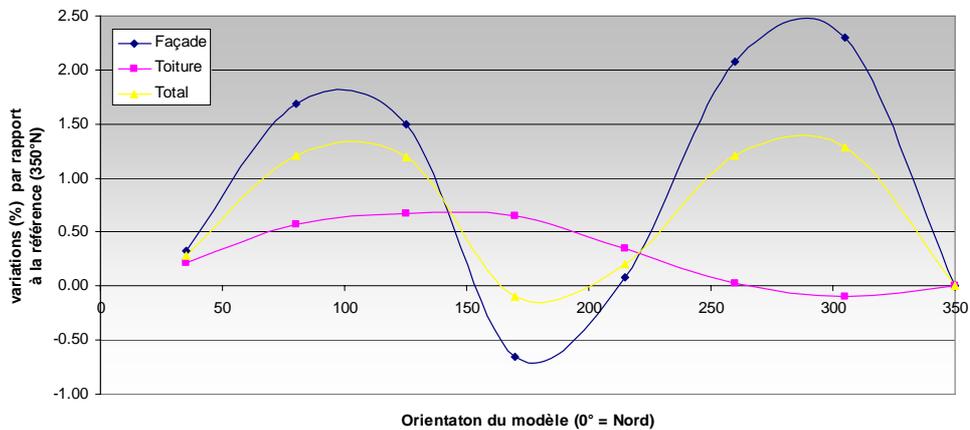
Des variations d'orientation d'un même type urbain induisent nécessairement des modifications en termes d'effets de masque. Le différentiel des gisements solaires est donc directement liés à la forme urbaine et à son orientation et impacte autant les besoins de chauffage, et de climatisation que les éventuelles productions d'énergie solaire électrique ou thermique. Les variations d'orientation mettent en lumière les effets de bords évoqués dans l'introduction de cette partie de la recherche. Un test de sensibilité a été réalisé pour le type 4.1 afin de mesurer l'ampleur des variations des besoins énergétiques face au rayonnement solaire.

Tableau 9 : Propriété du type urbain 4.1

TYPE URBAIN	DESCRIPTION	IND/ COL	PLAN MASSE	Date de construction	Emprise au sol nette (m²)	Hauteur moyenne (Nbr de niveaux)	Surface de façade verticale (m²)	périmètre de façade (m)	U toiture W/m².C	U Fenêtres W/m².C	U Murs extérieurs W/m².C	U planchers W/m².C	% Vitrage sur la façade	Taux de renouvellement d'air Volumes/Heure
4.1	Habitat individuel continu bas Cergy ville nouvelle	IND		de 1975 à 1981	3597	3.05	9017	986	0,6	2,6	1,1	1	25	0,9

d) Etude de sensibilité : Orientation du bâti

Figure 13 : Variations de l'énergie solaire reçue en fonction de l'orientation.



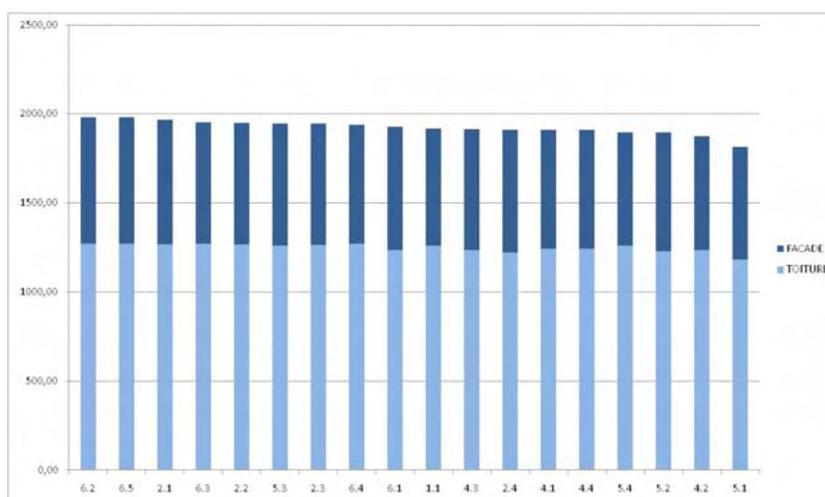
Source Elioth.

Le graphique ci-dessus montre que l'énergie solaire reçue par les façades verticales selon différentes orientations varie dans des proportions relativement faibles (3%). Les effets de masque sont en effet équivalents d'une orientation à une autre et produisent sur les façades un rayonnement relativement constant. De même, et ce constat est assez logique, l'énergie solaire reçue par les toitures reste à peu près identique pour toutes les orientations étudiées.

e) ANALYSE DES Gisements solaires

L'étude des gisements solaires disponibles en façade et sur les toitures pour chacun des types urbains confirme l'observation précédente. On remarque que les variations en fonction du type sont extrêmement faibles notamment sur les toitures. Même si le différentiel entre les apports solaires de chaque typologie urbaine est très réduit, on constate que l'habitat discontinu, qu'il soit collectif ou individuel, possède assez logiquement le gisement solaire le plus élevé à cause de la faiblesse des masques d'obstruction qui le caractérise. Les typologies profitant le moins du rayonnement solaire sont, aussi logiquement, les tissus les plus denses composés en îlot.

Figure 14 : Rayonnement solaire annuel reçue en toiture et en façade par type – unité : kWh/m²paroi.an.



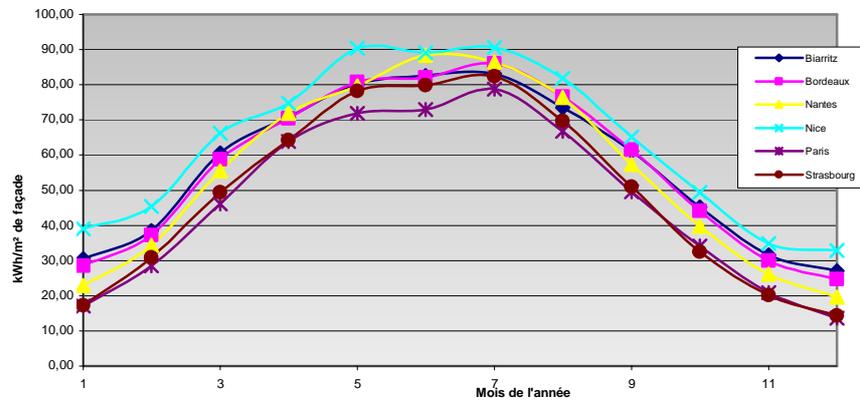
Source : Elioth

Les deux figures suivantes présentent l'énergie solaire mensuelle reçue par un mètre carré de paroi verticale et de toiture pour le type 4.3.

Tableau 10 : Propriété du type urbain 6.5

TYPE URBAIN	DESCRIPTION	IND / COL	PLAN MASSE	Date de construction	Emprise au sol nette (m ²)	Hauteur moyenne (Nbr de niveaux)	Surface de façade verticale (m ²)	périmètre de façade (ml)	U toiture W/m ² .°C	U Fenêtres W/m ² .°C	U Murs extérieurs W/m ² .°C	U planchers W/m ² .°C	% Vitrage sur la façade	Taux de renouvellement d'air Volumes/Heure
4.3	Habitat collectif continu bas à Le Vesinet	COL		de 1915 à 1948	2588	3.06	5349	582	1,6	2,8	1,9	1,5	32	0,9

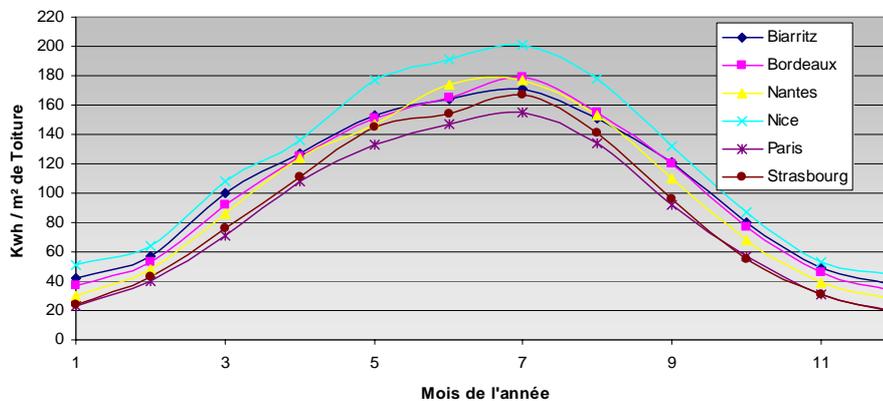
Figure 15 : Energie solaire reçue en façade.



Source: Elioth

On remarque, pour des climats très contrastés, que l'écart d'ensoleillement entre les valeurs extrêmes (Paris et Nice) est relativement constant au cours de l'année : en juillet la différence relative entre Paris et Nice est de l'ordre de 30% alors qu'en décembre, Nice reçoit 56% plus de rayonnement solaire que Paris.

Figure 16 : Energie solaire reçue en toiture.



Source: Elioth

2.3. SCENARII D'OCCUPATION ET APPORTS INTERNES

Les scénarii d'occupation permettent d'estimer les apports de chaleur (ou apports internes) entrant dans le calcul des besoins énergétiques. Ils dépendent de l'activité hébergée par les bâtiments. On recense ici l'ensemble des éléments et des postes contribuant à dégager de la chaleur à l'intérieur du logement et, de ce fait, à pondérer les besoins de chauffage.

a) Périodes d'occupation

On distingue ici les fonctions de l'habitat de celles dites d'activités. Les horaires d'occupation diffèrent entre les deux types de fonction de la manière suivante :

- pour la fonction activité, la tranche horaire d'occupation est comprise entre 9h00 et 19h00 et ce, 5 jours par semaine.
- la tranche horaire d'occupation d'un logement pendant la semaine est de 19h00-9h00. Les samedis et dimanches, l'occupation est considérée comme permanente. Concernant les équipements (électroménager, Hi-fi, etc...) la tranche horaire d'utilisation en semaine est 06H00-09H00 et 19H00-23H00 et, les samedis et les dimanches de 08H00-23H00

b) Eclairage

Energie Plus¹⁴ estime à 4 W/m² la puissance fournie en moyenne par l'éclairage sous forme de chaleur. Dans un logement, les éclairages pendant la période active diffusent environ 10 W/m². Cette période est définie à partir du moment où la luminosité naturelle est inférieure à 500 lux (en calcul approché). En ce qui concerne les bâtiments dédiés à une activité tertiaire, l'apport de chaleur par l'éclairage, plus important que pour l'habitat, est estimé à 16 W/m² pendant la période active.

L'expression employée pour approcher l'éclairage adoptée dans cette recherche ne tient pas compte des spécificités géométriques des bâtiments (notamment de la profondeur des pièces) mais permet, de manière approximative, de quantifier l'éclairage naturel disponible pendant l'année et, par induction, l'éclairage artificiel contribuant aux apports internes. Elle est de la forme suivante :

$$\text{Eclairage lumineux} = [(RG)/1367]^2 \times 49.98 - [39.83 \times RG / 1367 + 130] \times RD \times 0.03$$

Avec RG : Rayonnement Global et RD : Rayonnement Diffus

c) Equipements

Outre l'éclairage, les apports de chaleur proviennent des équipements électroménagers des ménages pour l'habitat et des équipements de bureautique ou de productique pour les bâtiments tertiaires. D'après TNS Sofres, le nombre moyen d'appareils de gros électroménager par foyer est proche de 6 (à l'exclusion des équipements informatiques et audiovisuels). On considère par convention que les équipements en période d'active dégagent 6 W/m² pour les logements et 10W/m² pour les locaux du tertiaire. En période d'inactivité, les apports internes sont estimés à 3 W/m² pour des deux types de bâtiments.

d) Apports occupants

Enfin, la présence humaine dans un local, apporte de la chaleur sensible (corps à 37°C) et de la chaleur latente (par production de vapeur d'eau à travers la respiration et la transpiration).

¹⁴ <http://www.energie-plus.com>

Considérant qu'une personne dégage une puissance moyenne de 100W, les apports liés à l'occupation sont estimés à 3 W/m² pour les logements et 6 W/m² pour les bâtiments tertiaires. On considère en effet que la densité d'occupation (surface disponible par occupant) est plus grande dans le logement que pour les zones d'activité (35m² pour le logement, 12.5 m² pour les bureaux).

e) Thermostats :

Dans les modélisations qui suivent, on considère que le contrôle de la température de consigne est réalisé pour atteindre 21°C en saison froide et 25°C (en limite haute) en saison chaude pour les deux types de bâtiment .

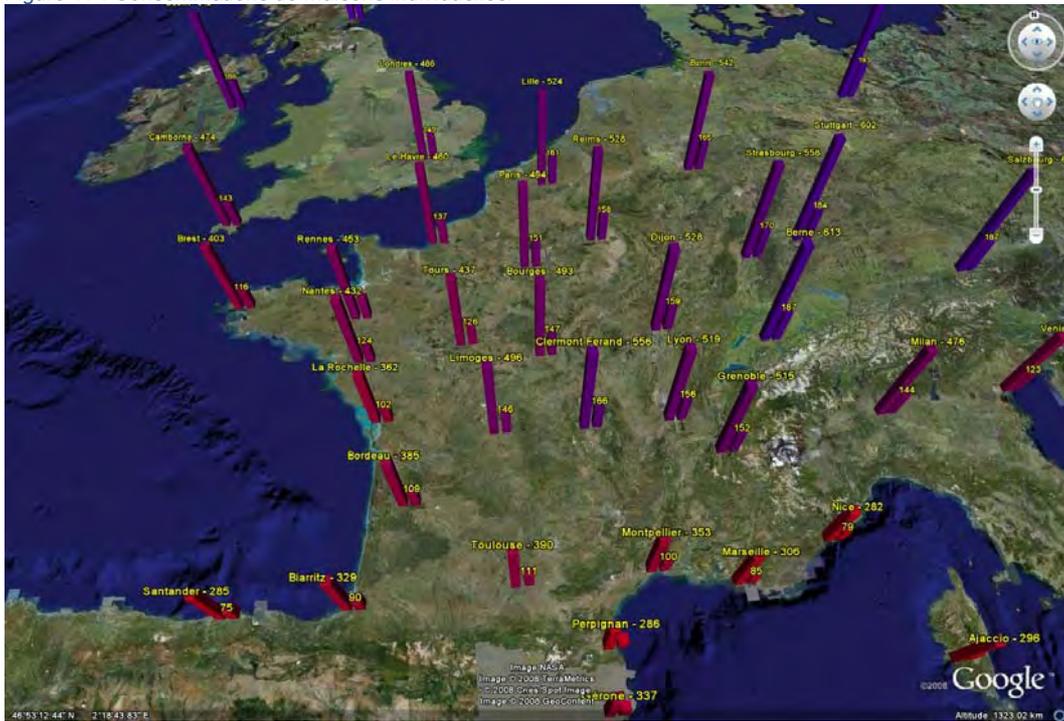
2.4.HYPOTHESES CLIMATIQUES ET TEMPERATURES DU SOL

a) Des zones climatiques réglementaires aux températures horo-saisonniers de 6 villes métropolitaines

Affiner l'indicateur climatique basé habituellement sur le découpage en 3 zones climatiques (H1, H2, H3) permet de passer des calculs réglementaires statiques à des modélisations dynamiques bien plus fines. Remplacer les quantités DH (à savoir la somme des écarts de température entre l'air extérieur et l'air intérieur) par les variations horo-saisonniers permet de disposer des courbes de charges pour tous les instants de l'année et de comparer ainsi, outre les besoins énergétiques globaux, la structure de ces derniers dans le temps. La discrétisation du territoire en plusieurs points permet enfin de repérer les spécificités climatiques locales (cf. chap. V.2.4).

Le graphique suivant représente les différentiels locaux entre consommations d'une maison individuelle dans chacune des 20 villes que l'outil CLIMELIOTH prend pour références.

Figure 17 : Consommations de maisons individuelles.



Source: Elioth

Le spectre des consommations dans ces villes françaises s'étend de 282 kWh/m²/an pour Nice à 558 kWh/m²/an pour Strasbourg. Pour réduire les hypothèses de calcul tout en demeurant représentatif de la diversité des conditions climatiques du territoire, on choisit ici de réaliser des modélisations pour 6 villes au climat très contrasté :

- Nice (282 kWh/m².an)
- Biarritz (329 kWh/m².an)
- Bordeaux (385 kWh/m².an)
- Nantes (432 kWh/m².an)
- Paris (494 kWh/m².an)
- Strasbourg (558 kWh/m².an)

b) Etude de sensibilité : température du sol

Selon le type de tissu urbain, il est instructif d'examiner le poids des déperditions de chaleur par le sol. En effet, que l'on soit dans un tissu compact ou étalé, la part d'enveloppe en contact avec le sol joue un rôle plus ou moins déterminant dans l'ampleur des besoins de chauffage. Il s'agit ici de savoir à quel point les besoins de chauffage ou de climatisation sont sensibles à des hypothèses relatives à la température du sol. Ce test a été réalisé pour le type urbain 1.1. (habitat individuel

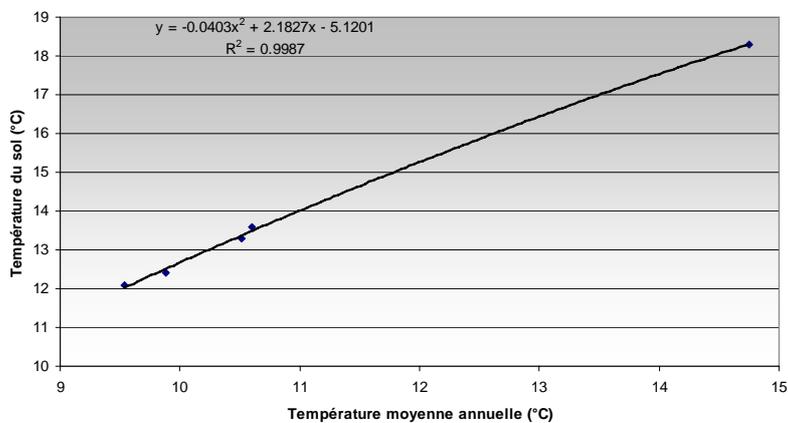
bas) sur la base des températures horo-saisonniers METEONORM¹⁵ car il possède une importante emprise au sol et un faible niveau d'isolation (à ce titre, il peut être considéré comme un cas extrême).

Tableau 11 : Propriété du type urbain 1.1

TYPE URBAIN	DESCRIPTION	IND./COL.	PLAN MASSE	Date de construction	Emprise au sol nette (m ²)	Hauteur moyenne (Nbr de niveaux)	Surface de façade verticale (m ²)	périmètre de façade (ml)
1.1	Habitat individuel à Colombet	IND		de 1915 à 1948	5835	2.23	14373	2149

Les températures du sol sont déterminées à partir de l'extrapolation des données disponibles des villes de Macon, Limoges, Nancy, Trappes et Nice. Cette extrapolation est réalisée sur la base d'une corrélation empirique entre la température du sol et la température moyenne. C'est ce qu'illustre le graphique suivant :

Figure 18 : Corrélation entre température moyenne annuelle et température du sol.



Source: MétéoNorm, Elioth

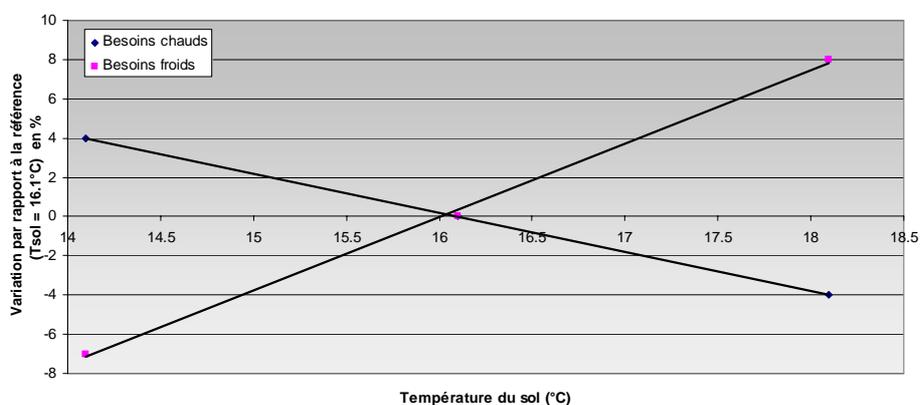
¹⁵ Meteonorm est une base de données climatiques relatives à 7 756 stations réparties dans le monde entier. Les estimations d'exposition solaire, la température ainsi que d'autres paramètres météorologiques sont disponibles par jour et par tranche horaire. Ce logiciel est développé par la société suisse Meteotest.

L'extrapolation donne pour les 6 villes choisies :

- Nice : 18,3 °C
- Biarritz : 17,2 °C
- Bordeaux : 16,1 °C
- Nantes : 14,9 °C
- Paris : 13,8 °C
- Strasbourg : 12,4 °C

La figure ci-dessous montre qu'une variation de 2°C de la température du sol engendre des variations de l'ordre de 4 % des besoins de chauffage. Cette relation quasi linéaire montre la relative faiblesse des effets du sol sur les déperditions totales des bâtiments.

Figure 19 : Consommations en fonction de la température du sol.



Source: Elioth.

3. ANALYSE DES BESOINS CHAUDS ET FROIDS PAR TYPOLOGIE

Récapitulons ici l'ensemble des variables de forme urbaine supposées agir sur le bilan énergétique des bâtiments ainsi que les paramètres exogènes à la forme urbaines entrant en compte dans le calcul des besoins énergétiques.

Tableau 12 : Caractéristiques des types de tissu urbain

TYPE URBAIN	1.1	2.1	2.2	2.3	2.4	4.1	4.2	4.3	4.4	5.1	5.2	5.3	5.4	6.1	6.2	6.3	6.4	6.5
DESCRIPTION	Habitat individuel à Colombet	Habitat individuel identique à Saint Nom la Breteche	Habitat individuel identique à Cergy ville nouvelle	Habitat individuel identique à Cergy ville nouvelle	Habitat individuel identique à Colombet	Habitat individuel continu bas Cergy ville nouvelle	Habitat collectif continu bas à Rueil-Malmaison	Habitat collectif continu bas à Le Vesinet	Habitat collectif continu bas à Poissy	Habitat collectif continu haut à Levallois	Habitat collectif continu haut à Boulogne-Billancourt	Habitat collectif continu bas à Mantes-la-Jolie	Habitat collectif continu bas à Paris, Porte de Champerret	Habitat collectif discontinu à Cergy ville nouvelle	Habitat collectif discontinu à Cergy ville nouvelle	Habitat collectif discontinu à Suresnes	Habitat collectif discontinu à Le Chesnay	Habitat collectif discontinu à Beauregard (Poissy)
IND/COL	IND	IND	IND	IND	IND	IND	COL	COL	COL	COL	COL	COL	COL	COL	COL	COL	COL	COL
PLAN MASSE																		
Date de construction	de 1915 à 1948	de 1968 à 1974	de 1968 à 1974	de 1968 à 1974	de 1968 à 1974	de 1975 à 1981	de 1915 à 1948	de 1915 à 1948	av. 1914	av. 1914	de 1915 à 1948	de 1949 à 1967	de 1915 à 1948	de 1949 à 1967	de 1975 à 1981	de 1915 à 1948	de 1975 à 1981	de 1968 à 1974
Empreinte au sol nette (m²)	5835	9228	4225	3247	3830	3597	6413	2588	2893	4106	4798	2533	5284	4587	1427	1969	4711	2525
Hauteur moyenne (Nbr de niveaux)	2.23	2.4	1.59	2.2	1.76	3.05	4.37	3.06	3.18	5.19	4.89	3.73	8.68	4.15	3.92	4.89	5.88	4.86
Surface de façade verticale (m²)	14373	17255	7650	6560	5947	9017	17467	5349	7220	14741	15648	6715	27003	10528	3385	6441	16231	10176
périmètre de façade (m)	2149	2396	1609	994	1126	986	1332	582	756	946	1066	600	1049	845	288	439	920	698
U toiture W/m².°C	1,5	2	2	0,6	2	0,6	1,6	1,6	1,9	1,9	1,6	1,6	1,6	1,6	0,7	1,6	0,7	2,2
U Murs extérieurs W/m².°C	1,8	1,8	1,6	0,7	1,6	1,1	1,9	1,9	2	2	1,9	2,2	1,9	2,2	1,8	1,9	1,8	1,8
U Fenêtres W/m².°C	2,8	2,3	2,3	2,2	2,3	2,6	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	3,3	2,8	3,3	2,4
U planchers W/m².°C	1,5	2,1	2,1	0,7	2,1	1	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,8	1,5	1,6	1,8	1,5	1,8	2,1
% Vitrage sur la façade	24	27	27	25	27	25	32	32	11	11	32	26	32	26	30	32	30	35
Taux de renouvellement d'air Volumes/Heure	1	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	1,1	1,1	0,9	0,9	0,9	0,9	0,7	0,9	0,7	0,7

Source : Elioth

Tableau 13 : Synthèse des besoins chauds froids, apports solaires par type urbain

TYPE URBAIN	HABITAT COLLECTIF DISCONTINU					HABITAT COLLECTIF CONTINU (Ilot)							HABITAT INDIVIDUEL DENSE			HABITAT INDIVIDUEL EPARS		
	6.1	6.3	6.5	6.2	6.4	4.4	5.3	5.1	4.3	5.2	4.2	5.4	2.4	4.1	2.3	1.1	2.2	2.1
DESCRIPTION	Habitat collectif discontinu à Cergy ville nouvelle	Habitat collectif discontinu à Suresnes	Habitat collectif discontinu à Beauregard (Poissy)	Habitat collectif discontinu à Cergy ville nouvelle	Habitat collectif discontinu à Le Chesnay	Habitat collectif continu bas à Poissy	Habitat collectif continu bas à Mantes-la-Jolie	Habitat collectif continu haut à Levallois	Habitat collectif continu bas à Le Vesinet	Habitat collectif continu haut à Boulogne-Billancourt	Habitat collectif continu bas à Rueil-Malmaison	Habitat collectif continu bas à Paris, Porte de Champerret	Habitat individuel identique à Colombet	Habitat individuel continu bas Cergy ville nouvelle	Habitat individuel identique à Cergy ville nouvelle	Habitat individuel à Colombet	Habitat individuel identique à Cergy ville nouvelle	Habitat individuel identique à Saint Nom la Breteche
IND/COL	COL	COL	COL	COL	COL	COL	COL	COL	COL	COL	COL	COL	IND	IND	IND	IND	IND	IND
PLAN MASSE																		
Date de construction	de 1949 à 1957	de 1915 à 1948	de 1968 à 1974	de 1975 à 1981	de 1975 à 1981	av. 1914	de 1949 à 1967	av. 1914	de 1915 à 1948	de 1915 à 1948	de 1915 à 1948	de 1915 à 1948	de 1968 à 1974	de 1975 à 1981	de 1975 à 1981	de 1915 à 1948	de 1968 à 1974	de 1968 à 1974
U bat W/m².°C	2,358	2,168	2,01	2,25	2,25	2,088	2,356	2,088	2,188	2,158	2,168	2,168	1,789	1,475	1,075	2,04	1,789	1,789
Besoins chauds kWh/m².SHON.an	76,76	73,81	67,99	55,23	51,59	102,31	90,12	86,29	85,75	75,86	75,65	69,39	120,46	59,23	52,07	128,35	139,43	98,68
CLASSEMENT	10	7	5	3	1	16	13	12	11	9	8	6	16	4	2	17	18	14
Besoins froids kWh/m².SHON.an	16,37	23,22	30,34	20,34	22,4	17,97	18,28	18,12	21,96	25,86	21,35	32,53	14,79	23,59	33,8	18,59	17,42	16,48
CLASSEMENT	2	13	16	9	12	5	7	6	11	16	10	17	1	14	18	8	4	3
Apports solaires kWh/m².SHON.an	69,52	98,16	134,78	88,23	80,67	89,25	87,31	76,7	99,34	96,25	86,64	82,36	111,87	93,53	106,48	117,08	139,03	99,87
CLASSEMENT	16	8	2	12	16	11	13	17	7	9	14	15	4	10	5	3	1	6

Source : Elioth

Signalons, en première analyse, que l'énergie nécessaire au chauffage d'un logement est presque toujours 4 fois supérieure à celle que l'on devrait mobiliser pour la climatisation ou le rafraîchissement (respectivement 83 kWh/m².SHON et 21 kWh/m².SHON).

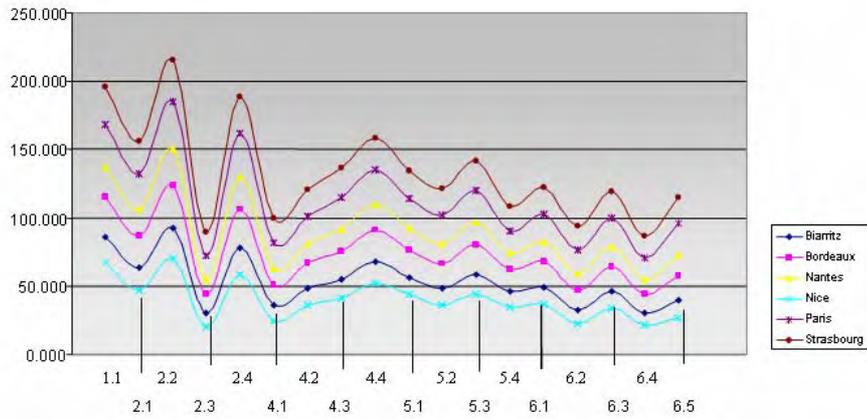
Qu'il s'agisse de logement individuel ou collectif, les tissus urbains postérieurs à la réglementation thermique de 1974 se distinguent clairement des autres types par la faiblesse de leurs besoins en chaud (en moyenne 55 kWh/m²SHON.an).

Les types urbains construits avant 1974, non ou très mal isolés, composés d'un habitat individuel épars se caractérisent par des besoins de chauffage allant du simple au double par rapport aux bâtiments respectant une réglementation thermique, soit entre 98 et 140 kWh/m².an. Les besoins de l'habitat individuel continu sont quant à eux bien moins importants et vont de 52 kWh.m².an pour les types les mieux isolés à 120 kWh/m²SHON.an.

Quant aux besoins de climatisation ou de refroidissement, les choses peuvent être considérées comme inversées : les formes urbaines nécessitant une grande quantité d'énergie pour le chauffage sont celles qui exigent le moins d'énergie pour le rafraîchissement. Les formes urbaines composées d'habitat individuel épars nécessitent par exemple un peu moins de 17 kWh/m².an en moyenne alors qu'elles font partie des plus énergivores en chauffage. Signalons qu'il est d'autant plus difficile de procéder à des subdivisions en classes énergétiques des autres types que les besoins en froid dépendent d'un ensemble complexe de variables relatives aux bâtiments et au climat. De même, les types urbains respectant la réglementation thermique de 1974 se détachent par de faibles besoins en chaud, cette distinction est moins évidente pour leurs besoins en froid. Ceux-ci oscillent entre 23 kWh.m².an et 33 kWh.m².an et sont relativement proches qu'il s'agisse d'habitat individuel dense ou de collectif discontinu. Notons enfin que l'habitat individuel épars est le type urbain le plus « contrasté ». Il présente les valeurs extrêmes tant en besoins de chauffage qu'en besoins de climatisation.

Il est intéressant de remarquer que les tissus possédant les gisements solaires les plus significatifs sont ceux qui, paradoxalement, appellent le plus d'énergie pour le chauffage : les types urbains accueillant le mieux le rayonnement solaire (entre 100 et 117 kWh.m².an) sont les types d'habitat individuel épars (1.1, 2.1, 2.2 mais aussi le type 2.4 légèrement plus dense) ceux-là même qui exigent parmi les besoins en chaud les plus importants (soit autour de 120 kWh/m².an). Tous ces types qui partagent les mêmes propriétés énergétiques (forts apports solaires, forts besoins chauds, faibles besoins froids) font partie de l'habitat individuel.

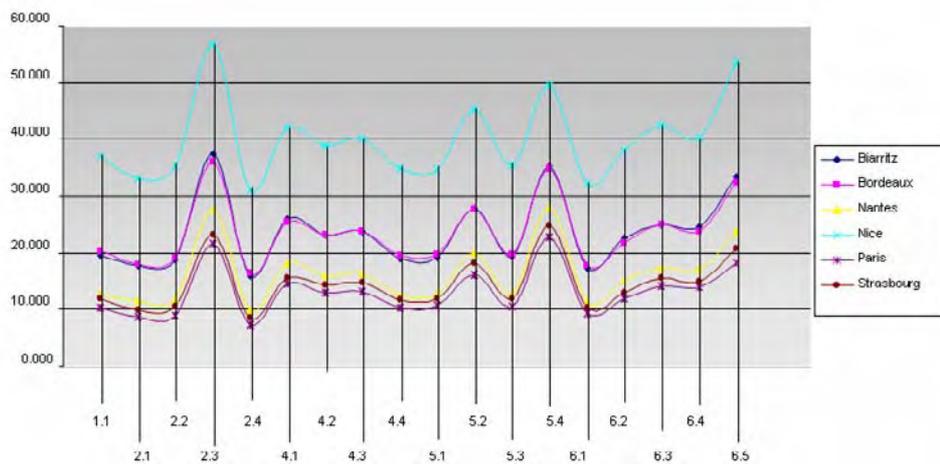
Figure 20 : Besoins Chauds selon le type et la localisation



Source Elioth

On remarque que tous les types réagissent de la même manière aux changements des conditions climatiques. Le graphique ci-dessus représente les besoins chauds obtenus par simulations thermiques.

Figure 21 : Besoins Froids (kWh/m² SHON .an) selon le type et la localisation..



Source : Elioth

L'ensemble des éléments mis en évidence dans cette partie montrent que les déterminants de formes urbaines, en termes énergétiques, sont bien plus complexes que ne le laissent entendre les débats controversés sur la question. Il faut distinguer ici deux problématiques essentielles dans ce

débat. D'une part, la question de la performance énergétique des tissus urbains en termes d'analyse scientifique : c'est la posture que nous avons tenue dans cette partie. Il s'agit alors de mesurer, sur la base de modélisations et en s'interdisant de simplifier à outrance la description des tissus urbains, combien chaque dimension du tissu urbain, qu'elle concerne la morphologie ou le mode constructif et architectural du bâti, contribue dans toute leur mesure au bilan énergétique. Lorsqu'on considère un tissu urbain comme un système complexe combinant les éléments de formes comme de matériaux, on constate que ce sont les interactions entre variables entrant dans le calcul énergétique qui établissent le bilan global et non pas uniquement un seul de ses éléments. C'est sur la base d'une telle affirmation que nous avons pu montrer combien la question des apports solaires était tributaire des niveaux d'isolation du bâti, des taux de vitrage et des effets de masque et non pas de la seule dimension morphologique.

Le débat relatif aux déterminants morphologiques actifs en termes énergétiques concerne, d'autre part, la question de l'efficacité énergétique dans le cadre du projet urbain. La question opérationnelle, et non plus analytique, revient à identifier les leviers disponibles à l'échelle urbaine pour atteindre des cibles performanciennes du bâti. Dans ce cadre, l'isolement de la dimension morphologique possède un sens opératoire dicté par la recherche d'un optimum sur un ou plusieurs éléments du projet : quel prospect maximise le rayonnement solaire ? A quel taux de vitrage rationalise-t-on le bilan de chauffage et de climatisation ? etc. Ces questions, très distinctes de la première, sont souvent confondues avec cette dernière alors qu'elle correspond à une tout autre problématique, celle du bâtiment neuf plutôt que celle de l'analyse du bâti existant.

Tableau 14 : Synthèse des caractéristiques des types urbains, besoins froids, chauds et gisements solaires.

DESCRIPTION	Habitat collectif discontinu à Cergy ville nouvelle	Habitat collectif discontinu à Beauvais (Pcisy)	Habitat individuel identique à Saint Nom le Breton	Habitat collectif discontinu à Surasnes	Habitat individuel identique à Cergy ville nouvelle	Habitat collectif continu bas identique à Mantes-la-Jolie	Habitat individuel identique à Cergy ville nouvelle	Habitat collectif discontinu à Le Chesnay	Habitat collectif discontinu à Cergy ville nouvelle	Habitat individuel à Colombes	Habitat collectif continu bas à Le Vésinet	Habitat individuel identique à Coarbecq	Habitat individuel continu bas Cergy ville nouvelle	Habitat collectif continu bas à Pissy	Habitat collectif continu bas à Paris Porte de Champerret	Habitat collectif continu haut à Boulogne-Billancourt	Habitat collectif continu bas à Rueil-Malmaison	Habitat collectif continu haut à Levallois
TYPE URBAIN	6.2	6.5	2.1	6.3	2.2	5.3	2.3	6.4	6.1	1.1	4.3	2.4	4.1	4.4	5.4	5.2	4.2	5.1
IND/COL	COL	COL	IND	COL	IND	COL	IND	COL	COL	IND	COL	IND	IND	COL	COL	COL	COL	COL
PLAN MASSE																		
Date de construction	de 1973 à 1981	de 1988 à 1974	de 1988 à 1974	de 1915 à 1948	de 1988 à 1974	de 1949 à 1987	de 1988 à 1974	de 1975 à 1981	de 1949 à 1987	de 1915 à 1948	de 1915 à 1948	de 1988 à 1974	de 1975 à 1981	av. 1914	de 1915 à 1948	de 1915 à 1948	de 1915 à 1948	av. 1914
Emprise au sol (m²)	1427	2525	9228	1989	4225	2533	3247	4711	4887	5935	2588	3830	3597	2893	5254	4798	5413	4108
Hauteur moyenne (Nbr. d'étages)	3.92	4.86	2.4	4.89	1.59	3.73	2.2	5.35	4.15	2.23	3.08	1.76	3.05	3.18	8.58	4.89	4.37	5.19
Surface de façade verticale (m²)	3385	10176	17255	6441	7650	87.5	6590	16231	10528	14373	5349	5947	9017	7220	27003	15846	17467	14741
paramètre de façade (m)	238	698	2396	439	1609	600	944	920	845	2149	582	1126	986	756	1049	1056	1332	946
U (toiture) Wm².C	0.7	2.2	2	1.6	2	1.8	0.6	0.7	1.8	1.5	1.6	2	0.8	1.9	1.6	1.6	1.6	1.9
U Murs extérieurs Wm².C	1.8	1.8	1.6	1.9	1.6	2.2	0.7	1.8	2.2	1.8	1.9	1.6	1.1	2	1.6	1.9	1.9	2
U Fenêtres Wm².C	3.3	2.4	2.3	2.8	2.3	2.8	2.2	3.3	2.8	2.8	2.8	2.3	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8
U planchers Wm².C	1.8	2.1	2.1	1.5	2.1	1.6	0.7	1.8	1.6	1.5	1.5	2.1	1	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
% Vitrage sur la façade	30	35	27	32	27	28	25	30	26	24	32	27	25	11	32	32	32	11
Taux de renouvellement d'air	0.7	0.7	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.7	0.9	1	0.9	0.9	0.9	1.1	0.9	0.9	0.9	1.1
Volants/steurs																		
Besoins d'énergie pour la régulation thermique																		
Besoins chauds MWh/m²/an	55.23	67.99	98.05	73.81	139.43	90.12	52.07	51.59	76.76	128.95	85.75	120.46	59.23	02.31	69.39	76.86	76.65	86.29
CLASSEMENT	3	5	14	7	16	13	2	1	10	17	11	16	4	15	6	9	8	12
Besoins froids MWh/m²/an	20.34	30.24	16.48	23.22	17.42	18.28	35.80	22.40	16.37	18.59	21.95	14.79	23.58	17.97	32.53	25.95	21.35	18.12
CLASSEMENT	9	16	3	13	4	7	18	12	2	8	11	1	14	5	17	15	10	6
Gisements solaires MWh/m²/an																		
TYPE URBAIN	6.2	6.5	2.1	6.3	2.2	5.3	2.3	6.4	6.1	1.1	4.3	2.4	4.1	4.4	5.4	5.2	4.2	5.1
TOTALE	1288.17	1288.17	1267.46	1288.17	1286.91	1257.15	1281.43	1288.17	1233.98	1258.88	1234.08	1220.12	1242.81	1240.73	1258.08	1227.15	1232.82	1181.52
CLASSEMENT	2	4	5	3	6	10	7	1	14	8	13	17	11	12	9	16	15	18
FAÇADE	712.92	712.11	698.21	684.53	691.30	689.28	683.05	670.52	692.03	658.42	680.86	691.24	688.25	687.32	638.28	687.82	639.74	631.35
CLASSEMENT	1	2	3	7	1	6	8	11	4	15	10	5	12	14	17	13	18	16

Source : Elioth

IV. FORME URBAINE, TRANSPORT ET MOBILITE QUOTIDIENNE DES MENAGES

[¹⁶]

Ce chapitre tente de mettre en évidence un éventuel lien entre forme urbaine et déplacements au sein du tissu urbain et de quantifier l'impact énergétique de ce lien, ce dernier pouvant être représenté par la chaîne logique suivante :

Les questions auxquelles cette partie de la recherche doit répondre peuvent être formulées comme suit :

- 1 : Existe-t-il un lien entre la forme urbaine et l'offre d'infrastructures de transport et, si oui, lequel?
- 2 : Quel lien entre cette offre, la forme du tissu et la la mobilité des habitants d'un tissu ?
- 3 : Quel bilan énergétique découle de cette mobilité ?

L'intérêt du passage par des données intermédiaires d'offre de transport est double. D'abord son lien avec la mobilité a déjà fait l'objet d'études. Ensuite ces données intermédiaires vont être de nouveaux leviers au moment de scénariser.

Précisons que si le lien numéro 3 est avéré et quantifiable par des méthodologies existantes (type COPERT), les liens 2 et surtout 1 sont moins formalisés, voire hypothétiques.

La relation 2 étant le cœur de ce travail c'est celle-ci qui nous occupe en priorité depuis le lancement de la recherche et que nous allons développer ici.

On ne traite que des déplacements réguliers de personnes, c'est-à-dire qu'on exclut de notre étude le transport de marchandises et les déplacements exceptionnels (liés au tourisme par exemple). Ces déplacements relèvent de différents motifs dont voici une liste ne prétendant pas à l'exhaustivité : Domicile – Travail, Affaires professionnelles, Etude, Loisirs, Achats, Affaires personnelles.

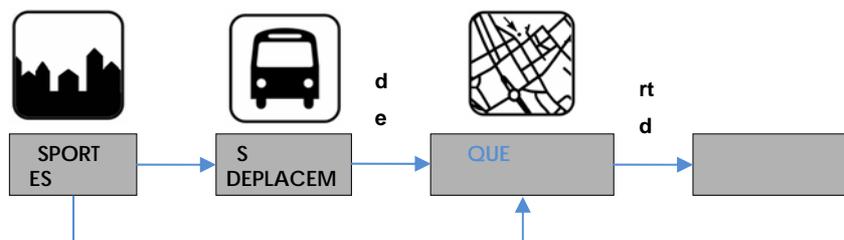
1. ARCHITECTURE DU MODELE ET OBJET D'ETUDE

Ce projet de recherche traite la prospective énergétique en retenant pour unique variable dans le temps la forme urbaine. Ce choix implique de ne rentrer dans aucune autre considération, en particulier les considérations socioéconomiques. Dès lors les questions d'âge, de catégorie socioprofessionnelle ou autres revenus des ménages ne constituent pas des paramètres.

¹⁶ Rédacteurs de tout le chapitre L. Rimmel, D. Joliton.

Par ailleurs la portée nationale de l'étude interdit de mettre en œuvre des modèles désagrégés nécessitant une connaissance fine des réseaux de transport et de la situation géographique des acteurs du déplacement. Ce type de modèle n'est en rien adapté.

Figure 22 : Illustration de la démarche générale.



Il s'agit donc à partir des quelques études statistiques ayant porté sur la forme urbaine de dégager les paramètres clés qui permettent de décrire les déplacements urbains grâce à un modèle mathématique. Plus concrètement, on s'attache à créer des règles mathématiques liant des paramètres de la forme urbaine à des données de description des déplacements en veillant à pouvoir agréger ces relations pour en faire un modèle complet.

Cette recherche de règles se base sur l'usage de données statistiques qui, croisées entre elles et traitées par informatique (grâce au logiciel Microsoft Excel en général), permettent de faire ressortir des corrélations formalisées par des équations mathématiques.

Cette recherche est totalement dépendante de l'existence et de l'accès à des données statistiques pertinentes. Récolter ces données a de fait été une des tâches les plus ardues de ce travail et l'absence de certaines données n'a pour l'instant pas pu être palliée.

Notons que le choix assumé de ne prendre que des paramètres de forme urbaine entraîne des simplifications fortes qui doivent être prises en compte pour exploiter les résultats de l'étude. Il ne s'agit en rien d'une prévision, l'exercice vise bien plus à déterminer le poids du levier de forme urbaine dans la lutte contre les émissions de gaz à effet de serre.

1.1. LE DETAIL DES DEPLACEMENTS

Décrire les déplacements implique la connaissance de trois paramètres : le nombre de déplacements, la distance des déplacements, le mode de transport utilisé. Autrement dit, il nous faut connaître les flux, les distances qui s'y rapportent et les parts modales.

Le territoire d'étude étant la France métropolitaine, on choisit comme maille de base la commune. C'est en effet l'échelle la plus fine à laquelle existent des données statistiques en quantité.

Le modèle cherche à remplir la matrice suivante :

Tableau 15 : Matrice de description des déplacements.

Commune départ	Commune arrivée	Nombre de déplacements	Distances moyennes	Parts modales
C1	C1			
C1	C2			
C1	C3			
C2	C1			
C2	C2			
...	...			

Source : *Energies Demain*

Et ceci à partir de paramètres de forme urbaine uniquement.

On a donc mis en place trois modules différents : un module de détermination des flux, un de détermination des distances et enfin un module de détermination des parts modales.

Pour chacun de ces modules, les résultats et les paramètres sont différents selon le motif de déplacements. L'usage des transports en commun pour faire des achats est très limité, il n'en n'est pas de même lorsque le but d'un déplacement est de se rendre au travail par exemple. La part modal diffère d'un motif de déplacement à un autre, en témoignent les données statistiques:

Tableau 16 : Parts modales selon deux motifs dans l'aire métropolitaine lyonnaise.

mode \ motif	travail	achat	rapport
2 roues	4%	1%	400%
TC	14%	7%	200%
marche	11%	36%	31%
VP	71%	56%	127%

Source : *Résultats de l'Enquête ménages Déplacements 2006 de l'aire métropolitaine lyonnaise*

On n'applique pas des règles identiques pour des motifs de déplacements différents : à chaque motif correspond un modèle différent.

La question qui se pose n'est pas de savoir sur quel motif travailler en priorité mais sur quel motif a-t-on les moyens de travailler ? La disponibilité de données est, comme on l'a déjà dit, primordiale dans ce projet. Voici les données auxquelles nous avons accès :

- La base « communes...Mobilités Travail » du recensement de 1999 édité par l'INSEE¹⁷

¹⁷ INSEE : institut national de la statistique et des études économiques

Extraite du recensement 99, cette base regroupe des données exhaustives des déplacements des français au motif travail sur un jour de la semaine à l'échelle de la commune avec des détails sur le mode de transport utilisé, le sexe, l'âge, la catégorie socioprofessionnelle et l'activité économique du travailleur.

- Les chiffres clés des enquêtes ménages déplacements méthode standard CERTU, principaux résultats des enquêtes réalisées entre 1976 et 2002

« L'enquête ménages déplacements (EMD) « méthode standard Certu » constitue l'un des outils essentiels à la réalisation d'études de déplacements. Sa méthode strictement encadrée et contrôlée permet d'obtenir des données objectives, fiables et comparables dans le temps ou dans l'espace. Les données exploitées ici sont des tableaux présentant les principaux résultats des 22 dernières enquêtes, conformes à la « méthode standard » du CERTU, réalisées de 1992 à 2000 et intègre, lorsqu'il y a lieu, les données des enquêtes antérieures. »

-La base Transports collectifs urbains (données 1995 – 2004) du CERTU

« Cette base présente les résultats de l'enquête annuelle sur les transports collectifs urbains menée en collaboration avec les Centres d'Études Techniques de l'Équipement (CETE), le Groupement des Autorités Responsables de Transport (GART) et l'Union des Transports Publics et ferroviaires (UTP). Elle présente les informations statistiques relatives à 210 réseaux de transports collectifs urbains (TCU), les données étant présentées en évolution de 2002 à 2007. Celles-ci portent principalement sur les caractéristiques des réseaux, l'offre, l'usage, le parc de véhicules, le personnel et la tarification. »

- Des données du MOS (Mode d'occupation des sols) qui est l'atlas cartographique informatisé de l'occupation du sol de l'Ile-de-France

« Le MOS permet de suivre et d'analyser en détail l'évolution de l'occupation du sol sur tout le territoire régional. [...] Grâce à ces mises à jour très régulières et à sa précision à la fois thématique (la nomenclature de base comporte 83 postes de légende) et géométrique (précision du 1/5000) le MOS permet de visualiser et d'analyser en détail les évolutions de l'occupation du sol régional : extension de l'urbanisation, mutation des tissus urbains, transformation des espaces ruraux... ». Les données qui ont été exploitées sont des surfaces occupées par type de tissu du MOS dans chaque IRIS (îlots regroupés pour l'information statistique) d'Ile-de-France.

-Une couche SIG (Système d'information géographique) de délimitation des communes françaises.

Notons simplement que les seules données statistiques de calage disponibles à l'échelle de la commune sont celles de l'INSEE et portent uniquement sur le motif travail. On aura compris que c'est celui-ci que nous étudions ici.

Le tableau suivant rassure sur l'importance de ce motif :

Tableau 17 : Répartitions par motifs, nombre de déplacements et distances parcourues des déplacements en Ile-de-France.

Motifs	Répartition en nombre de déplacements	Répartition en distances parcourues
domicile travail	19%	37%
affaires professionnelles	14%	20%
école	15%	9%
loisirs	16%	14%
affaires personnelles	20%	12%
achats	16%	8%

Source : La pollution atmosphérique et les transports franciliens. IAURIF. Octobre 2004.

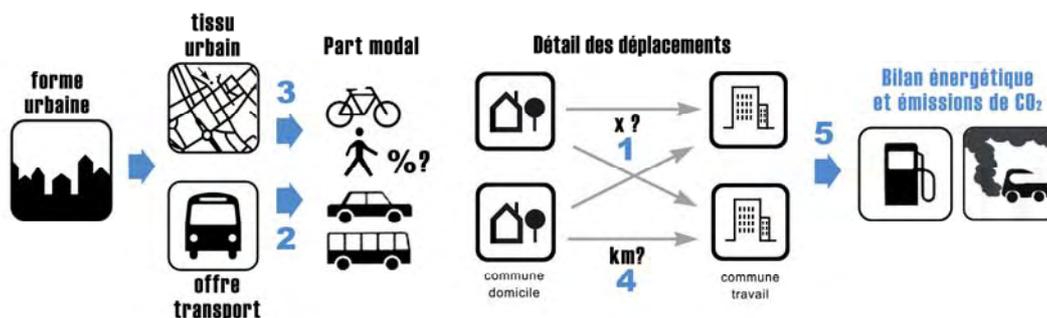
En effet ce motif représente en Ile-de-France 37 % des distances parcourues, ce qui en fait le motif le plus important pour ce qui est des consommations énergétiques.

1.2. ARCHITECTURE DU MODELE DE SIMULATION POUR LES DEPLACEMENTS DOMICILE-TRAVAIL

Finalement sont étudiées les relations suivantes :

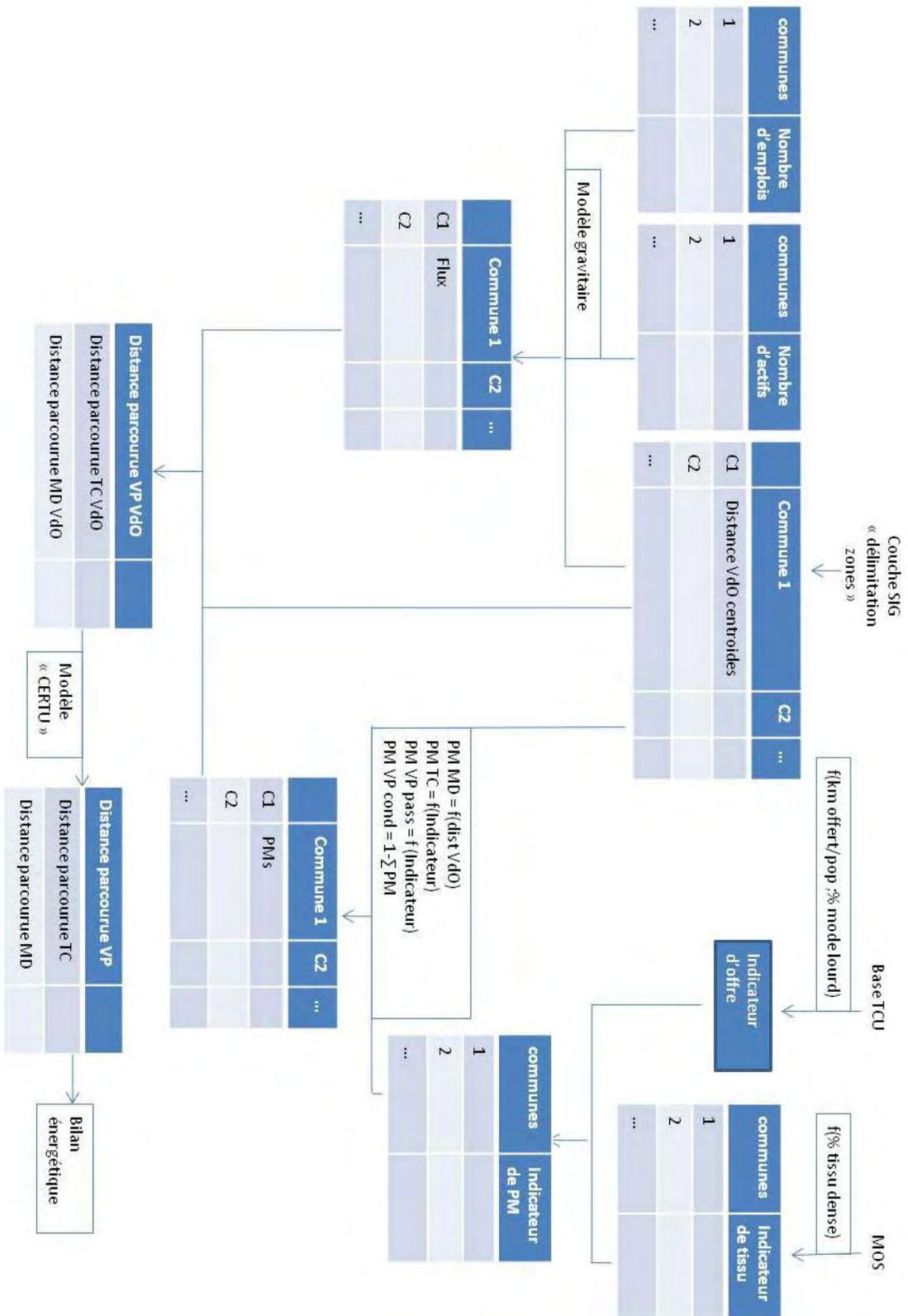
1. Détermination des flux au motif travail à partir des données de nombre d'emplois par commune française et de nombre d'actifs résidant par commune française.
2. Effet du système de transport en commun d'une agglomération sur les parts modales de celle-ci.
3. Effet du type de tissu urbain communal sur les parts modales pour le motif travail
4. Passage de distances à vol d'oiseau à des distances réelles selon les modes
5. Bilan énergétique à partir des distances parcourues par mode

Figure 23 : Impacts de la forme urbaine sur les déplacements - Organisation des variables



Finalement les relations à disposition permettent d'envisager le modèle présenté page suivante pour ce qui concerne le motif travail. Précisons que si l'absence de données ne permet pas pour l'instant de proposer les modèles liés aux autres motifs du déplacement urbain, ceux-ci seront probablement très semblables.

Figure 24 : Architecture du modèle au motif travail.



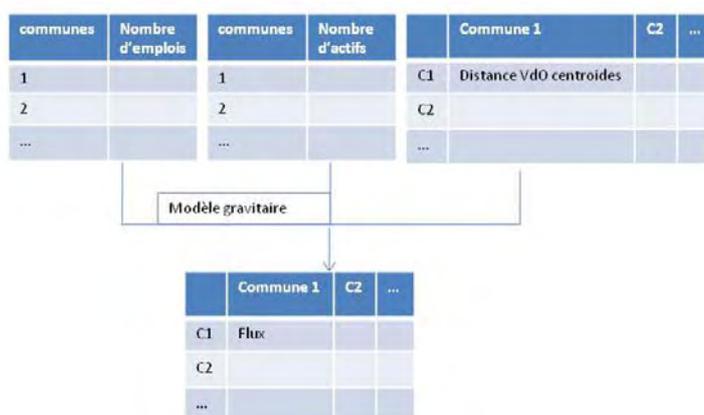
Source : Energies Demain

2. HYPOTHESE DE CALCUL

2.1. LE MODULE DE DETERMINATION DES FLUX POUR LES DEPLACEMENTS DOMICILE-TRAVAIL

Il s'agit de vérifier et de calibrer l'application d'un modèle gravitaire pour expliquer les flux au motif travail selon le schéma suivant :

Figure 25 : Schéma de l'architecture de détermination des flux au motif travail



Source : Energies Demain

La vérification se fait à partir de la base de données Mobilités Travail de l'INSEE et de la couche SIG de délimitation des communes françaises. Voici la formulation de ce modèle tel qu'il est appliqué :

$$T_{ij} = a(G_i \times A_j) / d_{ij}^\beta$$

Soit :

$$\ln (G_i \times A_j / T_{ij}) + \ln a = \beta \times \ln d_{ij}$$

Avec :

I : commune de résidence

J : commune d'emploi

T_{ij} : flux au motif travail de i vers j

G_i : nombre d'actifs habitant la commune i

A_j : nombre d'emplois localisés dans la commune j

d_{ij} : distance à vol d'oiseau entre les barycentres des communes i et j

β : coefficient de résistance au déplacement

a : coefficient d'ajustement

On cherche à connaître la valeur de β , le coefficient de résistance au déplacement (facilité ou non à se déplacer) et la valeur de a , coefficient d'ajustement. Pour cela on vérifie l'existence d'une régression linéaire entre $\ln(G_i \times A_j/t_{ij})$ et $\ln d_{ij}$ puis on détermine l'équation de la droite correspondante.

2.2. EFFET DU SYSTEME DE TRANSPORT EN COMMUN A L'ECHELLE DE L'AGGLOMERATION

Cette relation est le fruit du croisement entre les bases suivantes :

Les chiffres clés des enquêtes ménages déplacements méthode standard CERTU, principaux résultats des enquêtes réalisées entre 1976 et 2002

La base Transports collectifs urbains (données 1995 – 2004) du CERTU

Ce croisement n'est pas évident, en effet les périmètres des 2 enquêtes différent parfois. On considère qu'il est acceptable de croiser les données lorsque les différences de population entre les deux périmètres ne dépassent pas 25 %. De fait, on garde donc 16 agglomérations pour créer nos relations :

Tableau 18 : Villes retenues pour croiser les données EMD et TCU.

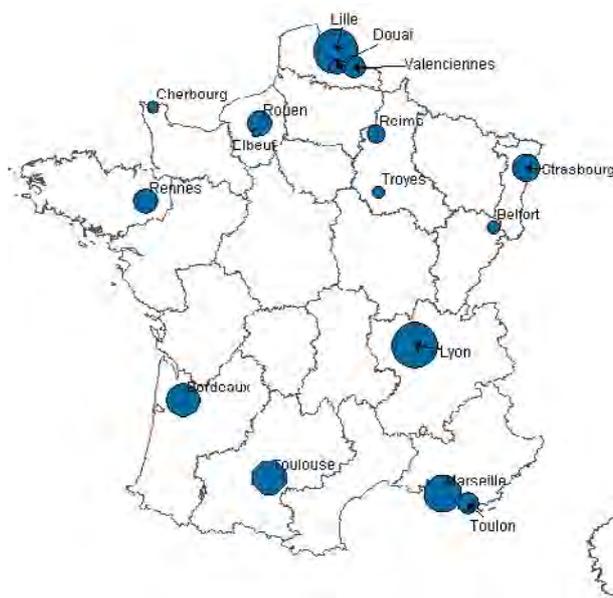
villes	PTU Population	EMD population	"erreur"
Belfort	119005	127000	6,3%
Bordeaux	667647	801000	16,6%
Cherbourg	95657	87000	10,0%
Douai	163606	174000	6,0%
Elbeuf	56723	53000	7,0%
Lille	1103980	1177000	6,2%
Lyon	1171357	1220000	4,0%
Marseille	807217	1068000	24,4%
Reims	216631	221000	2,0%
Rennes	368736	352000	4,8%
Rouen	395349	382000	3,5%
Strasbourg	453907	508000	10,6%
Toulon	308109	357000	13,7%
Toulouse	687593	723000	4,9%
Troyes	124712	120000	3,9%
Valenciennes	336863	334000	0,9%

Source : *Energies Demain*

Notons dès à présent que cette limite de 25 %, sans doute élevée, est dans la grande majorité des cas très supérieure aux écarts observés. Cette hypothèse reste importante.

La carte présentée page suivante montre pour sa part que les agglomérations sélectionnées sont variées aussi bien dans leur répartition sur le territoire que dans leur taille.

Figure 26 : Carte des agglomérations sélectionnées pour déterminer l'effet des systèmes de transport sur les parts modales



Source : *Energies Demain*

La grande faiblesse de ce travail réside dans l'absence de données sur les déplacements des ménages et les bases de transports en Ile-de-France. Nous avons pallié ce problème en utilisant pour compléter les enquêtes TCU et EMD, des données provenant des chiffres du STIF¹⁸, de l'enquête globale de transport¹⁹ et de la base de données mobilité du recensement.

Evaluation des corrélations

Devant la multitude de paramètres caractérisant les systèmes de transports qu'offre la base de données TCU (Transport en Commun Urbain) il est nécessaire de détacher ceux qui sont suffisamment pertinents pour servir d'indicateur dans la simulation. On cherche donc à évaluer les corrélations entre ces paramètres et les parts modales provenant des statistiques des EMD (Enquête Ménages Déplacements). Ce tableau présente les principaux résultats de ces tests

¹⁸ STIF, *Les transports en commun en chiffres en Ile-de-France, recueil de statistiques sur les transports en commun d'Ile-de-France, 2005*

¹⁹ *Les résultats détaillés de l'enquête globale de transport 2001 - 2002*

Tableau 19 : Coefficients de corrélation entre paramètres de systèmes de transport en commun et parts modales disponibles.

Type de parts modales \ paramètre testé	PKO/pop	%lourd	km/pop	km ² lourd/pop	kmoffert/km ²
part modale velo	0,076	0,079	0,111	0,114	0,345
part modale 2R motorisés	0,111	0,152	0,074	0,156	0,009
part modale VP cond	0,009	0,097	0,003	0,138	0,042
part modale VP pass	0,704	0,224	0,648	0,344	0,359
part modale TCU	0,742	0,209	0,783	0,371	0,590
part modale TC autres	0,129	0,037	0,087	0,044	0,154
part modale autres modes	0,075	0,023	0,052	0,006	0,163
motif travail part modale pied	0,048	0,168	0,003	0,206	0,247
motif travail part modale velo	0,283	0,183	0,344	0,241	0,471
motif travail part modale TCU	0,780	0,248	0,816	0,402	0,658
motif travail part modale TC autres	0,262	0,154	0,222	0,155	0,233
motif travail part modale 2R motorisés	0,265	0,328	0,183	0,357	0,091
motif travail part modale VP cond	0,002	0,011	0,002	0,000	0,007
motif travail part modale VP pass	0,193	0,052	0,197	0,090	0,083
motif travail part modale autres modes	0,070	0,080	0,066	0,015	0,057
motif écoles part modale pied	0,000	0,080	0,032	0,096	0,011
motif écoles part modale velo	0,013	0,034	0,026	0,067	0,221
motif écoles part modale TCU	0,354	0,018	0,390	0,082	0,207
motif écoles part modale TC autres	0,048	0,010	0,017	0,014	0,097
motif écoles part modale 2R motorisés	0,035	0,084	0,031	0,097	0,010
motif écoles part modale VP cond	0,184	0,007	0,291	0,003	0,049
motif écoles part modale VP pass	0,183	0,065	0,143	0,116	0,012
motif écoles part modale autres modes	0,036	0,273	0,022	0,122	0,009
motif secondaires part modale pied	0,062	0,240	0,006	0,285	0,074
motif secondaires part modale velo	0,079	0,052	0,115	0,085	0,487
motif secondaires part modale TCU	0,772	0,268	0,768	0,430	0,609
motif secondaires part modale TC autres	0,235	0,066	0,183	0,065	0,127
motif secondaires part modale 2R motorisés	0,000	0,018	0,002	0,014	0,011
motif secondaires part modale VP cond	0,000	0,167	0,022	0,204	0,006
motif secondaires part modale VP pass	0,620	0,174	0,610	0,247	0,331
motif secondaires part modale autres modes	0,092	0,043	0,056	0,113	0,132

VP cond=voiture particulière conducteur – VP pass : voiture particulière passager - TC=Transport en commun - TCU=Transport en commun urbain - 2R=véhicules 2 roues

Source Energies Demain

Explication des paramètres sélectionnés :

Des précisions sont à apporter à ce tableau en particulier en ce qui concerne les paramètres testés. Voici la signification des différents paramètres présentés :

Km/pop : les « *kilomètres offerts par habitant* » sont un ratio entre le nombre de kilomètres parcourus par l'ensemble des véhicules de transport en commun sur un an et le nombre d'habitant du PTU (pour Périmètre de Transport en Commun).

PKO/pop : les « *places kilomètres offertes par habitant* » apportent une nuance au paramètre précédent en le multipliant par le nombre de places disponibles dans les véhicules de transport en commun comptabilisées.

%lourd : la « *part de kilomètres offerts en mode lourd sur l'ensemble des kilomètres offerts* ». On définit les modes lourds comme ceux roulant sur rails soit les métros et tramways principalement.

Km*lourd/pop : les « *kilomètres mode lourd offerts par habitants* ». On définit les modes lourds comme ceux roulant sur rails soit les métros et tramways principalement.

Kmoffert/km² : les « *kilomètres offerts par km²* » constituent un paramètre proche des kilomètres offerts par habitant, remplaçant cependant la population de l'agglomération par sa superficie.

Il est à préciser que de nombreux autres indicateurs ont été testés, ceux qui sont présentés ici le sont pour leurs bonnes corrélations.

Indices sélectionnés :

Nous sélectionnons comme indice le plus performant les kilomètres offerts par habitant. Cependant il est possible d'affiner la précision de cet indicateur. La part de mode lourd étant mis en avant dans l'étude SESAME²⁰ comme très représentative nous en faisons un complément.

Pour compléter le paramètre de « kilomètres offerts par habitants » nous cherchons à maximiser la corrélation (R²) entre cet indicateur et les parts modales TC. Ce nouvel indicateur est appelé OT_{aggllo} pour Offre de Transport de l'agglomération, soit :

$$OT_{aggllo} = a \times kmoffert/hab + b \times kmoffertmodelourd/hab \text{ en faisant varier } a \text{ et } b$$

Le résultat de cette maximisation (on cherche les meilleurs résultats avec une précision de deux décimales) donne :

$$a=1$$

$$b=0.75$$

soit l'indicateur OT_{aggllo} (pour offre de transport de l'agglomération) donné par la fonction suivante :

$$OT_{aggllo} = kmoffert/hab + 0.75 \times kmoffertmodelourd/hab$$

Ce résultat semble indiquer que les kilomètres offerts en mode lourd ont 1.75 fois plus d'impact que les kilomètres offerts par d'autres modes.

²⁰ CERTU, *Liens entre forme urbaine et pratiques de mobilité, les résultats du projet SESAME, 1999*

2.3. EFFET DU TISSU URBAIN COMMUNAL

La typologie du tissu urbain communal et plus particulièrement sa densité, a-t-elle un impact sur la mobilité ? On aurait tendance naturellement à l'affirmer et la courbe de Newman et Kenworthy vient appuyer cette hypothèse. On cherche à vérifier et surtout quantifier cette relation. Pour ceci nous croisons les données suivantes :

- La base « communes...Mobilités Travail » du recensement de 1999
- Des données du MOS (Mode d'occupation des sols).

En fonction des données à notre disposition, nous établissons des typologies générales de tissu urbain qui sont les suivantes :

Tableau 20 : Nomenclature MOS des tissus considérés dans l'étude.

30	Habitat individuel	Lotissements et constructions individuelles. Si la parcelle a plus de 1000 m ² ne prendre en compte que les bâtiments plus une bande de 10 m et rattacher si possible à la voirie.
31	Ensembles d'habitat individuel identique	Ensemble d'habitations réalisé par un même promoteur, maisons le plus souvent identiques et disposées régulièrement.
32	Habitat rural	Il s'agit de groupements de bâtiments espacés de moins de 100 m majoritairement de forme rurale de 1 à 2 niveaux, exceptionnellement 3, édifiés en continuité les uns des autres, formant un noyau bâti, comportant dans sa partie centrale un point de convergence ou un point particulier (monument, église) incluant des bâtiments de ferme, comportant une structure de voirie dont la faible largeur et le tracé témoignent d'une voirie d'origine villageoise. Les châteaux seront classés en habitat continu bas pour le bâtiment lui-même et en village pour les dépendances.
33	Habitat continu bas	R+1 à R+3. Les zones concernées sont surtout linéaires, en bordure de voirie dans les faubourgs et les centres anciens et dans les nouveaux quartiers "maisons de ville". Les châteaux (sauf ceux ouverts au public).
34	Habitat collectif continu haut	R+4 à R+7. Il s'agit de centres urbains (immeubles haussmanniens ou ceux en brique de l'immédiat après-guerre), s'il y a des jardins dans ces zones, ils sont traités en espaces verts.
35	Habitat collectif discontinu	R+4 à R+12 et plus. Ensembles relativement récents. Toute la zone concernée par l'emprise de ce type d'habitat est cernée. Sont indiqués à l'intérieur, les parkings, les espaces verts, commerces, aires de jeux faisant partie intégrante de l'ensemble et repérés en tant que tels.
36	Prisons	
37	Habitat autre	Il s'agit essentiellement des hôtels (hors zone d'activité), les auberges de jeunesse, centres d'accueil, centre de vacances et de loisirs, foyer de travailleurs et d'étudiants, couvents, séminaires, maisons de retraite, habitat précaire ou mobile (caravanes ou mobil-homes isolés).

Source : données IAURIF

Pour déterminer l'indicateur le mieux à même de traduire l'effet du type de tissu sur une part modale, nous réalisons des tests de corrélation entre différents paramètres et les parts modales de transport en commun par ville de résidence et par ville d'emploi (« dep » pour départ et « arr » pour arrivée dans les tableaux). Voici les résultats de cette recherche :

Tableau 21 : Choix de l'indicateur de tissu le plus impactant pour les parts modales.

type de part	part sur surface commune										
	30	31	32	33	34	35	37	33+34	33+35	34+35	33+34+35
tissus											
corrélation dep	0,564	0,275	0,350	0,558	0,333	0,741	0,292	0,522	0,719	0,697	0,685
corrélation arr	0,400	0,129	0,315	0,569	0,445	0,706	0,303	0,581	0,704	0,719	0,704
moyenne	0,482	0,202	0,333	0,564	0,389	0,724	0,298	0,551	0,711	0,708	0,694

	part sur somme surfaces des tissus										
	30	31	32	33	34	35	37	33+34	33+35	34+35	33+34+35
corrélation dep	0,116	0,171	0,664	0,546	0,351	0,723	0,037	0,547	0,734	0,725	0,726
corrélation arr	0,015	0,029	0,454	0,521	0,463	0,654	0,070	0,578	0,676	0,708	0,704
moyenne	0,066	0,100	0,559	0,534	0,407	0,688	0,053	0,562	0,705	0,717	0,715

Source Energie Demain

L'étude des corrélations donne des résultats très encourageants avec plusieurs corrélations supérieures à 70 %, mais aucun indicateur ne se distingue clairement. C'est donc un choix basé sur des réflexions qualitatives qui doit être fait.

Ces parts pouvant être des parts de la surface de la commune ou de la somme des surfaces des tissus d'habitat, 4 indicateurs peuvent être considérés comme quantitativement préférables :

- Part de surface de tissu type 35 (Habitat collectif discontinu)
- Part de surface de tissu type 33 et 35 (Habitats continu bas et collectif discontinu)
- Part de surface de tissu type 34 et 35 (Habitats collectif continu haut et collectif discontinu)
- Part de surface de tissu type 33, 34 et 35 (Habitats continu bas, collectif continu haut et collectif discontinu)

La prédominance du tissu type 35 soit d'habitat collectif discontinu apparaît clairement. En effet il se retrouve dans chacun des indicateurs envisagés. La question se pose donc de l'intérêt d'incorporer d'autres tissus.

Cependant nous considérons que, l'extrapolation des résultats de l'Ile-de-France au reste de la France se faisant à partir de données moins précises que celles du MOS, il est préférable de grouper tous les tissus qu'on peut considérer comme denses. Il s'agit ainsi de sommer les surfaces de tissus 33, 34 et 35 qui sont au minimum continues ou collectifs donc relativement denses.

De même une surface totale de commune semble plus accessible. C'est donc le dernier indicateur présenté dans le premier tableau que nous sélectionnons. Cet indicateur est baptisé « part de tissu dense » et sera nommé ainsi dans la suite de ce rapport.

Part de tissu dense = surface couverte par des tissus type 33, 34 et 35 / surface de la commune

2.4. DES DISTANCES A VOL D'OISEAUX AUX DISTANCES « REELLES »

La relation utilisée ici vient directement d'une publication du CERTU : « *Calcul a posteriori des distances dans les enquêtes ménages déplacements* »²¹.

Parmi les méthodes proposées on peut trouver une proposition de reconstitution à partir des distances calculées à vol d'oiseau.

Extrait de la publication qui précise à ce sujet :

«Le passage aux distances réellement parcourues est effectué à l'aide d'un coefficient d'ajustement multiplicateur. Le mode de calcul est donné ci-après. [...]

Méthode de reconstitution des distances entre zones fines à partir des distances à vol d'oiseau :

Si DISTd désigne la distance du déplacement d entre la zone fine d'origine et celle de destination, DISTt la distance de chaque trajet t avec le mode de déplacement inclus dans le déplacement d et DVOt la distance à vol d'oiseau de ce même trajet, alors on écrit :

$$DISTd = \sum t DISTt$$

Et

pour les trajets en voiture et en deux roues motorisés

Si DVOt ≤ 1 km, alors DISTt = (2,2 - 0,72 x DVOt) x DVOt

Si DVOt > 1 km, alors DISTt = DVOt x 1,4

pour les trajets en transports collectifs

$$DISTt = 1,50 \times DVOt$$

pour les trajets en vélo

$$DISTt = 1,15 \times DVOt \text{ »}$$

²¹ CERTU, *Calcul a posteriori des distances dans les enquêtes ménages déplacements*, octobre 2005

La première limite de cette méthode est évidente : pas de prise en compte des spécificités locales et des réseaux. Celle-ci, si elle est exacte, ne peut pas être dépassée dans ce type d'étude, on ne peut donc qu'afficher clairement cette hypothèse.

De même l'ouvrage du CERTU précise « *Il convient d'abord, si possible, d'intégrer dans le calcul des distances les contraintes physiques principales qui induisent des allongements de parcours significatifs (passage obligatoire par certains points) : lignes écrans telles que fleuves, reliefs, voies ferrées notamment.* » Ceci est bien évidemment impossible dans cette étude.

Enfin précisons que ces relations ont été établies pour des EMD et pas pour des applications nationales. Cependant, puisqu'on traite de déplacements urbains, l'objection semble peu recevable.

2.5. DES DISTANCES PARCOURUES AU BILAN ENERGETIQUE

Calculer la consommation énergétique à partir des distances parcourues peut se faire de manière plus ou moins précise. En effet, si on possède des données sur le parc automobile, il est possible d'affiner les calculs. De même une différenciation selon les types de réseau est possible. Le choix dans cette étude est d'appliquer simplement la consommation moyenne du parc automobile français sur le réseau.

L'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie) dans son guide méthodologique²² donne les chiffres suivants :

- Consommation moyenne des véhicules essence : 8.1 litres aux 100 kilomètres
- Consommation moyenne des véhicules diesel : 6.8 litres aux 100 kilomètres

D'autre part le ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de l'aménagement du territoire fournit sur son site Internet les données de parc suivant :

- Nombre de voitures particulières essence : 13 259 971
- Nombre de voitures particulières diesel : 18 026 479

On prendra donc une consommation moyenne des véhicules particuliers :

$$\text{Conso moy} = \frac{\text{NbVPess} \times \text{ConsoVPess} + \text{NbVPdies} \times \text{ConsoVPdies}}{\text{NbVPess} + \text{NbVPdies}}$$

Soit Conso moy = 7.35 litres aux 100

²² ADEME, *Bilan carbone° Entreprises et collectivités, version 5.0 calcul des facteurs d'émissions et sources bibliographiques utilisées, janvier 2007*

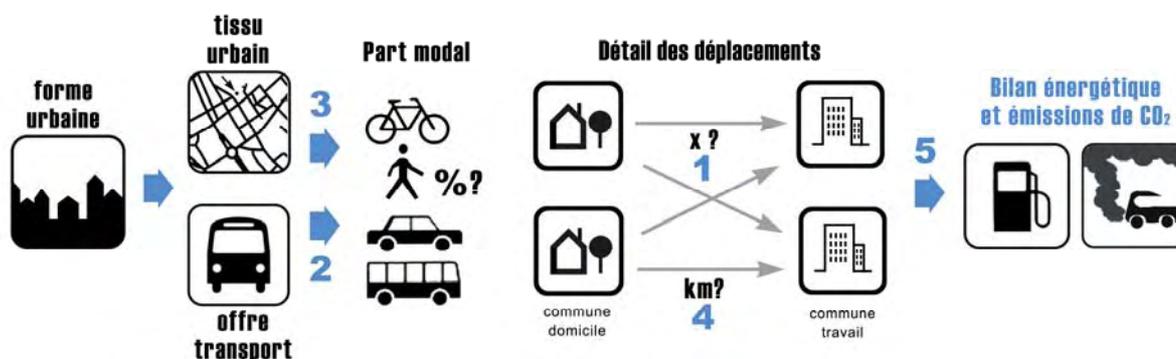
Deux limites de précisions ont déjà été évoquées : pas de prise en compte des particularismes du parc ni des particularismes de type routier. Pour une étude nationale de ce type une telle approximation est presque obligatoire. Il s'agit simplement de l'assumer.

Une simplification bien plus importante et discutable consiste à garder la moyenne des consommations de 2005 jusqu'en 2050, excluant le levier technique. Ce choix fort vient du point de vue de l'étude qui ne veut dégager que des leviers de forme urbaine. D'autre part, rentrer dans des discussions de gains liés au progrès technique est compliqué (la pénétration de la voiture électrique augmente le besoin électrique et change le mix énergétique de celui-ci et donc la consommation d'énergies qui en résulte, mais à quel hauteur...). Ceci ne fait pas partie du sujet de la recherche. Cette hypothèse s'impose donc.

3. RESULTATS DU SECTEUR TRANSPORT

3.1. LE MODULE DE DETERMINATION DES FLUX

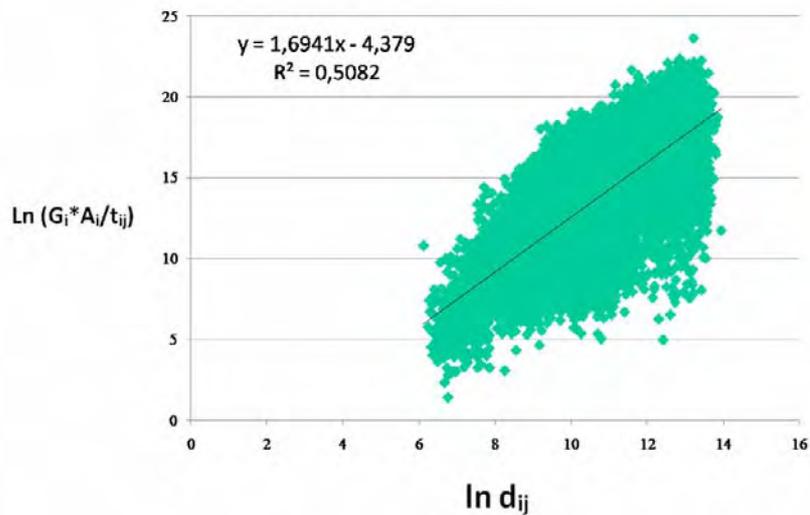
Figure 27 : Impacts de la forme urbaine sur les déplacements - Organisation des variables



On cherche à connaître la valeur de β , le coefficient de résistance au déplacement (facilité ou non à se déplacer) et la valeur de a , coefficient d'ajustement.

La base INSEE contient plus d'un millions et demi de combinaisons correspondant à notre recherche, c'est-à-dire de flux commune de résidence / commune de travail concernant au moins une personne. Traiter autant d'informations pose problème, on réalise donc des tirages au sort de 30 000 combinaisons pour vérifier la relation. On présente ci-après le résultat de l'un de ces tirages :

Figure 28 : Graphique de détermination des coefficients du modèle gravitaire



Source : *Energies Demain*

On en déduit les résultats suivants :

$$a = e^{4,379} = 79,76$$

$$\beta = 1,69$$

Ce qui implique un calcul des flux répondant à cette équation :

$$T_{ij} = 79.76 * (G_i * A_j) / d_{ij}^{1.69}$$

Observons que le coefficient de corrélation R^2 est légèrement supérieur à 50 %. On n'explique donc que 50 % de la variation de y à partir de la variation de x.

Le coefficient de corrélation constitue la limite des résultats observés: expliquer 50 % des flux c'est ne pas comprendre 50 % du phénomène. On peut sans doute expliquer qualitativement les écarts par trois facteurs :

- Le modèle gravitaire traite la question des flux en prenant les communes deux à deux, les excluant de tout contexte. Ainsi une commune de 50 actifs à 20 km d'une commune de 50 emplois aura la même prévision de flux vers cette seconde qu'elle se situe à proximité de Paris ou en pleine campagne, ignorant l'effet sur ce flux d'une proximité aussi importante. Cette hypothèse forte porte sûrement atteinte à la précision des résultats.
- La prise en compte de distances à vol d'oiseau de centre à centre est une simplification ambitieuse. De fait elle exclut l'effet des infrastructures qui ont un véritable impact sur les distances effectives. La donnée plus pertinente serait le temps de parcours moyen pour aller d'une commune à l'autre. Cette donnée est ne nous est pas accessible sur l'ensemble des combinaisons commune / commune en France.
- Un facteur culturel peut enfin être avancé. L'hypothèse de base du modèle gravitaire est l'homogénéité de la résistance au déplacement sur le territoire (et dans le temps, si on

veut s'en servir à des fins de prospectives). Une nuance culturelle régionale, surtout à l'échelle de la France entière est sûrement plus réaliste.

Il existe un moyen simple de corriger en partie ces biais. On possède des données complètes sur l'ensemble du territoire pour l'année 1999. En considérant que les écarts entre les résultats de la simulation et les valeurs à cette date sont constants dans le temps, on répercute les mêmes écarts à la théorie grâce à une matrice de correction. Cette solution corrige en partie les facteurs évoqués précédemment, en particulier le premier et le dernier ; la création de nouvelles infrastructures n'est, quant à elle, pas prise en compte.

On peut citer d'autres limites à l'application de cette règle :

- Le tirage au sort qui amoindrit la précision du calcul (même si on a pu vérifier que d'autres tirages donnent des résultats similaires)
- L'échelle de pertinence de la règle qui est uniquement nationale voire régionale mais ne pourra être reprise ainsi pour des échelles plus fines
- La présupposée constance de a et β dans le temps qui n'est pas vérifiée et prête à réflexion. On pense par exemple à l'effet qu'a eue la voiture sur l'étalement urbain en réduisant les distances. Un tel changement correspond à une baisse de la résistance au déplacement (β).

Cette dernière limite peut être prise en compte en estimant l'évolution passée de β et en la répercutant dans le futur. Cette correction nécessite la possession de données identiques à celles qu'on a utilisées ici mais à des dates différentes.

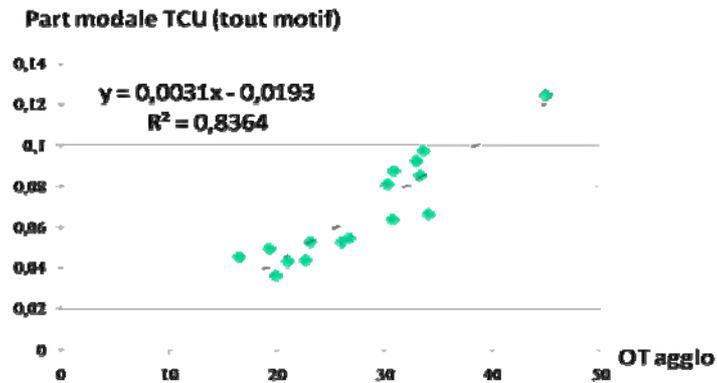
L'application du modèle gravitaire tel que présentée ici est valable. On en conclut que la localisation de l'habitat et des activités explique pour parti les flux de déplacements dans l'espace et par conséquent les distances parcourues. Il s'agit donc d'un levier important.

Pour autant ce levier possède une grande inertie. Ainsi on considère que 75 % du parc de logements et 60 % du parc tertiaire de 2050 proviendra du parc actuel. L'évolution de ce paramètre ne peut être totale mais mérite d'être prise en compte.

3.2.EFFET DU SYSTEME DE TRANSPORT EN COMMUN A L'ECHELLE DE L'AGGLOMERATION

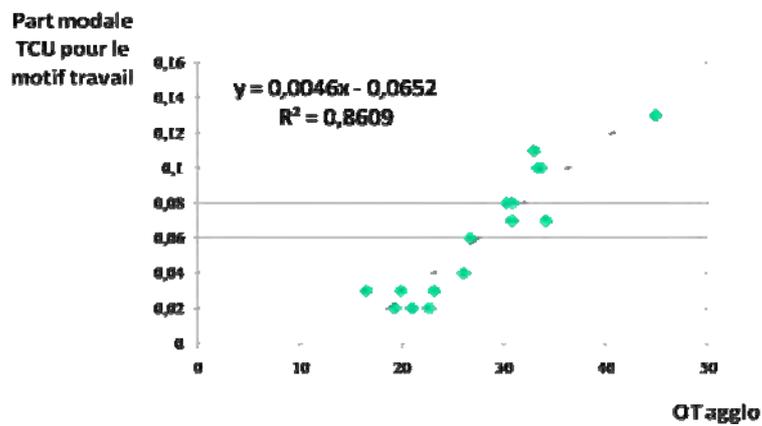
L'indicateur « Offre de Transport de l'agglomération » est très performant comme en témoigne les résultats ci-dessous. Les coefficients de corrélations sont extrêmement encourageants, la relation semble des plus ténue. En effet plus l'offre de transport augmente, plus la part consacrée aux Transport en Commun est élevée, que ce soit pour le motif travail ou pour tous les autres.

Figure 29 : Lien entre l'indicateur OTagglo et part modale des transports en commun



Source : Energies Demain

Figure 30 : Lien entre l'indicateur OTagglo et part modale des transports en commun au motif travail. Source Energie Demain

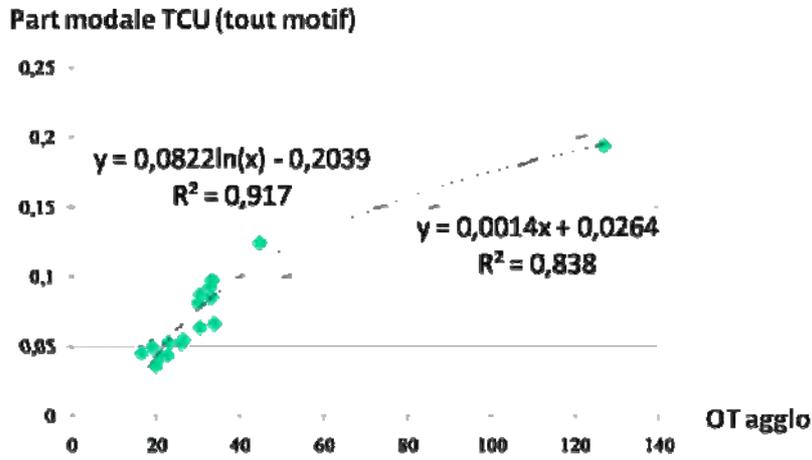


Source : Energies Demain

a) Données sur l'Île de France

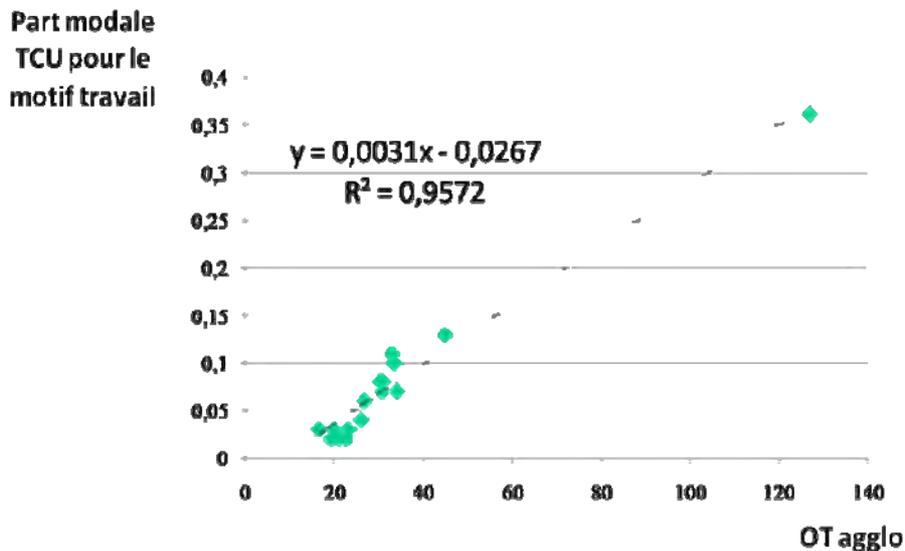
L'ajout de l'Île-de-France qui est, comme le montrent ces graphiques, un cas extrême en comparaison des autres agglomérations renforce encore ce lien (point à l'extrême droite des graphiques). Les coefficients de corrélations dépassant les 90 et même 95 % en témoignent. Il s'agit d'une véritable réussite.

Figure 31 : Lien entre l'indicateur OTagglo et part modale des transports en commun avec l'IdF



Source : Energies Demain

Figure 32 : Lien entre l'indicateur OTagglo et part modale des transports en commun au motif travail avec l'IdF



Source : Energies Demain

Si on note des limites liées aux différences de périmètres qui ont déjà été soulignées ou à la faiblesse du nombre d'agglomérations ayant présidé à l'élaboration de cette relation, la robustesse des corrélations mises en avant permet d'assurer une certaine fiabilité du lien.

Il existe une limite beaucoup plus essentielle : l'hypothèse de constance de ces relations dans le temps qui permet leur utilisation à l'horizon 2050 est très fragile. En effet l'étude des variations de

parts modales dans les 50 dernières années semble montrer un écroulement des parts modales de transport en commun. Cet état de fait peut être expliqué par l'explosion de l'accès à la voiture mais probablement pas par une baisse de l'offre de transport en commun (notons que ce dernier point n'est pas statistiquement vérifié). Ceci remet profondément en cause l'applicabilité de ces relations dans l'optique de cette étude.

Alors peut-on / doit-on utiliser ces relations ?

Deux raisons peuvent amener à pencher vers l'affirmative. Premièrement ne pas utiliser ces relations c'est faire l'hypothèse clairement infirmée par les résultats présentés que l'offre de transport en commun n'a pas d'impact sur les parts modales. Ainsi on peut penser que l'approximation d'utiliser ces liens est moins forte que celle qui consisterait à ne pas s'en servir. Enfin si on se penche sur l'explication qualitative qu'est l'explosion de la possession de voitures particulières, on peut observer que la pénétration de la voiture est aujourd'hui presque complète : il n'y a quasiment plus de marge de manœuvre liée à ce paramètre. On peut donc faire l'hypothèse d'une plus grande constance dans les 40 prochaines années.

En conclusion on peut poser l'hypothèse de constance dans le temps de nos relations mais celle-ci doit être présentée comme une hypothèse forte. Un autre problème réside dans l'absence de relations donnant des informations sur les parts modales de voiture particulière. En effet l'augmentation de la part modale de transport en commun ne correspond pas directement à une baisse de celle de la voiture particulière pour les conducteurs. Cet état de fait limite la portée de cette relation.

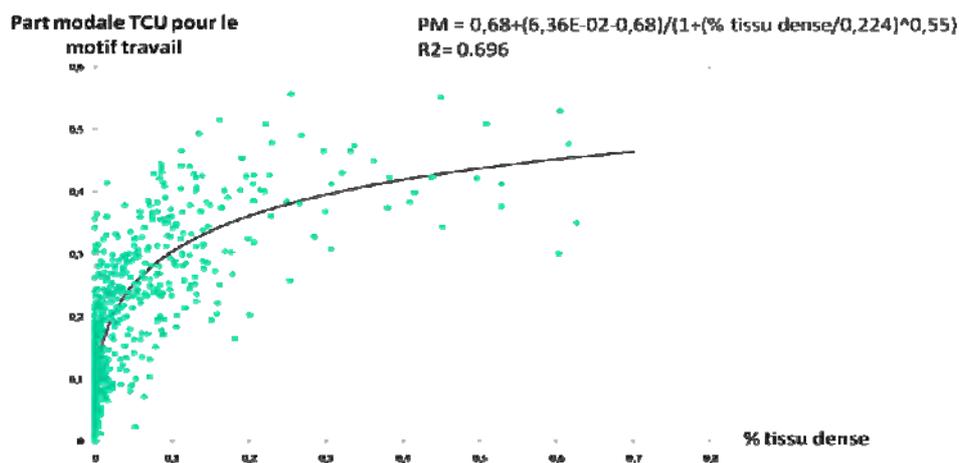
L'effet « offre de transport collectif » est établi et important. C'est même une « densité d'offre » qui engendre des parts modales TC importantes. Il s'agit là d'un levier politique décisif. Notons de plus que l'impact des transports « lourds » est supérieur et donc à privilégier.

Remarquons par ailleurs que l'offre de transport en commun dépend pour beaucoup de sa rentabilité, c'est-à-dire de sa capacité à toucher un maximum de population. Un territoire où les populations sont concentrées peut permettre plus d'offre TC sur des périmètres limités : une offre dense. On facilitera donc l'usage du levier « offre de transport collectif », dont l'impact est important, en se servant du levier « concentration de la population ».

3.3. EFFET DU TISSU URBAIN COMMUNAL

Voici les résultats que l'on trouve en agrégeant les données par ville de résidence :

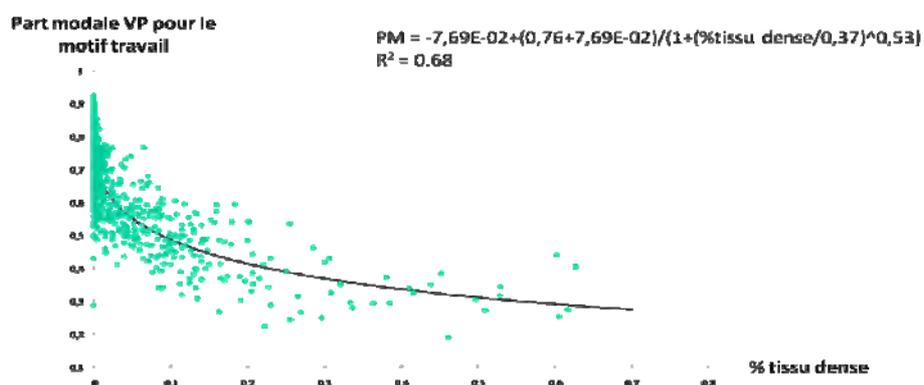
Figure 33 : Régression entre part de tissu dense et part modale TC au motif travail par ville de résidence



Source : Energies Demain

La part modale voiture particulière diminue avec la part de tissu dense dans la commune de résidence.

Figure 34 : Régression entre part de tissu dense et part modale VP au motif travail par ville de résidence

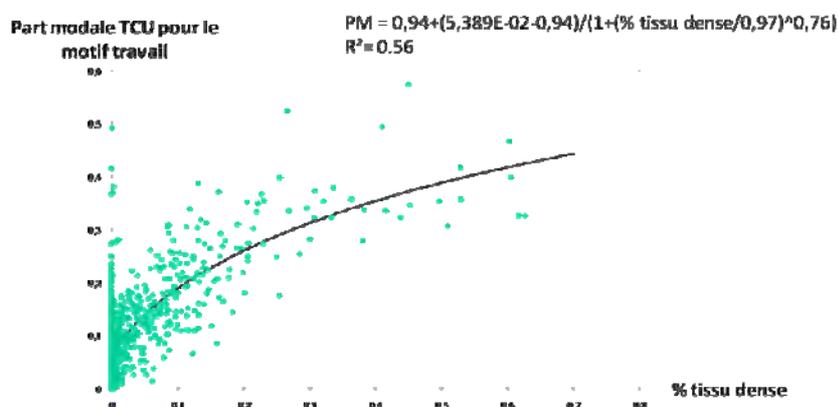


Source : Energies Demain

On observe bien que plus la ville d'emploi possède de tissu dense, plus la part modale des transports en commun est élevée.

En agrégeant au contraire les données par ville d'emploi on obtient les résultats suivants :

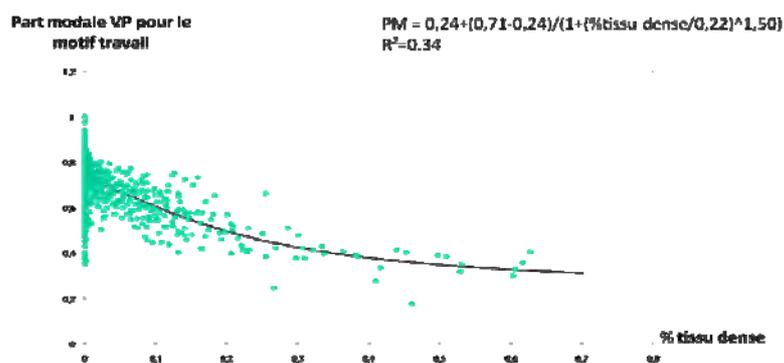
Figure 35 : Régression entre part de tissu dense et part modale TC au motif travail par ville d'emploi



Source : Energies Demain

Inversement, plus la ville d'emploi possède de tissu dense, plus la part modale de la voiture particulière est faible.

Figure 36 : Régression entre part de tissu dense et part modale VP au motif travail par ville d'emploi



Source : Energies Demain

Si on n'agrège pas les données se pose le problème des faibles échantillons. Les nuages de point proviennent de la corrélation suivante : sur 100 personnes allant de la commune C1 à la commune C2 pour se rendre au travail, 70 utilise la voiture particulière. Seulement s'il n'y a qu'une personne vivant dans une ville C1 et travaillant dans une autre C2, les parts modales sont de 0 ou 100 %. Dès lors la régression est très compliquée. Si on ne considère que les combinaisons où les flux sont supérieurs à certaines limites, on obtient les corrélations suivantes :

Tableau 22 : Lien entre limite inférieure des flux pour prise en compte et corrélations entre PM et part de tissu dense commune d'origine + part de tissu dense commune de destination

limite inférieure de flux pour une prise en compte	corrélation entre somme des parts de tissu dense des villes origine et destination et PM TC
0	0,34
100	0,46
500	0,50
1000	0,54

Source : Energies Demain

On voit bien que plus le nombre de flux pris en compte est élevé plus les corrélations sont fortes. L'ensemble de ces résultats confirme la relation testée et permet d'envisager l'incorporation des équations trouvées au modèle. Notons aussi la grande ressemblance entre ces relations et la courbe de Newman et Kenworthy.

Pour cette relation existent encore des réserves quant à la constance de ces règles dans l'espace et dans le temps.

Pour ce qui est de l'espace, le périmètre d'étude étant l'Ile-de-France, un territoire très particulier en France, l'exploitation direct des résultats prête à discussions. Ceci dit cette hypothèse est une des hypothèses de base du projet PUCA-FU et il ne s'agit pas de la remettre ici en cause.

La constance dans le temps n'est pas non plus prouvée. L'absence de données équivalentes pour d'autres dates ne permet pas d'apporter de vérifications. Il s'agit d'une hypothèse d'étude.

On peut tout de même souligner que les ressemblances fortes entre les relations trouvées et la courbe de Newman et Kenworthy renforcent l'idée que ces hypothèses de constances ne seraient pas complètement fausses.

Notons par ailleurs que l'indicateur dégagé inclut sûrement plusieurs paramètres qui ne sont pas clairement mis en avant. En effet, il est probable qu'un tissu dense soit mieux desservi par les transports en commun pour des questions de rentabilité. L'indicateur masquerait ainsi le paramètre d'accessibilité au réseau de transport en commun. Peut-être également que le tissu de type 35, qui a beaucoup à voir avec les grands ensembles, contient une population défavorisée économiquement et donc ne possédant pas toujours de voitures. L'indicateur inclurait ainsi une notion sociale d'accès à la voiture particulière.

Plus particulièrement, la question se pose de l'indépendance des phénomènes observés ici par rapport aux phénomènes faisant l'objet du paragraphe précédent.

Cette réflexion ne retire rien à la véracité de la relation mais questionne sur la façon de l'utiliser dans ce projet.

V. HYPOTHESES, STRUCTURE DU MODELE DE PROSPECTIVE

[²³]

Cette partie de la recherche est consacrée à la présentation du modèle prospectif pour une mise en application que l'on développera dans la dernière partie de ce rapport. Le modèle repose sur une approche fortement empirique qu'il est utile de préciser ici. L'idée principale de cette démarche repose sur le postulat que des liens mécaniques entre variables peuvent être construits à partir d'une ou de plusieurs corrélations empiriques observées à un instant donné (généralement en 2000 et 2006) et que l'on ne cherche pas forcément à convertir en relations explicatives. Cette approche, plus descriptive que théorique, a l'avantage d'être significativement robuste et adaptée à des prospectives à moyen et long terme. En effet, considérer que des liens empiriques peuvent construire la « mécanique » d'un modèle est raisonnable lorsqu'on envisage qu'aucune rupture (d'ordre technologique, comportementale, etc.) ne fera partie des développements urbains possibles que l'on cherchera à rendre visibles lors des projections en situation de prospective. Cette posture renvoie également à préciser ce que l'on entend ici par des développements urbains « possibles ». L'étendue de ces possibilités est donnée à partir de l'examen des cas existants aujourd'hui. En d'autres termes, le travail de prospective de la dernière partie de ce rapport consistera à appliquer à l'ensemble du territoire (segmenté en communes) le modèle d'urbanisation qu'une ou plusieurs communes a choisi d'adopter à l'heure actuelle (en 2006). La prospective reviendra à généraliser à l'horizon 2050 les situations urbaines de quelques communes supposées « vertueuses » ou « désastreuses » d'un point de vue des consommations d'énergie et des émissions de CO₂ et à éliminer de fait tous les cas supposés impossibles. La mise en lumière des diverses situations urbaines et des diverses relations du modèle sera également l'occasion de présenter les dynamiques observées entre 2000 et 2006.

1. LA POPULATION ET LE PARC DE LOGEMENT

La scénarisation du développement urbain est fondée sur la notion de « modèle de communes », elle-même réduite à une représentation vectorielle selon 5 dimensions du fait urbain observé en 2006 : l'importance démographique de la ville (sa population), la distance moyenne qui la sépare des lieux d'emploi, la part de tissu urbain continu et discontinu définie selon la nomenclature de l'IFEN et, enfin, celle de l'artificialisation du sol. Par exemple, le vecteur ([0 50 000],[10 40],[0

²³ Ce chapitre a été rédigé par M. MAIZIA à l'exception du paragraphe 4.1 écrit par P. VIEJO GARCIA.

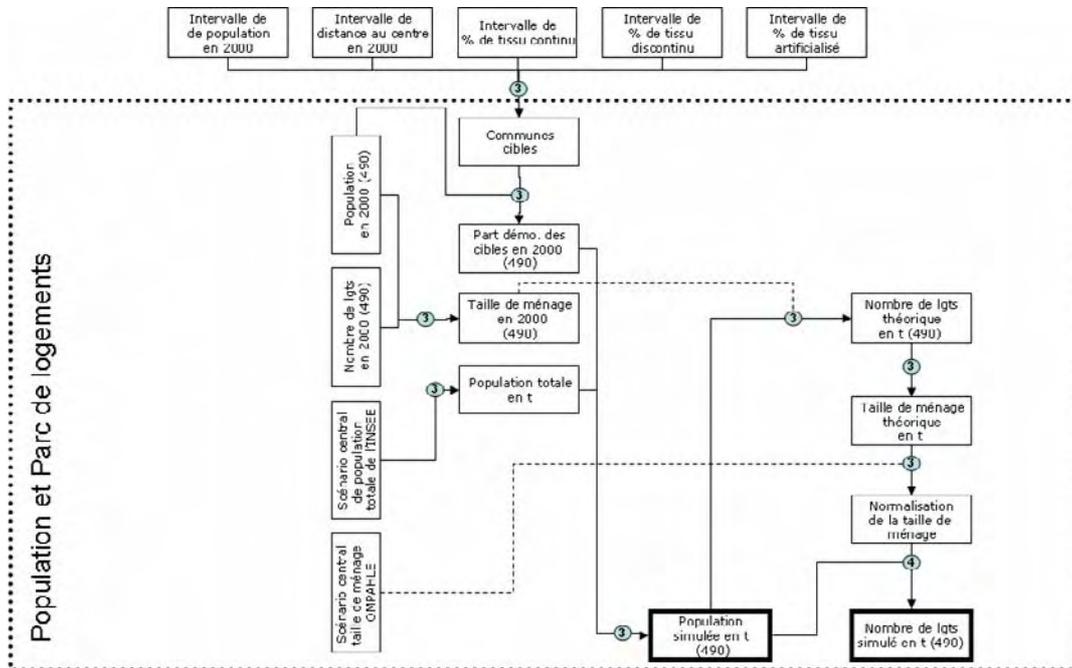
0.5],[0 1],[0 1]) décrira les villes dont la population est inférieure en 2006 à 50 000 habitants et qui appartiennent à un territoire dont les distances à l'emploi sont comprises entre 10 et 40 km,. Ces villes possèdent un sol constitué au maximum de 50% de tissu continu et, pour cet exemple, sont caractérisées par tous les cas possibles de configuration en termes d'artificialisation et de tissus discontinus.

Comme signalé en introduction, la production de scénarios prospectifs revient à ventiler la population vers ces « modèles de communes » à divers horizons et d'observer les effets énergétiques pour les secteurs de l'habitat et des transports et les effets en termes d'occupation du sol.

Construire un scénario consiste d'abord à considérer qu'en bâtissant des « modèles », les communes poursuivent leur développement urbain ou rural selon un sous-scénario démographique de référence. Ce sous-scénario est fondé sur les deux hypothèses centrales d'évolution de la population métropolitaine de l'INSEE : d'une part, sur celle relative à la population totale française à l'horizon 2050²⁴, d'autre part, sur le modèle OMPHALE réalisé à l'échelle départementale à l'horizon 2030. La principale hypothèse démographique construisant le scénario de référence consiste alors à affecter à l'ensemble des communes d'un même département le taux de croissance de population départementale estimé par OMPHALE, et à prolonger ces progressions de façon linéaire jusqu'à 2050 afin de coïncider avec les projections de la population totale.

²⁴ I. Robert-Bobée « Projections de population pour la France métropolitaine à l'horizon 2050, La population continue de croître et le vieillissement se poursuit, division », Insee Première N°1089, 2006, 4p.

Figure 37 : Structure du modèle de parc de logements



Source : M. MAÏZIA, UTEAM.

2. LES CONSOMMATIONS D'ENERGIE ET LES EMISSIONS DE CO2 DU SECTEUR DE L'HABITAT

2.1. LE PARC DE LOGEMENTS PAR SEGMENTS TYPOLOGIQUES

La dynamique de ventilation de la population dans le parc de logements repose quant à elle sur l'extrapolation des mouvements observés entre 1999 et 2006. A partir d'une typologie fine et selon une désagrégation à l'échelle communale, la dynamique des mouvements de population dans le parc est assimilée au prolongement linéaire de ce qui a été observé entre les deux RGP. On considère ainsi, qu'à l'échelle de chaque commune, la croissance se poursuit dans des proportions égales à celle du rythme donné dans l'intervalle des RGP avec un plafond démographique imposé par le modèle de population de l'hypothèse précédente. Cette façon de modéliser la dynamique de population dans le parc permet de visualiser les jeux de sorties et d'entrées entre segments dans le stock et, surtout, de simuler les effets des entrées « négatives », celles qui engendrent un déstockage du bâti existant (entrées d'une population dans un parc déjà construit en 1999 mais non employé jusque-là en tant qu'habitation principale) que l'on saisit mal lorsqu'on se fonde sur

les seuls effets de la demande de logements (en effet, un modèle de dynamique de parc fondé sur l'hypothèse d'une érosion stricte du stock disponible à un instant donné peut exagérer la demande de logements neufs). A titre d'exemple, le déstockage peut résulter de la transformation en logement d'un bureau ou d'un local ancien, de la subdivision d'une habitation ancienne, etc. Il est important ici de signaler que les entrées de population induisant un déstockage sont alors considérées comme potentiellement infinies même si cette hypothèse est hautement improbable. La méconnaissance aigüe du stock de bâti transformable en logements, malgré la connaissance du parc de logements vacants, interdit de fait d'émettre une hypothèse sur son ampleur. On verra plus loin que choisir de ne pas plafonner le déstockage conduit néanmoins à des résultats tout à fait plausibles en raison, notamment, des limites démographiques imposés par les modèles de prévisions de l'INSEE.

Les sorties d'une population d'un stock donné sont quant à elles modélisées selon le même procédé que celui adopté pour les entrées (une interpolation entre les deux RGP) mais à partir d'une érosion linéaire du nombre d'habitants par segment de parc. Cette érosion est « plafonnée » négativement à partir de la « disparition » complète des habitants concernés et du solde de population disponible en 1999. En d'autres termes, un segment qui a perdu des habitants entre 1999 et 2006 poursuit son érosion jusqu'à l'épuisement de son stock et engendre un déficit qui est compensé par les autres segments dont les stocks ont évolués positivement dans le même intervalle. Cette compensation, qui permet de répondre à la pression démographique, est réalisée dans les intensités et les proportions observées entre 1999 et 2006.

Tableau 23 : découpage en zones selon les ZAUER

1 : communes appartenant à un pôle urbain ; un pôle urbain est une unité urbaine offrant au moins 5 000 emplois
2 : communes monopolarisées (ou appartenant à une couronne périurbaine) : communes dont au moins 40 % des actifs résidents travaillent hors de la commune ou de l'unité urbaine, mais dans l'aire urbaine.
3 : communes multipolarisées : communes ou unités urbaines dont au moins 40 % des actifs résidents travaille dans plusieurs aires urbaines, sans atteindre ce seuil avec une seule d'entre elles.
4 : communes appartenant à un pôle d'emploi de l'espace rural : communes ou unités urbaines n'appartenant pas à l'espace à dominante urbaine comptant 1 500 emplois ou plus.
5 : communes appartenant à la couronne d'un pôle d'emploi de l'espace rural : communes ou unités urbaines n'appartenant pas à l'espace à dominante urbaine dont 40% ou plus des actifs résidents travaillent dans l'aire d'emploi de l'espace rural
6 : autres communes de l'espace à dominante rurale : communes (ou unités urbaines) n'appartenant ni à l'espace à dominante urbaine ni à une aire d'emploi de l'espace rural.

Les évolutions du parc entre 1999 et 2006 peuvent être résumées ici à une forte progression numérique (le parc augmentant de l'ordre de 11,35%). C'est donc dans un contexte de croissance relative généralisée du stock que les choses doivent être examinées. D'un point de vue de la localisation géographique (selon le zonage en aires urbaines et en aires d'emploi de l'espace rural,

Tableau 23), l'évolution la plus marquée se situe en couronne urbaine (+16,54%), zones dans lesquelles les maisons individuelles connaissent le plus fort accroissement (+12,46%).

Les pôles urbains connaissent les taux de progression les moins élevés (+9,63%) mais demeurent les lieux privilégiés des stocks (plus de 63 % du stock). Les deux tiers des logements entrants entre 1999 et 2006 dans ces zones concernent des logements en immeubles collectifs. Ces entrées sont constituées de logements neufs mais aussi d'un déstockage du parc bâti. L'espace rural connaît également, dans ce contexte d'augmentation, une forte croissance avec 12,71% de nouveaux logements, majoritairement, bien entendu, des maisons individuelles (une augmentation trois fois plus importante que celle des logements en immeubles collectifs).

Tableau 24 : Evolution de la répartition des logements (résidence principale) par ZAUER entre 1999 et 2006.

ZAUER	1999	2006	Evolution	dont maisons	dont appartements
1	14 602 072	16 008 711	9,63%	3,47%	6,16%
2	3 339 488	3 891 754	16,54%	12,46%	4,08%
3	1 065 602	1 230 478	15,47%	11,65%	3,82%
4	1 200 633	1 343 214	11,88%	5,22%	6,66%
5	96 026	108 231	12,71%	9,72%	2,99%
6	2 849 529	3 199 547	12,28%	8,32%	3,96%
Total	23 153 350	25 781 934	11,35%	5,86%	5,50%

Source : *Energies Demain d'après les RGP 1999 et 2006.*

En termes de systèmes de chauffage, les parts de marché progressent peu pour les principaux combustibles, à savoir le gaz en réseaux et l'électricité. Ces deux systèmes équipent toujours en 2006 les deux tiers des logements.

La progression la plus spectaculaire concerne le chauffage urbain avec une croissance de plus de 65%. A l'inverse, notons le net recul des solutions de chauffage fortement individualisées (hors électricité) à travers celui du gaz en bouteille (-1,50%), du fioul (-3,30%) et du charbon²⁵ (-13,72%).

²⁵ Les statistiques de l'INSEE classent dans la catégorie « autre » les systèmes fonctionnant au charbon, au bois ou à partir de générateurs hybrides. Il est raisonnable de penser que les entrées dans ce segment concernent plutôt le bois alors que les sorties s'appliquent au charbon.

Tableau 25 : Progression des parts de marché des systèmes de chauffage.

	1999	2006	Evolution 99-06
Chauffage urbain	795 818 (3,44%)	1 314 709 (5,10%)	65,20%
Gaz de ville ou de réseau	8 093 197 (34,95%)	9 348 292 (36,26%)	15,51%
Fioul (mazout)	4 786 342 (20,67%)	4 628 494 (17,95%)	-3,30%
Electricité	6 051 950 (26,14%)	7 451 527 (28,90%)	23,13%
Gaz en bouteilles ou en citerne	677 850 (2,93%)	667 663 (2,59%)	-1,50%
Autre	2 748 193 (11,87%)	2 371 249 (9,20%)	-13,72%

Source : *Energies Demain d'après les RGP 1999 et 2006.*

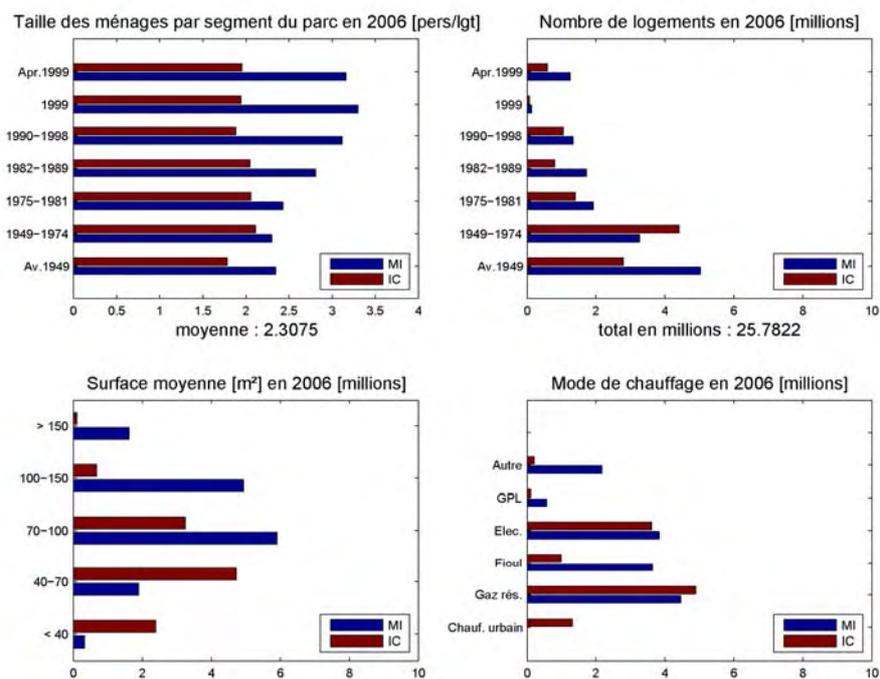
2.2. LA TAILLE DES MENAGES DANS LE PARC PAR TYPE DE LOGEMENT EN 2000 ET 2006

La taille des ménages est l'indicateur majeur qui permet de déterminer le nombre de logements nécessaires pour satisfaire une pression démographique donnée. Cet indicateur est généralement construit pour deux grands segments du parc, les maisons individuelles et les logements en immeubles collectifs. Il apparaît, d'un point de vue agrégé, que la taille des ménages des maisons individuelles est supérieure à celle en immeuble collectif. Le modèle reconstitue la demande de logements par segment à partir de la taille des ménages connues en 1999 et 2006 et ce, à l'échelle désagrégées des communes et de tous les segments de parc. La diminution progressive de la taille des ménages prévue par OMPHALE est approchée ici comme un taux de réduction parfaitement homogène appliqué à la totalité du territoire (segmenté en départements). Cette méthode fondée sur un taux de réduction et non plus sur une taille moyenne exprimée en valeur absolue permet de conserver les différentiels territoriaux et surtout typologiques. Le modèle considère par exemple qu'une ventilation de la population vers des communes dominées par de la maison individuelle induit une demande de logements moins importante que celle concentrant la population dans des communes constituées principalement d'immeubles collectifs ; cet écart dans la demande de logement étant dû à l'écart de taille des ménages dans les segments de parc entre les deux types de communes.

Malgré une finesse notable acquise grâce à un degré de désagrégation considérable, la modélisation contient une limite non négligeable qu'il est nécessaire de signaler ici : considérer que la taille des ménages couplée à la pression démographique détermine entièrement la structure de la demande de logements suppose que l'on ne cherche jamais à modéliser les effets de sous ou surpeuplement de ces derniers. En effet, une surventilation vers les communes dotées d'un stock de maisons individuelles important nous conduit à admettre que la population « adapte » sa taille des ménages de telle manière à correspondre à celle de ce segment. Or, il est permis de présumer que des ménages de petites tailles (correspondant à celle des immeubles collectifs)

s'orientent, dans ce type de scénarios, vers des maisons individuelles et engendrent de ce fait le sous-peuplement de ces dernières. Dans notre modèle, le sous ou surpeuplement des logements est contenu dans le référentiel même que nous avons adopté (les RGP 1999 et 2006) et n'est pas construit à postériori à travers une scénarisation de la taille des ménages hors celle admise par OMPHALE.

Figure 38 : Etat du parc de logements en 2006



Source : M. MAÏZIA, UTEAM.

En 1999, les logements contenaient en moyenne 2,53 personnes. Ce chiffre descend dès 2006 à 2,38 avec un différentiel entre la maison individuelle et l'immeuble collectif quasi constant. Le différentiel de taille de ménage selon le type de logement conduit assez naturellement à un écart notable lorsqu'on examine les choses du point de vue des zones géographiques : la maison individuelle, bien moins présente dans les pôles urbains, explique que ces derniers abritent les logements les moins peuplés.

Tableau 26 : Taille des ménages selon la localisation

ZAUER	99	2006
1	2,45	2,31
2	2,80	2,63
3	2,73	2,57
4	2,53	2,33
5	2,64	2,47
6	2,55	2,40
Total	2,53	2,38

Source : *Energies Demain d'après les RGP 1999 et 2006*

Cette diminution substantielle de la taille des ménages s'accompagne, par effet mécanique, d'une augmentation des surfaces habitables par personnes. Dans le modèle prospectif développé dans cette partie de la recherche, la croissance de ces surfaces ne provient pas d'un raisonnement théorique, à l'instar des recherches déjà menées sur le sujet (Maïzia, Traisnel), mais des effets induit par le jeu de permutation et de développement du parc.

2.3. LES SURFACES HABITABLES

Outre son importance dans la compréhension de la dynamique du stock de logements et, comme nous le verrons plus bas dans le calcul des apports internes, la surface moyenne d'un logement est un paramètre primordial pour établir le bilan énergétique du parc bâti. En effet, les consommations de chauffage à l'échelle du parc sont tributaires de l'évolution de ces surfaces en termes de chauffage et d'éclairage : elles seront d'autant plus élevées que les surfaces seront grandes. Les mécanismes de modification de la surface habitable comme nous l'avons signalé, ont fait l'objet de nombreux travaux et il n'est pas utile, ici de les développer longuement. Rappelons néanmoins que la surface moyenne d'un logement en immeuble collectif s'avoisine en 1999 de 64 m² pour atteindre en 2006 moins de 62 m². Cette diminution, surprenante, est la conséquence mécanique de la dynamique du parc entre les deux RGP : les logements de très petites tailles (moins de 40 m²) augmentent significativement en nombre (une augmentation de près de 23%) pendant que la tranche la plus représentative de ce type de logement est la seule à connaître une diminution substantielle (-2%).

Tableau 27 : Surface moyenne des logements (m²) en 1999 et 2006²⁶

	Maison	Appartement	Ensemble
1999	99,20	63,49	84,02
2006	105,79	61,79	86,82

Source : Energies Demain d'après les RGP 1999 et 2006.

Cette tendance est contrebalancée par un accroissement important de la surface moyenne des maisons individuelles. Ce passage confirme la tendance des migrations résidentielles du logement en immeuble collectif vers la maison individuelle. Dans un mécanisme de dynamique de parc analogue à celui concernant le logement en immeuble collectif, la croissance de la surface moyenne des maisons individuelles résulte de l'augmentation numérique des tranches de logements de plus de 100 m² (+25 %) et de plus de 150 m² (+37%).

Tableau 28 : Surface du parc logements en 1999 et 2006

	1999	2006	Evolution 99-06
moins de 40 m2	2 208 795 (9,54%)	2 709 923 (10,51%)	22,69%
de 40 à moins de 70 m2	6 733 056 (29,08 %)	6 605 106 (25,62%)	-1,90%
de 70 à moins de 100 m2	8 475 374 (36,61%)	9 147 072 (35,48%)	7,93%
de 100 à moins de 150 m2	4 490 821 (19,40%)	5 608 612 (21,75%)	24,89%
150 m2 ou plus	1 245 304 (5,38%)	1 711 220 (6,64 %)	37,41%

Source : Energies Demain d'après les RGP 1999 et 2006.

Dans le modèle adopté dans cette partie de la recherche, la surface moyenne à l'échelle communale est fixée dans chacun des intervalles de manière aléatoire. Le grand nombre de communes permet de s'assurer de la pertinence d'une telle méthode et permet de résoudre la présentation discrète de l'INSEE. Les enquêtes RGP présentent en effet les informations relatives à la surface de logement de manière discrète selon des bornes normatives, chaque logement étant classé, comme on vient de le voir, dans un intervalle de surface allant de moins de 40 m² à plus de 150 m².

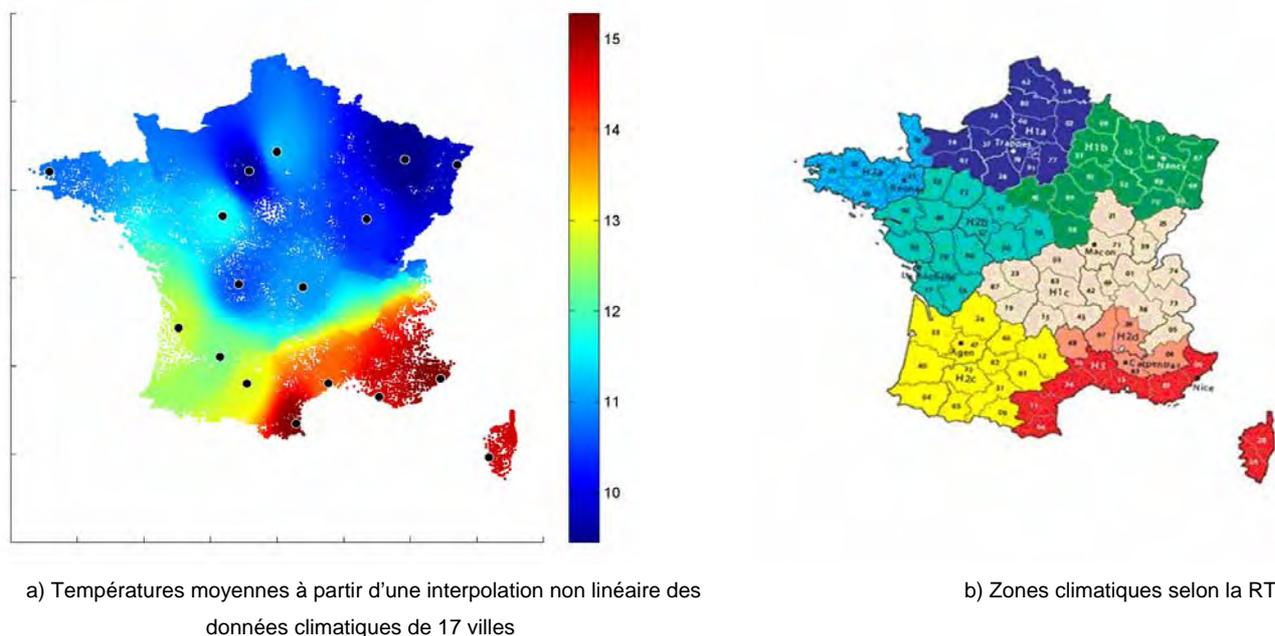
²⁶ Pour effectuer ce calcul, le nombre de logements par tranche de surface est multiplié par la médiane de cette tranche, ce nombre est ensuite rapporté au nombre total de logements. Pour les surfaces supérieures à 150 m², la surface moyenne est prise arbitrairement à 200 m².

2.4. LES HYPOTHESES CLIMATIQUES ET APPORTS CALORIFIQUES GRATUITS

Trop lourd pour être réalisé à l'échelle nationale et au niveau de désagrégation de cette partie de la recherche, le calcul ne peut être envisagé, à l'instar de la partie III de ce rapport (p.33), de manière dynamique. Le recours à une méthode statique fortement inspirée des calculs conventionnels devient pour cette raison incontournable.

Dans les calculs statiques, le territoire national est généralement découpé en zones climatiques plus ou moins nombreuses (le découpage le plus grossier étant le découpage en 3 zones H1, H2 et H3). Dans cette recherche, le modèle est construit à partir des données météorologiques fines de 17 communes réparties spatialement dans l'ensemble du territoire. Ces données fines sont interpolées selon des critères de distances et selon un protocole non linéaire. Les températures de consigne (intérieures) sont considérées comme constantes et s'élèvent à 19°C (en accord avec les hypothèses de la RT). Le modèle repose donc à la fois sur des températures désagrégées à l'horaire et à l'échelle communale et sur des valeurs conventionnelles admises par la réglementation.

Figure 39 : Hypothèses de températures à l'échelle du territoire

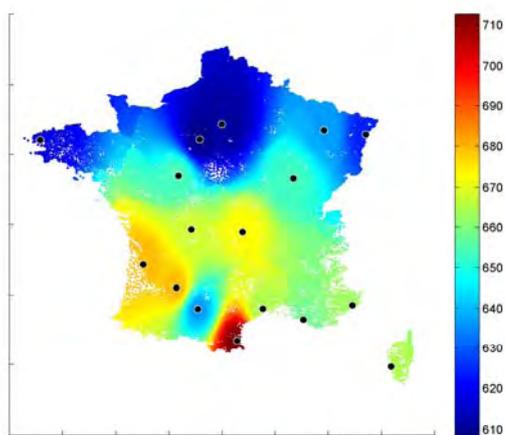


Source : M. MAÏZIÀ, UTEAM

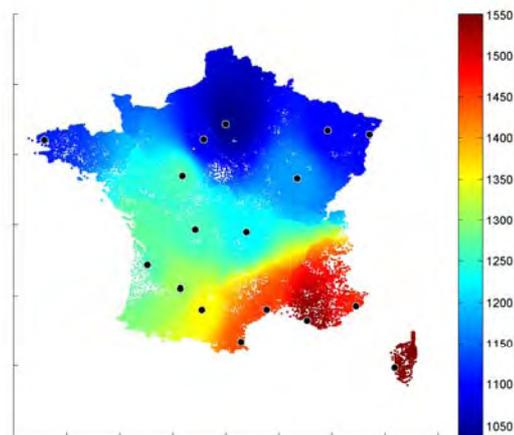
La même méthode est employée pour calculer le rayonnement solaire global et direct entrant dans le calcul des apports gratuits. Le rayonnement direct est pondéré par les effets d'angle d'incidence

en fonction des orientations. On admet ainsi que le rayonnement diffus en est indépendant, ce qui peut paraître discutable à l'échelle microscopique mais tout à fait acceptable au regard des simulations macroscopiques de cette recherche. Le modèle considère en outre que les orientations des bâtiments sont parfaitement équipropables. En d'autres termes, le parc de logements se subdivise en bâtiments sans aucune préférence d'orientation. Cette hypothèse produit un rayonnement moyen de l'ordre de 260 kWh/m² pendant la saison de chauffe, avec des maxima dans le sud de la France de l'ordre de 390 kWh/m² et des minima de 200 kWh/m².

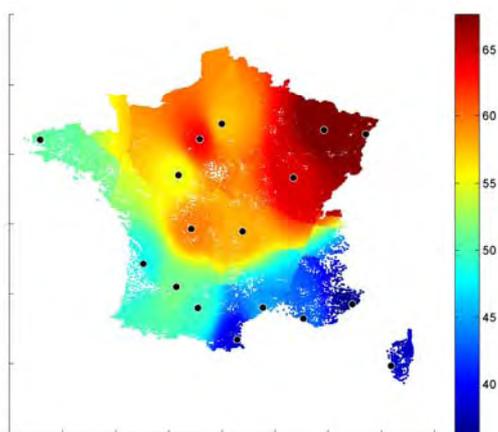
Figure 40 : Hypothèses de rayonnements solaires à l'échelle du territoire



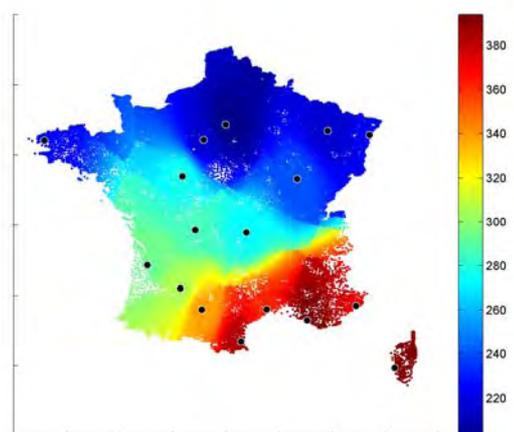
a) Rayonnement direct reçu par une surface horizontale (en kWh/m²)



b) Rayonnement global reçu par une surface horizontale sans prise en compte de la nébulosité (en kWh/m²)



c) Degrés-heures sur la base d'une température de consigne de 19°C (en milliers)

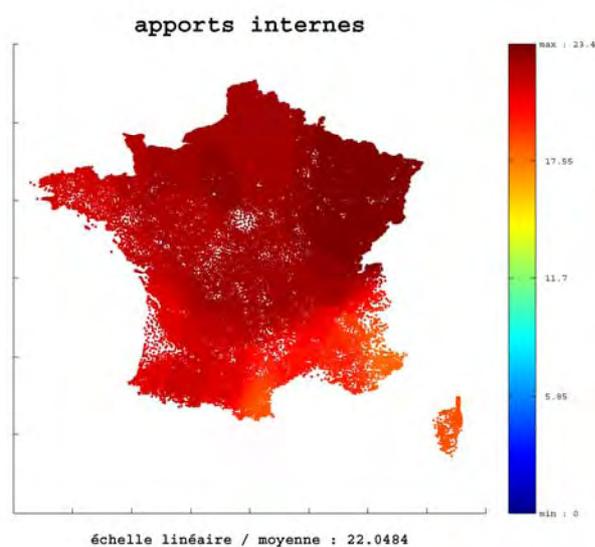


d) Rayonnement solaire moyen reçu par les façades pendant la période de chauffe (en kWh/m²)

Source : M. MAÏZIÀ, UTEAM

Les apports internes sont quant à eux estimés à partir des hypothèses de la réglementation thermique. Cette dernière corrèle les apports d'énergie gratuits dus à l'activité dans les logements à la rigueur de la zone climatique dans laquelle ils se situent (exprimée en degrés-heures). Dans cette recherche, les apports internes, de l'ordre de 20 kWh/m², sont construits à partir d'une interpolation linéaire des valeurs admises par la RT et les degrés-heures de chaque commune.

Figure 41 : Apports internes interpolés de manière linéaire à partir des conventions RT et des DH.

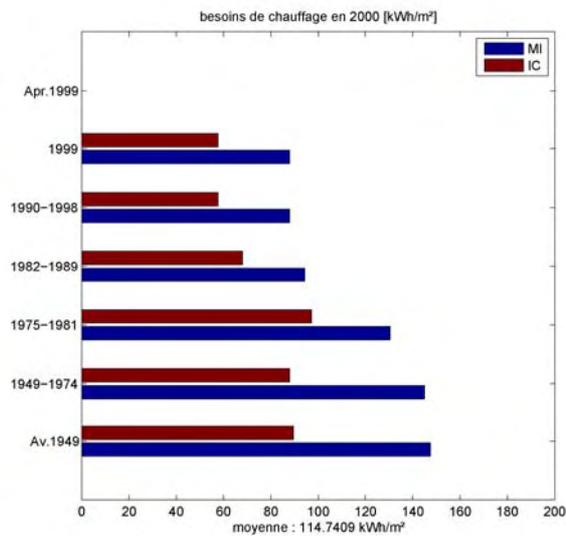


Source : M. MAÏZIÀ, UTEAM

2.5. LES BESOINS ET LES CONSOMMATIONS DE CHAUFFAGE ET D'ECS

L'ensemble des éléments cités plus haut permet de déterminer les besoins de chauffage de chaque type de logement à partir d'hypothèses supplémentaires relatives à la constitution des surfaces d'enveloppe des logements (cf. chap.III.2.2). Ces hypothèses permettent de reconstituer les besoins de chauffage de chaque logement. Souvent commentés (et ne faisant pas forcément l'objet d'un consensus), ces besoins sont analysés dans de nombreuses recherches (cf. bibliographie). Rappelons simplement que leur niveau s'explique principalement par la médiocrité de l'isolation de près des deux tiers des logements et par la faiblesse de la surface d'enveloppe des logements en immeubles collectifs (en comparaison à celle de la maison individuelle).

Figure 42 : Besoins théoriques de chauffage par type de logement et par période de construction

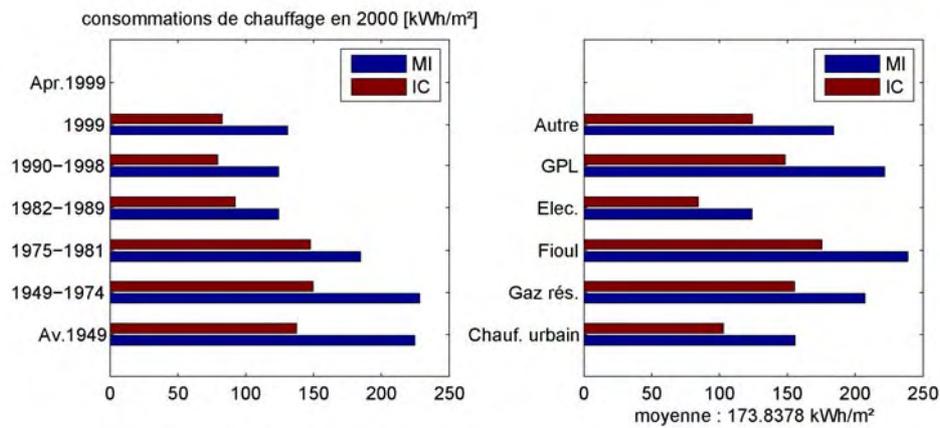


Source : M. MAÏZIÀ, UTEAM

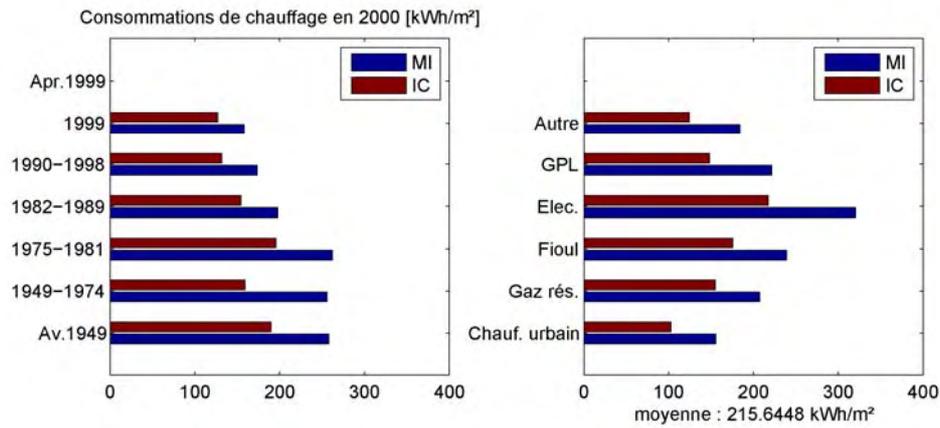
a) Les consommations finales et primaires de chauffage aux horizons retenus

Le passage des besoins de chauffage aux consommations en énergie finale et primaire et en émissions de CO₂ est réalisé à partir d'hypothèse de rendement des systèmes. Ces rendements sont subdivisés en 3 types (génération, distribution et émission) que l'on réunit dans un rendement global pour chaque segment du parc. On suppose que l'état de chaque système (notamment en ce qui concerne son âge) est indépendant de la typologie architecturale du bâti et qu'il se distribue de manière homogène à l'échelle nationale. L'intensité en termes de CO₂ du kWh thermique est adoptée à partir des conventions fondant toutes les analyses énergétiques du bâtiment. Cette recherche ne discute donc pas des calculs conventionnels qui dépendent de la question de la production énergétique (notamment du mix de production de l'électricité) même si cette dernière est fortement dépendante de la demande.

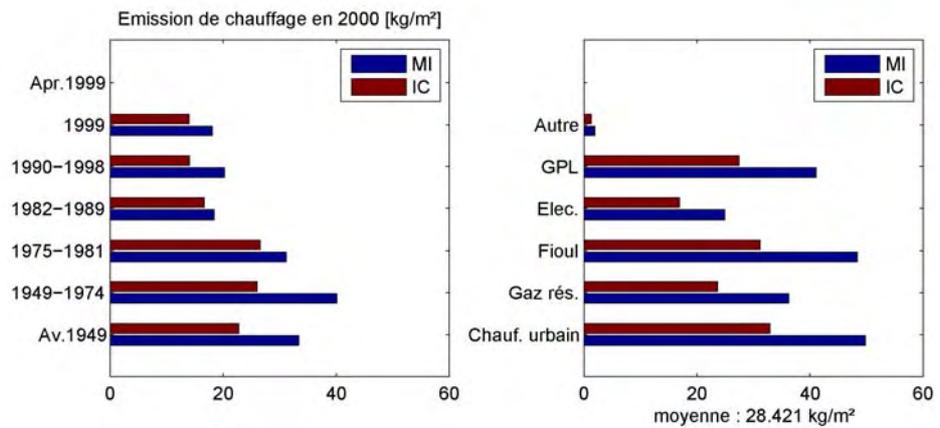
Figure 43 : Consommations primaires et finales unitaires et émissions de CO2 par m2 en 2000



Consommations unitaires de chauffage en énergie finale en 2000



Consommations unitaires de chauffage en énergie primaire en 2000



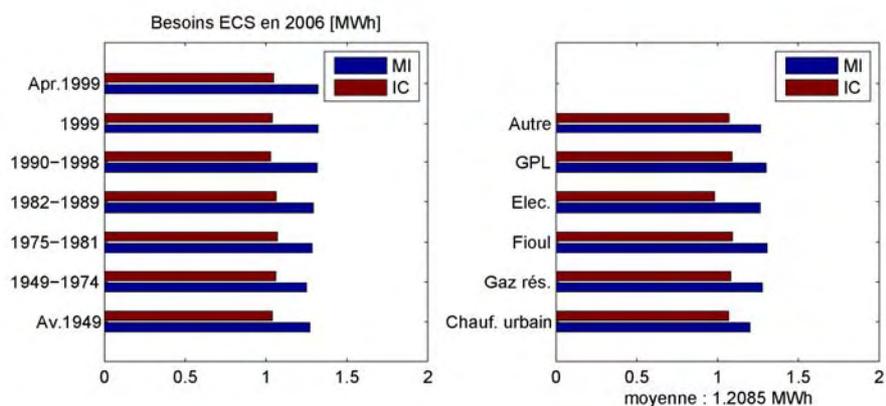
Emission de CO2 unitaires de chauffage en 2000

Source : M. MAÏZIÀ, UTEAM

b) Les consommations finales et primaires chauffage et ecs

L'estimation des besoins d'ECS repose sur les hypothèses développées par ETHEL II couplée à la méthode statique 3CL. On estime que ces consommations sont proportionnelles à un taux de satisfaction du besoin et à un taux de réduction des consommations d'eau dû à la pénétration d'économiseur dans les installations sanitaires. Elles sont en outre liées à la surface habitable et à la température moyenne annuelle de l'eau (prise dans cette étude proche de celle de l'air). Le stockage et la distribution interne dans le logement possède un rendement constant dans le temps (0,9). La génération est ici identique dans sa nature comme dans son rendement à celle du chauffage. Cette hypothèse implique de ne pas considérer les systèmes hybrides (par exemple, production électrique d'ECS et chauffage au gaz) alors que cette configuration peut apparaître fréquemment dans le parc de logement.

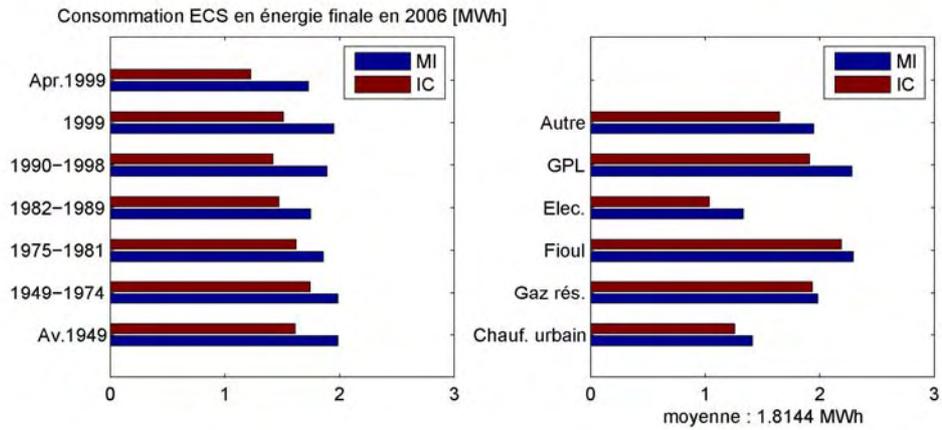
Figure 44 : Besoins ECS par segment du parc en MWh/logement pour l'année 2006.



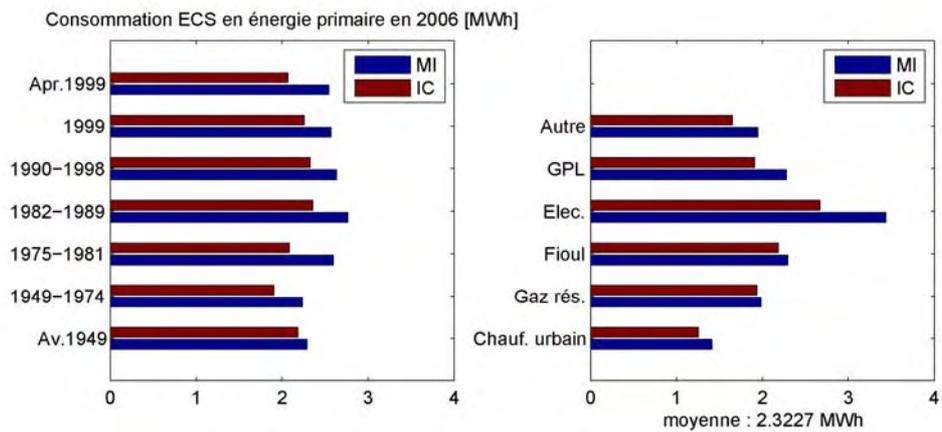
Source : M. MAÏZIÀ, UTEAM

Combinés aux surfaces habitables, à la taille de chaque ménage et aux conditions climatiques, les besoins énergétiques d'ECS avoisinent 1,2 MWh/logement/an. Ils se traduisent, au regard des rendements des systèmes, par une consommation moyenne de l'ordre de 1,8 MWh/logement.

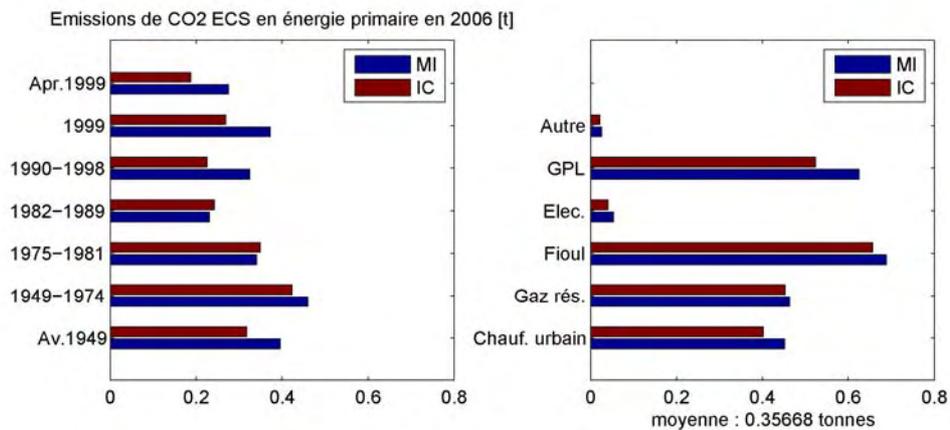
Figure 45 : Consommations en énergie primaire et finale et émissions de CO2 induites par l'ECS



Consommations finales ECS par segment du parc en MWh/logement pour l'année 2006.



Consommations primaires ECS par segment du parc en MWh/logement pour l'année 2006.

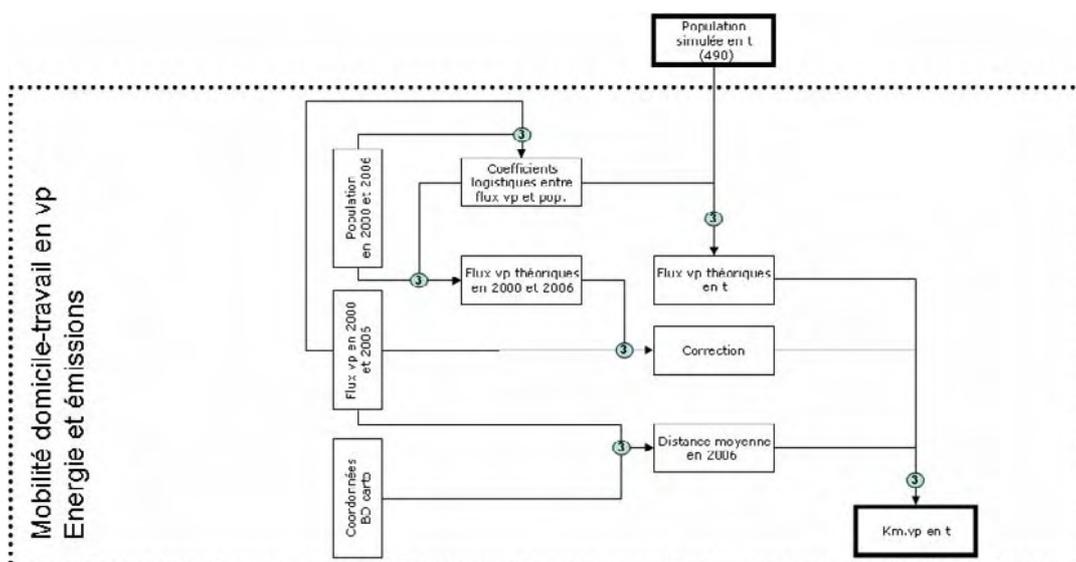


Emissions de CO2 de l'ECS par segment du parc en tonnes / logement pour l'année 2006.

Source : M. MAÏZIÀ, UTEAM

3. LES CONSOMMATIONS D'ENERGIE ET LES EMISSIONS DE CO2 INDUITES PAR LA MOBILITE DOMICILE TRAVAIL EN VP

3.1. POPULATION A L'ECHELLE COMMUNALE, GENERATION DES FLUX VP DOMICILE-TRAVAIL ET DISTANCE MOYENNE DE DEPLACEMENT



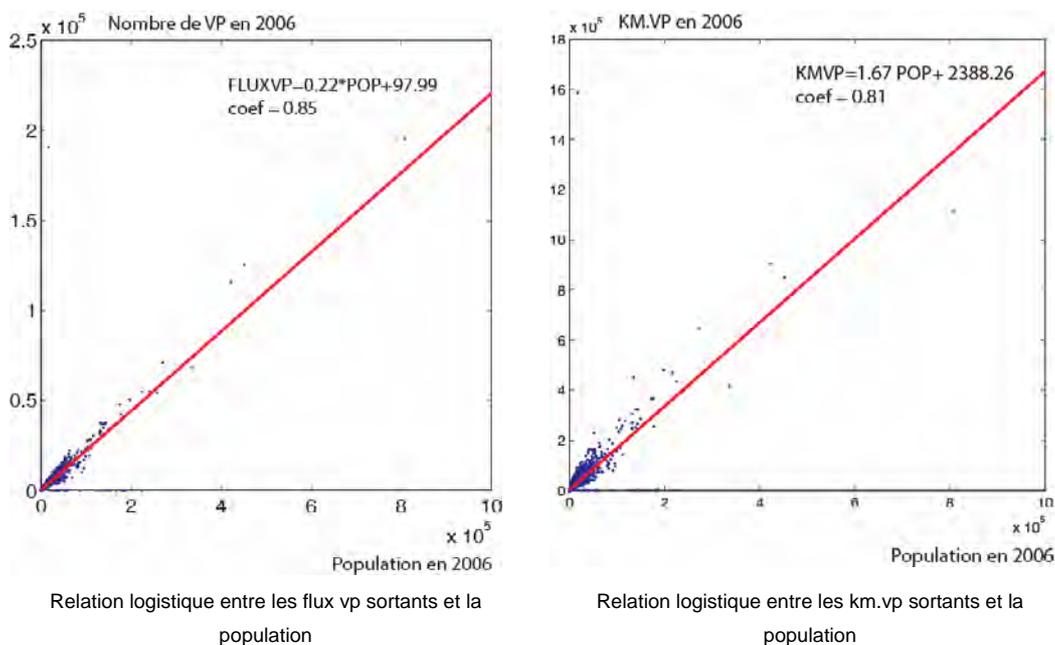
a) La modalité de localisation des ménages dans les communes cibles

Comme signalé plus haut (cf. § 1, p. 83), la population est ventilée, selon le modèle, à partir des bornes de distances moyennes au lieu de travail. Elle progresse ou régresse de manière linéaire (corrigée par les effets démographiques du scénario central de l'INSEE) de manière à tenir compte de leur poids démographique en 2006. Une commune sélectionnée à partir de la distance qui la sépare des lieux d'emploi, partagera la population prévue en 2050 dans des proportions définies par son poids démographiques relatifs en 2006 par rapport aux autres communes sélectionnées. Le déficit de logements engendré par une éventuelle surventilation de la population est comblé par du logement neuf dont les caractéristiques (en termes de taille de ménage et de type de système de chauffage) correspondent à celles du parc neuf simulé selon un scénario tendanciel. Par exemple, un scénario de localisation généralisée des ménages vers des communes rurales conduira à une surreprésentation des maisons individuelles chauffées à l'électricité car cette catégorie domine, en tendanciel, le parc de logements neufs de ce type de commune.

b) La relation logistique entre le nombre de déplacement (flux vp) et la population en 2000 et 2006

Rappelons que la modélisation que nous avons adoptée dans cette recherche repose principalement sur des relations empiriques fortes mais peu expliquées. C'est notamment le cas pour la relation que l'on établit entre la population et les déplacements vp domicile-travail. On choisit ici de considérer uniquement les flux sortants des communes (la génération, cf. modèle gravitaire du chap. IV.2.1) et la population totale de ces dernières. La corrélation observée pour 1999 et 2006 est nette (0.85) et diminue lorsqu'on y intègre les distances parcourues (0.81). Cette diminution est d'autant plus prévisible que les flux vp résultent uniquement du nombre de résidences principales que possède chaque commune alors que les km.vp dépendent, en outre, de la localisation de l'emploi, information non examinée ici de manière directe.

Figure 46 : Relations logistiques entre la population et la mobilité domicile-travail selon les données 2006



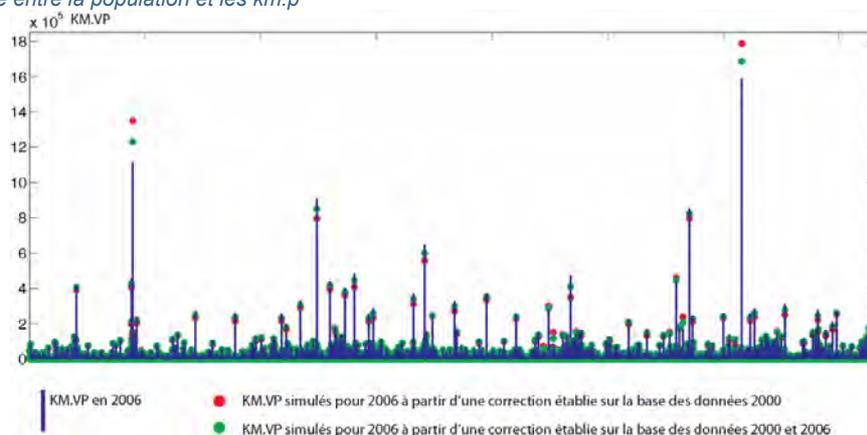
Source : M. MAÏZIÀ, UTEAM

Le modèle isole dans cette recherche l'évolution des flux sortants des effets d'augmentation des distances moyennes observées entre 1999 et 2006 (de l'ordre de 14.34 km en 2006 contre 14.08 en 2000, soit une augmentation de l'ordre de 1.8%) : l'analyse des écarts de mobilité domicile-travail entre les deux RGP montre qu'une simulation fondée sur les flux vp auxquels on affecte dans un second temps des distances moyennes connues est de meilleure qualité que celle basée sur un calcul agrégé établi directement à partir des km.vp.

En effet, un test réalisé sur les données des RGP permet de valider cette dernière assertion. Ce test extrapole à 2006 la corrélation observée en 1999 entre la population et les km.vp parcourus

puis la corrige à partir de l'écart entre la relation logistique ainsi construite et les données observées à la même période.

Figure 47 : Ecart entre les km.vp observés en 1999 et 2006 et les km.vp simulés à partir de la relation logistique entre la population et les km.p



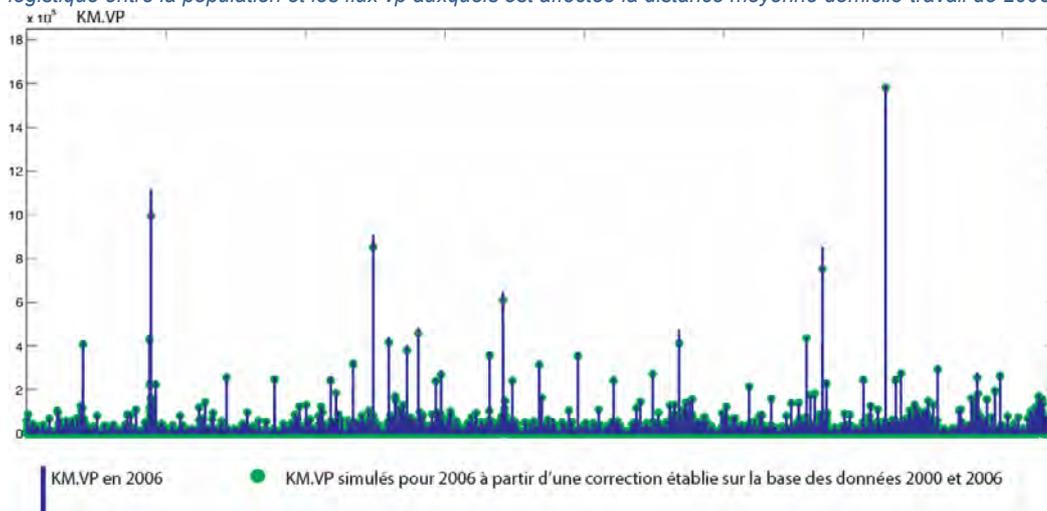
Source : M. MAÏZIÀ, UTEAM

Il aboutit pour 2006 à 169.43Mkm.vp (millions de km.vp) alors qu'il est estimé par les données du RGP à 186.76 soit une sous-estimation de l'ordre de 10%. Un test supplémentaire réalisé afin de minimiser cet écart et fondé sur l'extrapolation des données 1999 et 2006 (et non plus uniquement 1999) et une correction sur les deux périodes permet, bien évidemment, de s'approcher de la cible et d'atteindre une sous-estimation des km.vp de l'ordre de 5 %.

Or, une simulation réalisée sur la seule base du nombre de déplacements en vp auxquels sont affectées les distances moyennes de 1999 (et non plus sur celles des km.vp) permet d'améliorer nettement les résultats : la sous-estimation des km.vp totaux n'est alors que de 3.4 %.

Ces tests constituent les principales raisons qui nous ont amenées à construire un modèle de croissance du trafic vp à partir des seuls flux de génération des communes. Les km.vp qui permettent de déduire les consommations d'énergie et les émissions de CO2 de la mobilité domicile-travail sont établis à partir des distances moyennes de 2006 et négligent de fait les effets de croissance de la distance au lieu d'emploi. Pour l'examen de ces effets, on invite ici le lecteur à la recherche ETHEL I.

Figure 48 : Ecart entre les km.vp observés en 1999 et 2006 et les km.vp simulés à partir de la relation logistique entre la population et les flux vp auxquels est affectée la distance moyenne domicile-travail de 2006



Source : M. MAÏZIÀ, UTEAM

c) Les distances moyennes en 2006

Même si, comme nous venons de le signaler, il ne s'agit pas ici de simuler les effets d'augmentation de la distance moyenne au lieu de travail, le modèle considère que cet indicateur de déplacement demeure tout à fait pertinent pour approcher la question de la localisation des activités. En effet, on peut raisonnablement supposer qu'un bassin d'emploi (ou un territoire plus large) engendrant peu de déplacements (en termes de distances) est composé d'activités à proximité des lieux de l'habitat. Dans la réalité statistique, cette notion est bien plus complexe. En effet, l'évolution de la distance moyenne est due à la conjonction d'un jeu de localisation des activités, des résidences et des mobilités (en termes démographiques mais aussi en termes de lieux d'emploi).

Dans le modèle développé dans cette recherche, seuls les lieux de résidences sont considérés comme figés géographiquement. Ce qui signifie que l'évolution de la distance moyenne serait la conséquence d'un changement de localisation de l'activité et/ou de la modification des choix de destinations. Adopter, comme nous l'avons fait plus haut, une portée moyenne des déplacements domicile-travail constante ne signifie pas forcément que les lieux d'activités sont eux aussi stationnaires : cela implique uniquement que leur délocalisation dans le territoire n'affectent pas globalement les distances parcourues par les actifs.

L'analyse de l'évolution des déplacements domicile – travail est ici réalisée sur la base du découpage géographique en ZAUER (cf. Tableau 23). La croissance des portées de déplacements pour le motif domicile – travail, de l'ordre de 5.8% entre 1999 et 2006 concerne toutes les catégories des zones urbaines et rurales. En d'autres termes, les actifs ayant un emploi parcourent sans distinction un nombre croissant de kilomètres pour se rendre à leur lieu de travail. Cet

accroissement des portées de déplacements semble être lié à l'éloignement des zones résidentielles des centres urbains dédiés à l'emploi.

La plus forte croissance de portée concerne d'une manière générale les communes rurales, notamment les communes de catégorie 4. En revanche, on note que les portées les plus importantes, même si leur croissance est plus faible, sont réalisées à l'intérieur des aires urbaines²⁷, cette tendance s'étant numériquement renforcée entre 1999 et 2006.

Tableau 29 : Portée moyenne des migrations domicile- travail en 1999 et 2006 par ZAUER.

catégorie de ZAUER	portée moyenne 1999	portée moyenne 2006	evolution des portées
1	8,88	9,30	4,7
2	11,45	11,80	3,0
3	11,35	12,05	6,2
4	8,78	9,93	13,1
5	8,96	9,71	8,4
6	9,02	10,01	11,0
Total	9,33	9,87	5,8

Source : *Energies Demain*

Un examen plus détaillé dévoile certaines asymétries dans l'évolution des distances moyennes entre les domiciles et les lieux d'emploi :

- La portée moyenne des flux sortants²⁸ est toujours plus importante que la portée moyenne des flux entrants²⁹ dans les communes de catégorie 1 ;
- La tendance est inverse pour les communes monopolarisées et multipolarisées (catégories 2 et 3) ;
- Les communes rurales reproduisent des schémas de déplacements semblables à ceux communes des aires urbaines.

Tableau 30 : Portée moyenne des migrations domicile- travail en 1999 et 2006 par ZAUER et selon l'orientation des flux..

catégorie de ZAUER	portée moyenne des flux entrants 1999	portée moyenne des flux sortants 1999	portée moyenne des flux entrants 2006	portée moyenne des flux sortants 2006	evolution des portées des flux entrants	evolution des portées des flux sortants
1	9,6	8,0	10,2	8,2	5,7	3,1
2	8,9	12,8	9,2	13,2	3,2	3,2
3	8,2	13,3	8,3	14,2	1,8	6,9
4	8,9	8,6	9,9	10,0	10,7	16,4
5	7,3	9,7	6,7	10,9	-8,3	13,2
6	7,5	10,3	7,7	11,7	3,8	13,9
Total	9,3	9,4	9,8	9,9	5,5	6,1

Source : *Energies Demain*

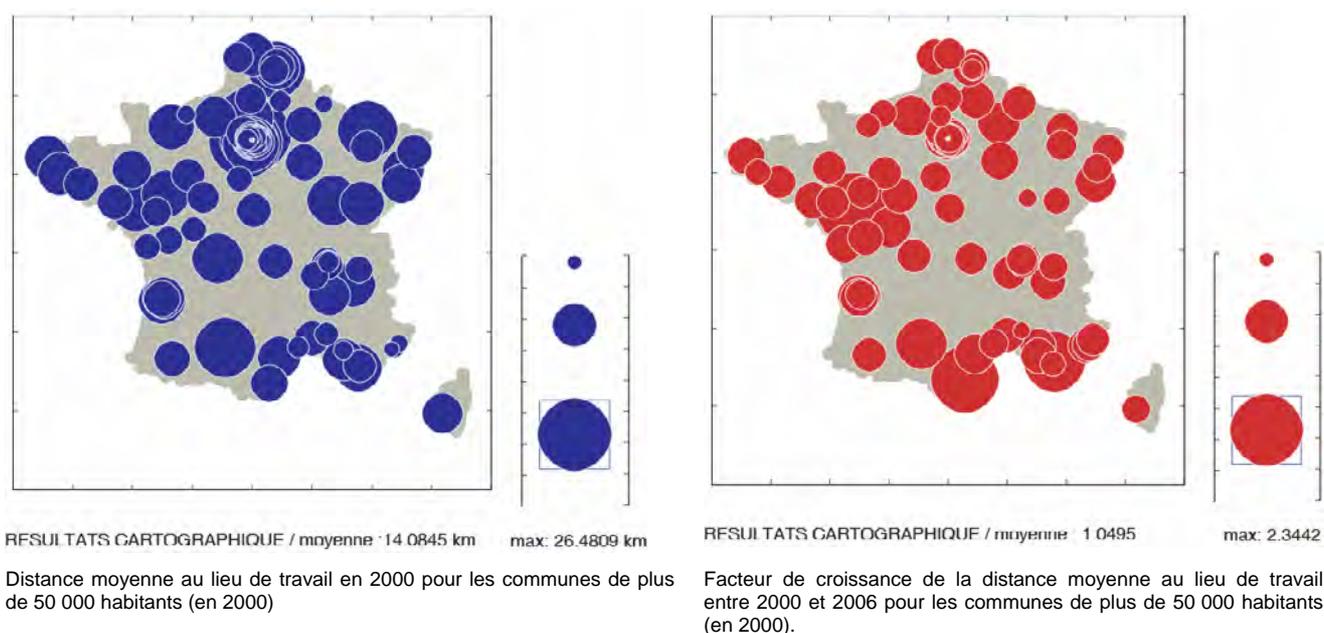
²⁷ Plus particulièrement pour les catégories 2 et 3

²⁸ Flux sortants : ce sont tous les flux au départ de la commune de domiciliation des actifs occupés

²⁹ Flux entrants : ce sont tous les flux à destination de la commune où l'activité professionnelle est exercée

Signalons enfin qu'entre 1999 et 2006, la portée moyenne des flux sortants a augmenté de façon nettement plus importante et plus homogène que les flux entrants. Les augmentations les plus significatives concernent les flux sortants des communes rurales, leurs portées moyennes s'alignant de plus en plus avec celles des communes monopolarisées et multipolarisées.

Figure 49 : Évolution des portées domicile-travail des villes de plus de 50000 habitants entre 1999 et 2006.

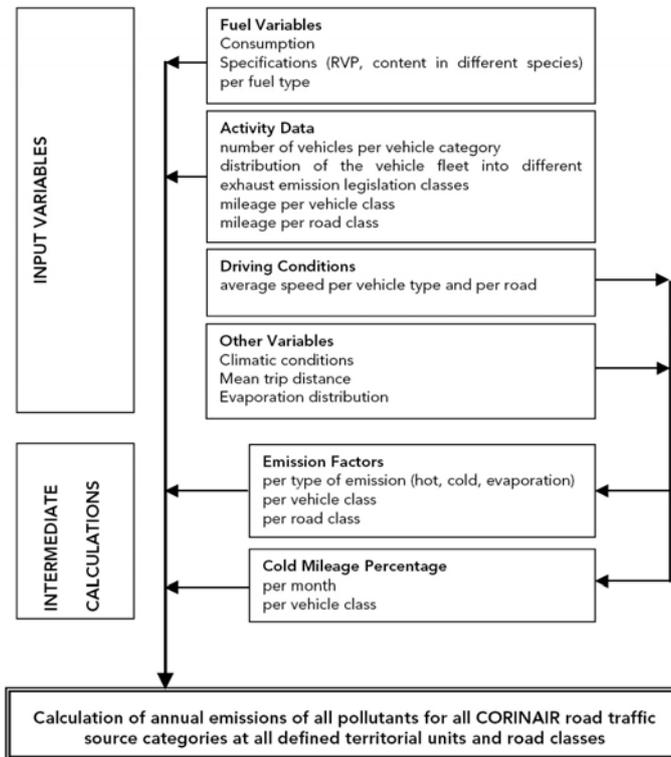


Source : M. MAÏZIA, UTEAM.

3.2. LES CONSOMMATIONS D'ÉNERGIE ET LES ÉMISSIONS DE CO₂ DUES A LA MOBILITÉ DOMICILE-TRAVAIL EN VP

Les hypothèses de consommations énergétiques et d'émission de CO₂ du parc automobile sont contenues dans le modèle COPERT III, ce dernier étant construit à partir d'hypothèses relatives à l'évolution du parc automobile (segmenté selon les types de véhicules –carburant, puissance, etc.- et l'année de leur mise en circulation), au mode de conduite et aux conditions de trafic. L'ensemble de ces hypothèses, non discutées dans cette étude, produit un facteur de consommation et d'émission de CO₂ moyen variable selon la vitesse de déplacement.

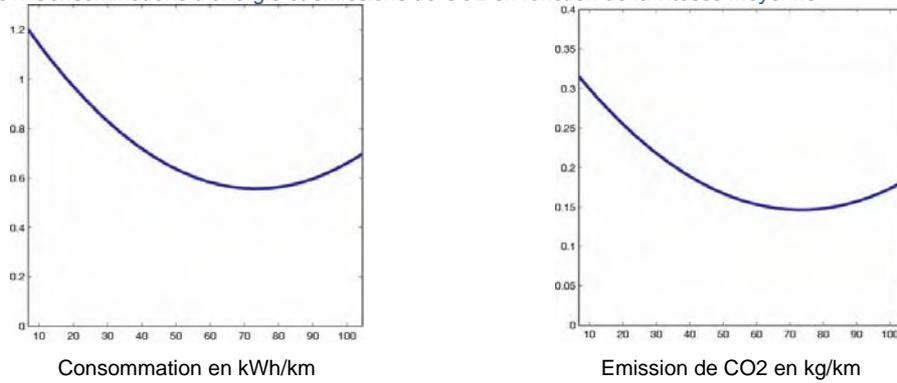
Figure 50 : Structure du modèle COPERT



Source : Ntziachristos L., Samaras S., 2000

Lorsqu'on observe les choses à l'échelle du véhicule, les estimations des consommations et des émissions de CO₂ selon la norme COPERT indiquent une dégradation du rendement énergétique et de son corollaire en CO₂ dans le voisinage des vitesses adoptées en milieu urbain : pour des vitesses variant entre 10 et 50 km/h, la consommation unitaire passe de 1 kWh/km à 0,6 kWh/km (respectivement 250 à 150 gCO₂/km), soit une surconsommation par rapport à la vitesse d'équilibre (aux alentours de 70 km/h) comprise entre 80 à 10 %.

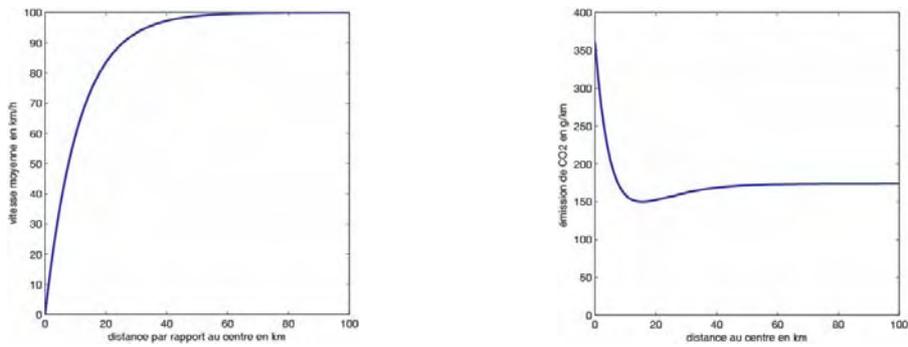
Figure 51: Consommations d'énergie et émissions de CO2 en fonction de la vitesse moyenne



Source : M. MAÏZIÀ, UTEAM

Si l'on considère que la vitesse se réduit en fonction de la distance au centre selon la progression de la Figure 52-a, les consommations et les émissions unitaires se dégradent effectivement selon la Figure 52-b.

Figure 52 : Émissions de CO2 unitaires en fonction de la distance au centre.



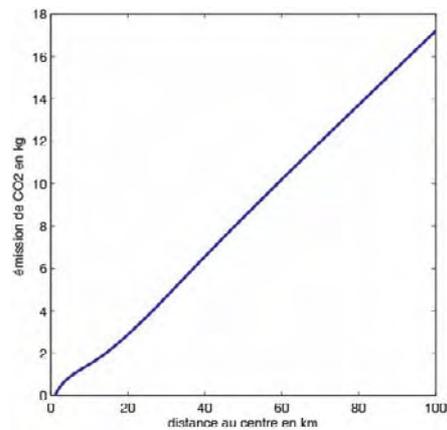
a) Hypothèse de vitesse moyenne en fonction de la distance au centre

b) Émissions de CO2/km des vp en fonction de la distance au centre

Source : M. MAÏZIÀ, UTEAM

On remarque néanmoins que les gains de rendement ne compensent pas, à l'échelle d'un véhicule, les effets de distances parcourue.

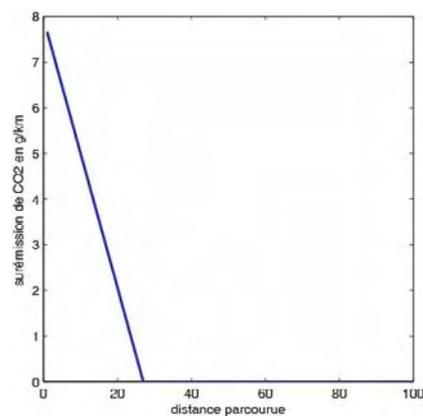
Figure 53 : Émissions cumulées de CO2 en fonction de la distance au centre.



Source : M. MAÏZI, UTEAM

Les émissions de CO2 ne se limitant pas aux émissions à chaud, on démontre que des surémissions dues aux démarrages à froid viennent pénaliser les courtes distances. En effet, leur poids sur les émissions totales de CO2 est d'autant plus grand que la distance parcourue est réduite. Ces surconsommations, de l'ordre de 7,5g/km, corrélées à la distance parcourue, sont décroissantes dans les proportions données par la Figure 54.

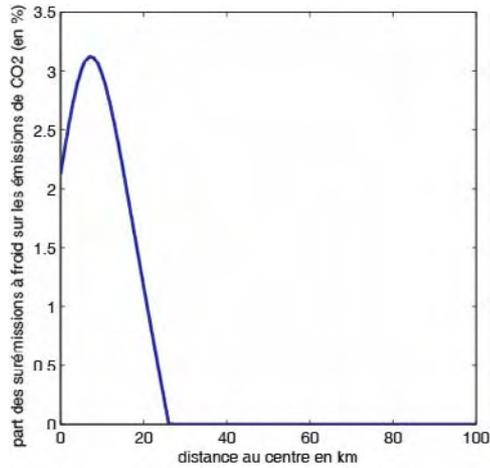
Figure 54 : Surémissions de CO2 induites par le démarrage à froid en fonction de la distance



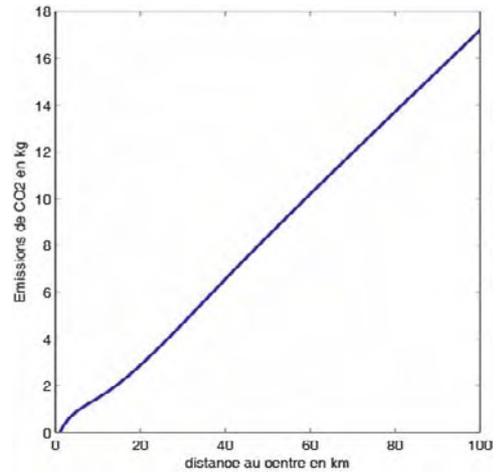
Source : M. MAÏZI, UTEAM

Or, additionnées aux émissions à chaud, ces surémissions deviennent négligeables au regard des effets des distances parcourues. En effet, elle représente en moyenne à peine plus de 2% sur les 25 premiers kilomètres et reconstituent quasi à l'identique la courbe des émissions de CO2 à chaud.

Figure 55 : Part des surémissions dues au démarrage à froid.



a) Surémissions en % dues aux démarrages à froid.

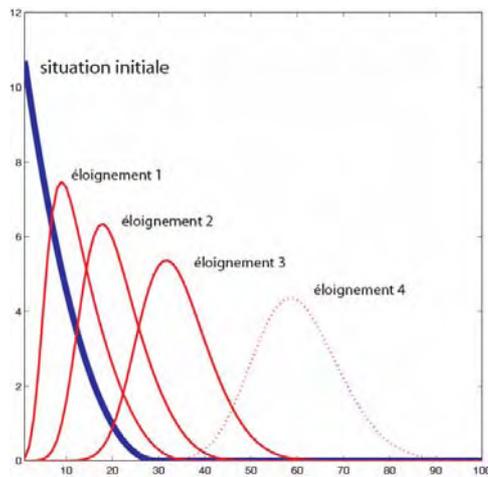


b) Emissions à froid et à chaud en fonction de la distance au centre.

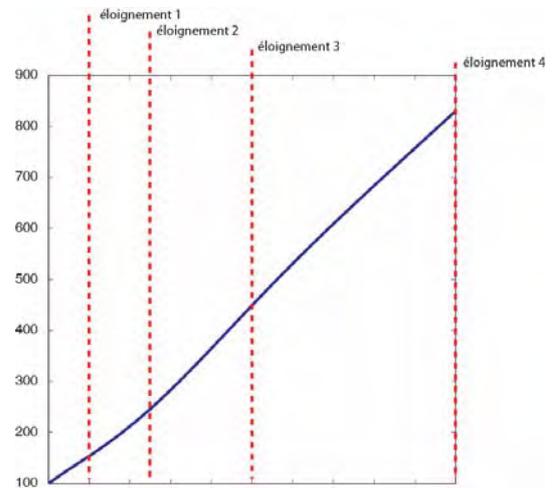
Source : M. MAÏZIÀ, UTEAM

Le poids de la distance sur les émissions de CO₂, primordiale à l'échelle du véhicule, se trouve confirmé lorsqu'on intègre à la modélisation les effets de flux. Ci-dessous, ont été simulés les effets de l'éloignement au centre sur les consommations et les émissions de CO₂ : l'éloignement est ici assimilé à un jeu dynamique de sortants des zones les plus proches du centre et d'entrant dans les zones les plus périphériques. La situation initiale représente, en base 100, une configuration où la majorité des migrants sont localisés à proximité du centre vers lequel ils se dirigent pour un motif donné, selon la distribution représentée en bleu dans la figure ci-dessous (Figure 56). Leur délocalisation vers la périphérie modifie progressivement cette distribution en développant des pics de moindre intensité dans des zones de plus en plus éloignées (courbes rouges de la même figure). La modification d'une telle structure théorique de la localisation des migrants engendre sans conteste une augmentation nette et quasi linéaire des consommations d'énergie et des émissions de CO₂ des déplacements vers le centre.

Figure 56 : Relation théorique entre éloignement au centre et consommations d'énergie et émissions de CO2



a) Part des migrants selon leur localisation pour rapport au centre.



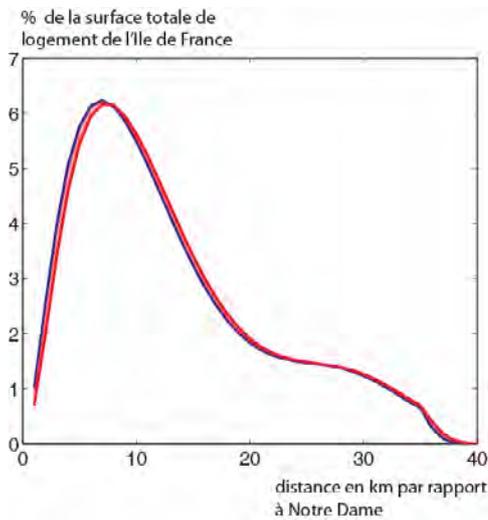
b) Émissions de CO2 et consommations d'énergie en base 100 selon le type d'éloignement au centre.

Source : M. MAÏZIÀ, UTEAM

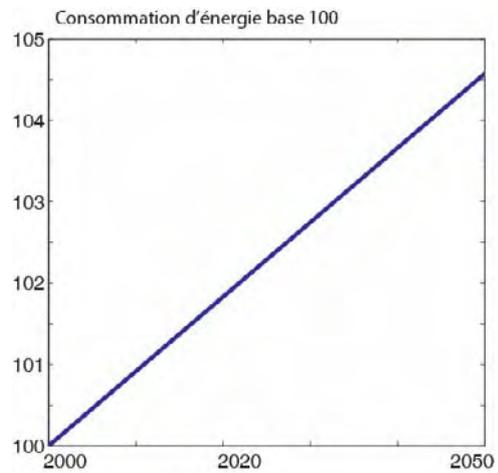
Cet exercice est réalisé pour l'Ile-de-France à partir de la distribution des surfaces totales de logements supposés induire des déplacements vers le centre pour un motif donné³⁰. Ici, seuls les effets tendanciels sont à prendre en compte : en l'absence d'étude fine sur la question, on a considéré que l'éloignement par rapport au centre de Paris correspondait à une migration de 10% des surfaces de logement observées en 2000 selon une distance de l'ordre d'un kilomètre tous les 5 ans (ce qui peut paraître peu élevé au regard des évolutions observées entre 1990 et 2000). L'important ici est d'observer que la progression des consommations d'énergie croît alors que la part des déplacements se réalisant à des vitesses à faible rendement énergétique diminue. Notons également que la situation actuelle de l'Ile-de-France correspond peu ou prou à celle de l'éloignement 1 décrit dans le cas théorique précédent et donc à une « surconsommation » de l'ordre de 50% par rapport à une configuration plus centralisée.

³⁰ Cette distribution est issue de A. SAUVANT, D. ROUCHAUD, « Localisation des logements en Ile-de-France: influences de la desserte par le RER, de la distance et de la fiscalité locale », Note de synthèse du SES, nov-déc. 2002, 6p.

Figure 57 : Eloignement par rapport à Paris et consommations d'énergie de la voiture particulière.



a) Distribution en % des surfaces de logements en fonction de la distance à Paris



b) Croissance en base 100 des consommations d'énergie des transports vp

Source : M. MAÏZIÀ, UTEAM

La globalité de ce raisonnement permet d'affirmer que les effets de distances parcourues surpassent ceux induits par la réduction de la vitesse due à la congestion en centre urbain, au point de rendre cette dernière négligeable et de considérer quasi linéaire la consommation d'énergie et les émissions de CO₂ afférentes. Cette dernière assertion nous permet ainsi de considérer un facteur de consommation en 1999 et 2006 avoisinant 0,7 kWh/km³¹ et un facteur d'émissions de CO₂ de 175 gCO₂/km.

En outre, elle permet de clarifier dans une certaine mesure le débat concernant les effets de la forme urbaine sur la congestion et donc sur la réduction des vitesses aux abords et aux centres des villes. Nous avons effectivement montré que si une concentration du trafic dans les centres réduit effectivement le rendement des véhicules, elle n'annule pas les bénéfices énergétiques d'une densification des centres.

4. OCCUPATION ET ARTIFICIALISATION DU SOL

4.1. DES TISSUS URBAINS À L'OCCUPATION DU SOL

³¹ Sur la base d'un PCI (pouvoir calorifique inférieur) du carburant de 43.8 MJ/kg soit 12 kWh/kg

Comme nous l'avons déjà expliqué auparavant, plusieurs séries de données relatives aux bâtiments ont été utilisées dans le cadre de ce travail, afin de mieux comprendre les émissions de CO2 produites par le parc immobilier. Ces données ne s'appliquent qu'à une partie des bâtiments, mais sont représentatives de l'ensemble. Pour pouvoir extrapoler les valeurs obtenues à l'échelle microscopique (bâtiment), au niveau national (échelle macroscopique), nous devons savoir si ce travail pouvait être exécuté via l'utilisation de données géographiques. Ce chapitre explique cette méthodologie en détails.

Plusieurs sources de données peuvent être utilisées pour extrapoler les résultats du modèle à l'échelle macroscopique. La première source de données est de nature statistique et relève essentiellement de l'INSEE. Ces données sont homogènes pour l'ensemble du territoire et sont généralement extraites de modèles statistiques, produits dans le cadre de questionnaires nationaux. Même si de nombreuses questions peuvent se poser du fait de la méthodologie utilisée pour satisfaire le critère d'exhaustivité des fichiers de données de l'INSEE, il s'agit généralement des meilleures sources que nous pouvons obtenir. L'un des problèmes que présentent ces données, vient du fait que les informations sont géographiquement liées aux unités administratives (municipalités ou IRIS) et qu'elles ne sont donc pas explicites dans l'espace, puisqu'elles ne différencient pas le centre, les banlieues et autres constructions.

Pour éviter ce problème, une méthodologie a été développée afin de savoir s'il était possible de combler l'écart entre les bâtiments et les statistiques. A ces fins, les séries de données géographiques constituent l'autre type de sources utilisé. L'une d'entre elles est homogène pour toute l'Europe (Corine Land Cover de l'Agence Européenne de l'Environnement), alors que les autres concernent seulement l'Ile de France (Mode d'Occupation des Sols, Institut d'Aménagement et d'Urbanisme d'Ile de France).

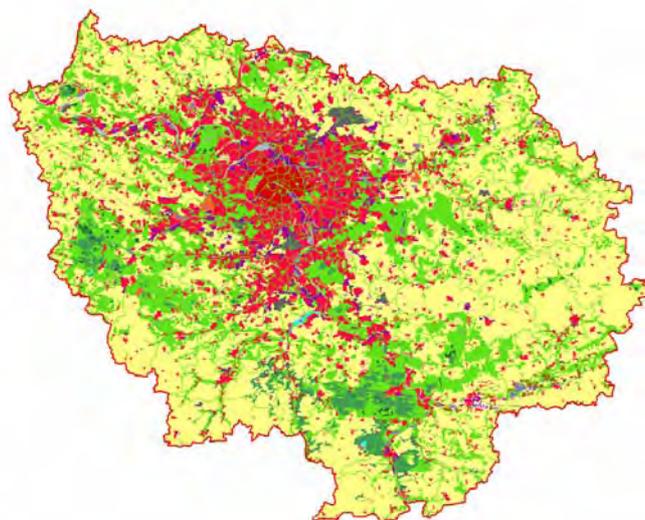
Dans ce chapitre, les deux séries de données sont présentées et comparées, de même que la méthodologie utilisée pour la comparaison. A la fin de ce chapitre, une analyse critique de la possibilité d'utiliser les deux séries de données dans le cadre de ce travail, est présentée.

a) La base CORINE LAND COVER

La première série de données présentée est la base de données CORINE Land Cover 2000, créée par l'EEA, Agence Européenne de l'Environnement. L'objectif du projet Corine Land Cover consistait à créer une base de données géographiques sur la répartition de l'occupation des sols en Europe et particulièrement ceux liés aux environnements naturels. Il s'agit de l'une des meilleures bases de données du SIG, disponible pour l'ensemble de la communauté européenne, parce qu'elle a été développée dans le cadre d'un processus systématique suivant les mêmes directives pour chaque pays. De ce fait, cette série de données s'avère particulièrement utile pour comparer l'occupation des sols et son impact dans divers pays d'Europe.

La base de données a été présentée pour la première fois en 1990, dans sa version actuelle, grâce à l'imagerie numérique, puis a été mise à jour en 2000 grâce à une meilleure méthodologie. Une nouvelle mise à jour est également disponible pour l'année 2006.

Figure 58 : Base de données Corine Land Cover 2000 pour la région Ile de France



Source : IFEN

b) La base Modes d'Occupation du Sol - MOS

Depuis 1982, le MOS assure un suivi régulier de l'occupation du sol de l'Île-de-France. Le MOS (Mode d'Occupation du Sol) est l'atlas cartographique informatisé de l'occupation du sol de l'Île-de-France. Actualisé régulièrement depuis sa première édition de 1982, le MOS permet de suivre et d'analyser en détail l'évolution de l'occupation du sol sur tout le territoire régional. L'IAU Île-de-France vient de terminer la mise à jour 2003 du MOS.

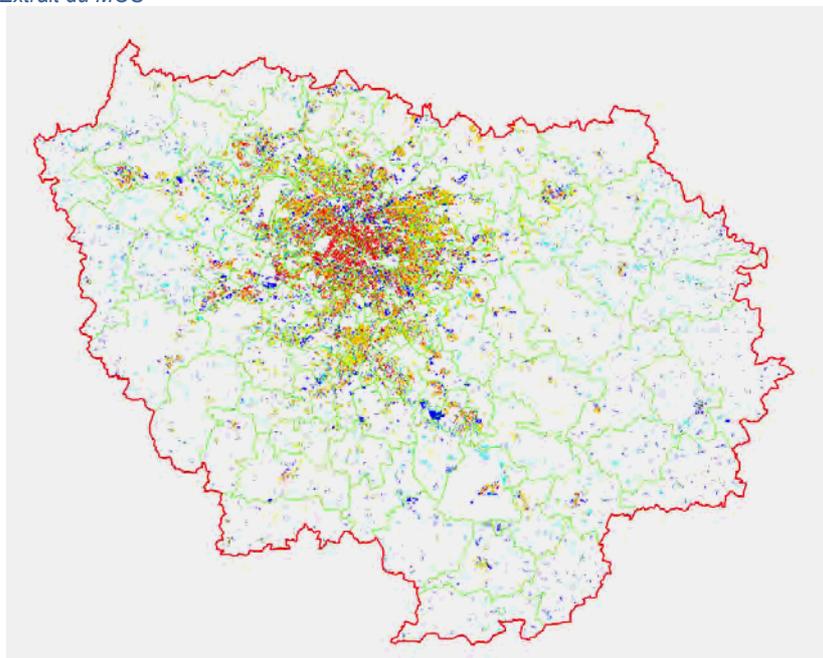
Le premier inventaire complet de l'occupation du sol en Île-de-France (Modes d'Occupation des Sols : MOS) date de 1982. Depuis cette date, le MOS a été mis à jour cinq fois (1987, 1990, 1994, 1999 et 2003). Grâce à ces mises à jour très régulières et à sa précision à la fois thématique (la nomenclature de base comporte 83 postes de légende) et géométrique (précision du 1/5000) le MOS permet de visualiser et d'analyser en détail les évolutions de l'occupation du sol régional : extension de l'urbanisation, mutation des tissus urbains, transformation des espaces ruraux.

Chaque mise à jour du MOS est établie à partir d'une couverture photographique aérienne complète de l'Île-de-France et de diverses sources d'informations complémentaires (fichiers administratifs, informations adressées par les communes, etc.). Les informations sur l'occupation du sol régional sont traduites par l'IAU Île-de-France sous forme de cartes ou de tableaux chiffrés

(bilans de surfaces) qui peuvent être mis à la disposition des collectivités locales ou des services intéressés.

Comme la précédente, la mise à jour 2003 a été réalisée directement à l'écran, à partir d'une orthophotographie numérique régionale en couleur de résolution 1 mètre acquise auprès de l'IGN. Cette technique efficace permet un travail plus précis et plus fiable que la méthode traditionnelle (photo-interprétation sur calques, à partir de clichés papier), tant pour la photo-interprétation visuelle que pour la saisie des modifications géométriques.

Figure 59 : Extrait du MOS



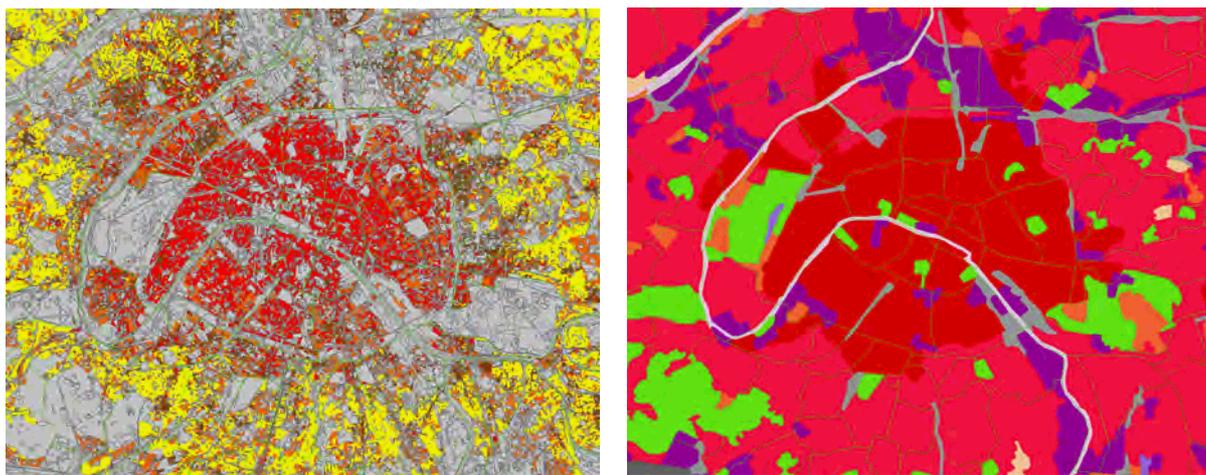
Source : IAU

c) La comparaison entre le MOS et la base CLC

Comme nous l'avons expliqué lors de la description des deux bases de données, leur objectif et leur composition sont réellement différents, même si les résultats vont dans le même sens, à savoir la création d'une base de données sur l'occupation des sols. Les différences observées sur les deux bases de données montrent à quel point un modèle représentant le même phénomène réel peut être interprété de deux manières différentes. Ce travail n'a pas pour but de juger laquelle des deux bases est la meilleure et la plus appropriée, mais de partager les problèmes liés aux différentes sources et à leur association. Le Schéma 2 montre la différence d'échelle et du contenu informatif des deux bases de données. Nous l'expliquerons ultérieurement, en détails, le nombre d'objets et la résolution sont beaucoup plus importants dans la base de données MOS, mais son

étendue géographique se limite à l'Ile de France. S'il était possible d'extrapoler les informations figurant dans le MOS dans les catégories d'occupation des sols de Corine, sans nuire à la qualité, cela nous permettrait d'extrapoler les données microscopiques (les bâtiments, par exemple) de l'Ile de France à d'autres régions françaises, voire de les comparer à d'autres pays européens.

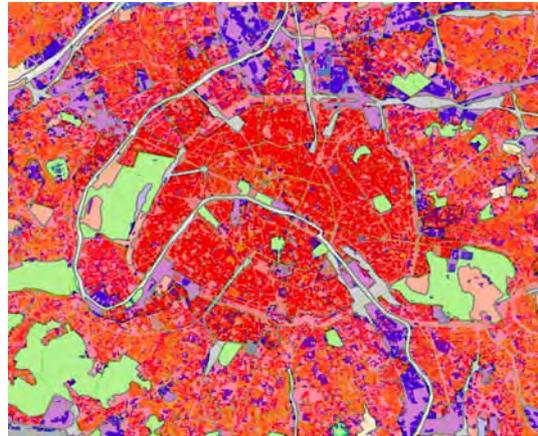
Figure 60 : Comparaison des informations du MOS (à gauche) et de CORINE (à droite) pour la ville de Paris



Sources: IAU et IFEN

La première comparaison visuelle montre que les deux bases de données sont extrêmement liées, au niveau macroscopique. Cette comparaison est représentée sur le Schéma 3. Il s'agit d'un fait très important, parce qu'il montre qu'au moins la répartition de la classification de l'occupation des sols prise en compte pour l'élaboration des deux bases de données, est extrêmement liée et qu'il serait donc possible de développer une méthode qui compare les informations figurant dans les deux bases de données. Dans le Schéma 3, les différences observées sur les deux bases de données, en termes d'informations et de résolution, sont également visibles, ce que nous montre déjà le Schéma 2. Ces différences sont ultérieurement expliquées en détails.

Figure 61 : Recouplement de MOS et de CLC pour Paris



Source : EIFFER d'après IAU et IFEN

Comme c'est généralement le cas pour ce genre de bases de données, les répartitions de classe sont disponibles à divers niveaux. A titre de comparaison, nous décrivons le plus haut niveau de résolution (niveau 3 pour Corine), observé dans le Schéma 4. Le nombre de classes constitue la première différence entre les deux bases de données. CLC est divisé en 44 classes, alors que le MOS en contient 83. Comme nous le verrons plus tard, le nombre de classes CLC observées en Ile de France est même inférieur (27), parce que de nombreuses occupations des sols ne sont pas représentées dans la région. Les MOS est présenté en deux versions différentes, une avec 48 classes, l'autre avec 83, alors que Corine compte trois niveaux : 5 classes pour le niveau 1, 15 classes pour le niveau 2 et 44 classes pour le niveau 3.

Dans le cadre de Corine land cover, la subdivision des classes est mieux représentée, en rapport avec les surfaces naturelles, ce qui était le principal objectif pour l'élaboration de la base de données. Par exemple, les forêts sont réparties en trois classes différentes et les points d'eau, en cinq types différents. Les surfaces artificielles, particulièrement celles liées au tissu urbain, sont mal classées par rapport au MOS. Ce point sera davantage expliqué lors de la comparaison des classes urbaines.

Tableau 31 : Nomenclature de Corine Land Cover à divers niveaux

Level 1	Level 2	Level 3
1. Artificial surfaces	1.1 Urban fabric	1.1.1 Continuous urban fabric
		1.1.2 Discontinuous urban fabric
		1.2.1 Industrial or commercial units
		1.2.2 Road and rail networks and associated land
	1.2 Industrial, commercial and transport units	1.2.3 Port areas
		1.2.4 Airports
		1.3.1 Mineral extraction sites
		1.3.2 Dump sites
	1.3 Mine, dump and construction sites	1.3.3 Construction sites
		1.4.1 Green urban areas
	1.4 Artificial, non-agricultural vegetated areas	1.4.2 Sport and leisure facilities
		2.1.1 Non-irrigated arable land
	2. Agricultural areas	2.1 Arable land
2.1.3 Rice fields		
2.2 Permanent crops		2.2.1 Vineyards
		2.2.2 Fruit trees and berry plantations
2.2.3 Olive groves		
2.3 Pastures		
2.4 Heterogeneous agricultural areas		2.4.1 Annual crops associated with permanent crops
		2.4.2 Complex cultivation patterns
2.4.3 Land principally occupied by agriculture, with significant areas of natural vegetation		2.4.4 Agro-forestry areas
		3.1.1 Broadleaved forest
3. Forests and semi-natural areas	3.1 Forests	3.1.2 Coniferous forest
		3.1.3 Mixed forest
		3.2.1 Natural grasslands
	3.2 Scrub and/or herbaceous vegetation associations	3.2.2 Moors and heathland
		3.2.3 Sclerophyllous vegetation
		3.2.4 Transitional woodland shrub
	3.3 Open spaces with little or no vegetation	3.3.1 Beaches, dunes, sands
		3.3.2 Bare rocks
		3.3.3 Sparsely vegetated areas
		3.3.4 Burnt areas
		3.3.5 Glaciers and perpetual snow
4.1.1 Inland marshes		4.1.2 Peat bogs
		4.2.1 Salt marshes
4.2 Maritime wetlands	4.2.2 Salines	
	4.2.3 Intertidal flats	
5. Water bodies	5.1 Inland waters	5.1.1 Water courses
		5.1.2 Water bodies
	5.2 Marine waters	5.2.1 Coastal lagoons
		5.2.2 Estuaries
		5.2.3 Sea and ocean

Source : IFEN

Le Tableau 32 présente une comparaison des principales informations statistiques, issues des deux bases de données. Certaines observations d'importance sont possibles :

Dans le MOS, il est possible de trouver 100 fois plus d'objets que dans le CLC, par conséquent, les objets sont 100 fois plus gros dans le CLC que dans le MOS. Par ailleurs, le MOS est divisé en 83 classes et fournit une bien meilleure définition, alors que le CLC est divisé en 27 classes sur trois niveaux différents

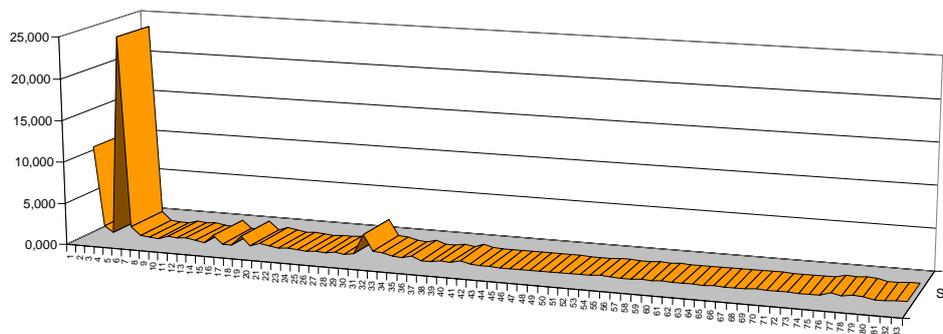
Tableau 32 : Comparaison statistique des objets contenus dans le MOS et dans CLC

MOS 83 (IdF)	Corine Land Cover 2000 (IdF)
Décompte :357677	Décompte :4404
Minimum :0,090222	Minimum :1,526017
Maximum :32737007,415	Maximum :2098951304,14
Somme :12072440498,164	Somme : 12068749860,666
Moyenne :33752,353	Moyenne :2740406,417
Ecart type :366492,24	Ecart type :41386874,65

Source : Eifer

En ce qui concerne la répartition des zones dans les différentes classes de chaque base de données, une autre analyse peut être réalisée. Si l'on étudie les données du MOS, il s'avère qu'un quart de la zone relève de la catégorie « terres labourées ». Dix autres pour cent se rapportent aux « bois ou forêts ». Cette situation s'explique simplement : étant donné que l'objectif de la base de données consiste à établir le classement de l'occupation des sols en zone urbaine, toutes les zones liées à l'agriculture sont regroupées sous la même catégorie. Il en est de même pour les forêts. Ce qui signifie que puisque les zones urbaines sont beaucoup mieux classées, en catégories plus précises, ces catégories sont plus petites et seule la classe 30 « habitat individuel » a une certaine importance par rapport au total, puisqu'elle représente 2,54%.

Figure 62 : Distribution MOS



Zones essentiellement concentrées en :

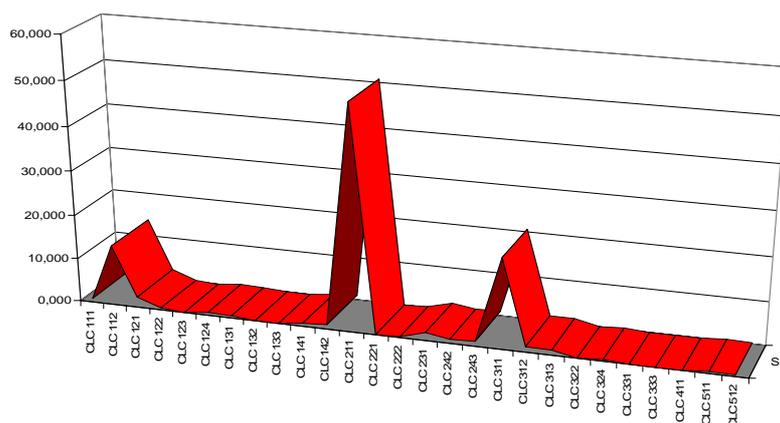
- 1 – Bois ou forêts 10,616%
- 4 – Terres labourées 24,177%
- 5 – Surfaces en herbe à caractère agricole 1,166%
- 17 – Parcs ou jardins 1,113%
- 30 – Habitat individuel 2,545%

Source : Eifer

Etant donné que le nombre de classes définies dans CLC est moins important que dans le MOS, le résultat est encore plus extrême. Plus de 50% des zones dépendent de la catégorie « Terre arable

non irriguée » et 20% de « Forêts de feuillus ». On peut observer la différence de classement pour les zones urbaines au niveau de la valeur du « tissu urbain discontinu », qui regroupe plus de 13% du total. Ce nombre est bien inférieur à celui du MOS, puisque la catégorie est répartie en de nombreuses autres sous-classes, comme nous le montrerons plus tard.

Figure 63 : Distribution CLC



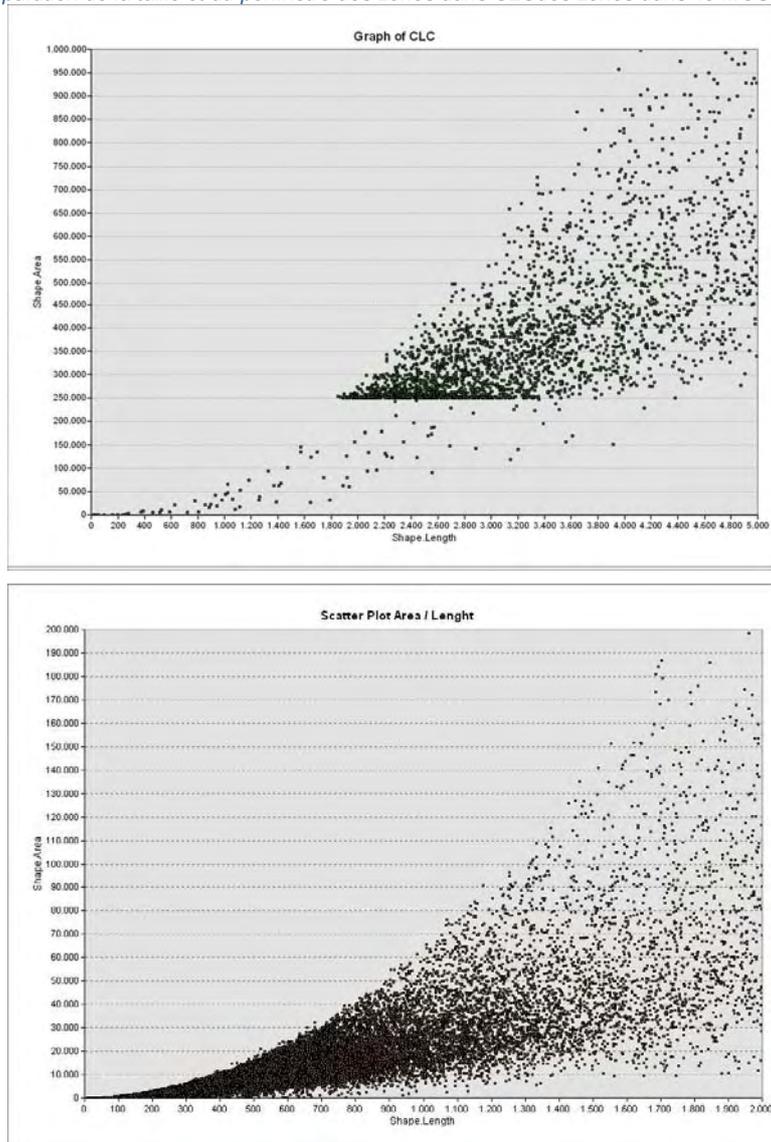
Zones essentiellement concentrées en :

- 112 – Tissu urbain discontinu 13,723%
- 121 – Parcs industriels ou commerciaux 2,373%
- 211 – Terre arable non irriguée 50,726%
- 311 – Forêts de feuillus 20,594%

Source : Eifer

Puisque les deux bases de données comparées ont été conçues pour répondre à différents besoins, à des échelles différentes et à partir de sources différentes, il convient de connaître les principales différences liées à la taille et à la forme (périmètre) des objets contenus. Les Schémas 1 et 2 présentent les différences de répartitions. Comme nous pouvons le constater sur l'image de gauche, le facteur le plus important repose sur le fait qu'il n'y a presque aucune valeur inférieure à 25 ha dans CLC. Cette situation est due à la nature de la base de données, comme l'explique la spécification (REF). Dans CORINE, les zones inférieures à 25 ha sont dues à la procédure « clip » destinée à limiter l'analyse à l'Île de France. Dans le cadre de ce processus, le périmètre de la région coupe les objets en CLC2000, par conséquent, on observe des restes plus petits que les objets figurant sur la base de données d'origine.

Figure 64 : Répartition de la taille et du périmètre des zones dans CLCdes zones dans le MOS



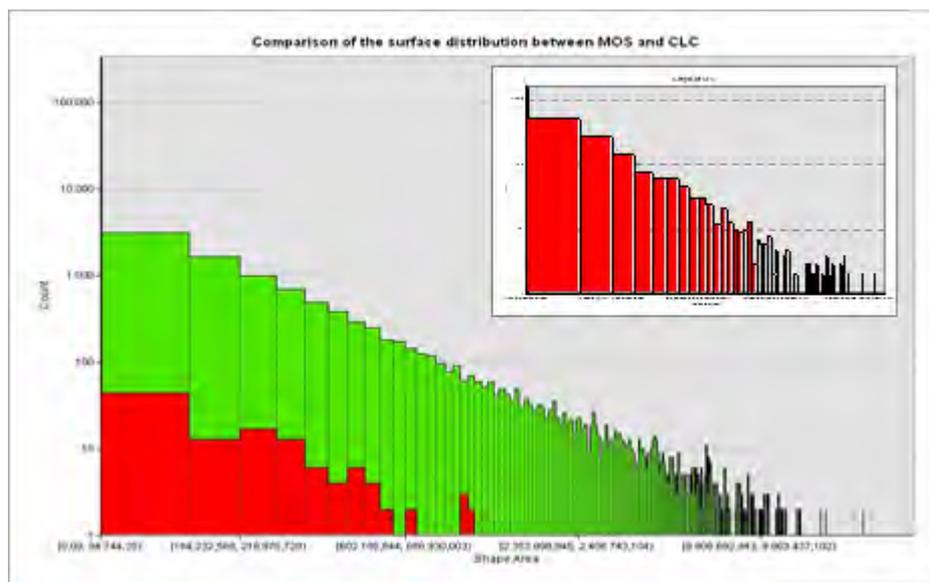
Source : Eifer

Selon les dernières recherches sur les données géographiques, il s'avère que les phénomènes géographiques, surtout s'ils sont liés aux actions de l'Homme, suivent souvent un modèle logarithmique. C'est ce que l'on peut constater avec la répartition des villes, des réseaux et des bâtiments et parallèlement, ce modèle montre une certaine stabilité. Du fait des principales caractéristiques des deux bases de données comparées et de la grande quantité d'objets qu'elles contiennent, un graphique a été tracé de sorte à étudier cette question.

Le graphique représenté au Schéma 6 montre la différence observée entre les deux bases de données. Comme prévu, la base de données MOS présente un modèle plus régulier des valeurs et

une répartition homogène suivant une loi logarithmique. D'autre part, la base de données CORINE (en rouge) présente un histogramme des distributions irrégulières montrant ainsi que la méthode utilisée pour obtenir cet ensemble de données ne reflète pas les informations attendues à partir du monde réel.

Figure 65 : Répartitions des zones dans le MOS et le CLC (logarithmique)



Source : Eifer

Pour pouvoir extrapoler l'information contenue dans le MOS à l'ensemble de la France, il est nécessaire de comparer le contenu informatif des deux séries de données afin de modéliser la manière de l'extrapoler à d'autres régions de France métropolitaine.

Les deux séries de données concernent la même région mais, étant donné qu'elles reposent sur différentes méthodes et objectifs, il est nécessaire de développer une méthodologie qui évite ces problèmes et permet la comparaison des deux séries de données. La méthodologie développée est divisée en quatre étapes :

- Création d'une grille cross-référencée
- Extraction de l'information
- Création d'une matrice symétrique
- Analyse détaillée

Création d'une grille cross-référencée

La première étape consiste à créer une grille permettant de comparer les deux séries de données à un niveau de définition identique. A travers l'homogénéisation des unités d'information, l'analyse peut être livrée sur la base d'une agrégation nulle. Ce fait est important car les sources

d'information présentent d'importantes différences en termes d'unités de tailles et de nombres. Cette grille cross-référencée comporte le même nombre d'unités – qui présentent, par ailleurs, la même taille - pour les deux séries de données. Afin d'obtenir de meilleurs résultats, la taille des unités (cellule) doit être réduite à son minimum. En raison des contraintes liées aux capacités informatiques³², la meilleure résolution de grille a été fixée à 2m x 2m pour l'ensemble de la région Ile de France. Cette grille comporte 6.030.525.282 points, chacun d'entre eux étant présent dans les deux séries de données avec le même système de coordonnées et le même point d'origine. Le système de coordonnées et l'origine ne sont pas pertinents lorsque les deux séries de données partagent les mêmes paramètres, mais il garantit la cohérence et la robustesse de la méthode.

Extraction de l'information

Comme nous l'avons expliqué ci-dessus, le contenu informatif des deux séries de données doit être intégré dans la nouvelle grille de référence. Pour cela, chaque point de la grille créée à l'étape précédente a été interpolé de manière à obtenir l'information sous la forme de ses coordonnées spatiales. Le contenu informatif des deux couches, MOS et CLC, ainsi que la municipalité à laquelle ces coordonnées appartiennent ont été ajoutés à la base de données pour permettre la comparaison. Cette étape a permis l'analyse des différentes configurations d'unités administratives (municipalités, départements), ainsi que des zones spatiales non administratives (par ex. un tampon de 10 km autour de Paris ou un couloir de 2 km autour de l'autoroute). Cette information peut être utilisée dans des travaux de recherche futurs portant sur des questions spécifiques (zones suburbaines, contexte rural, sites industriels...)

Création d'une matrice asymétrique

A des fins de comparaison des classes d'utilisation des sols, il nous faut une matrice qui montre la corrélation de chaque classe d'utilisation des sols entre les différentes sources. Cette matrice contiendra l'information portant sur le nombre de fois qu'il est possible de trouver une configuration spécifique en tenant compte des deux dimensions, une classe CLC et une classe MOS. Un axe présente les 83 classes de MOS, tandis que l'autre comporte les 27 classes de CORINE. Chaque valeur de la matrice correspond au nombre de points (comme nous l'avons mentionné auparavant, un quadrillage de 2 x 2m, c'est-à-dire des zones de 4m²) pouvant être trouvés dans les deux dimensions, MOS et CLC. La matrice est asymétrique car les classifications sont différentes pour chaque série de données, ce qui donne la direction de la comparaison : MOS dans CLC ou CLC dans MOS.

La répartition des zones a été analysée en détail, puisqu'il s'agit de l'objectif principal de ce travail. Cette analyse peut être trouvée plus loin dans ce chapitre.

Considérations principales de la méthodologie proposée

³² Le nombre d'entités à créer sur une grille inférieure à 2x2m n'était pas supporté par les capacités de mémoire de l'ordinateur utilisé pour la création de la grille.

Certains résultats peuvent être tirés de cette comparaison :

Peu de corrélations entre les classes dans MOS et CORINE sont supérieures à 20%. La principale cause de cette différence est le fait que les deux séries de données présentent des objectifs et des résolutions différentes, et qu'elles ne sont pas comparables au niveau le plus profond de la définition. Une possible solution à ce problème est d'agréger l'information à un niveau plus élevé afin de comparer le contenu informel auxquelles les classes se réfèrent.

Les corrélations supérieures à 20% atteignent, dans certains cas, des valeurs supérieures à 70%. Peu de classes sont très précises dans les deux séries de données, si bien que leur contenu est très similaire.

La plupart des classes CLC sont réparties parmi toutes les classes MOS à l'exception de 111, 123, 132, 221, 331 et 333 qui sont concentrées dans peu de classes du MOS.

Une vue d'ensemble de ces valeurs peut être trouvée dans le Tableau 34.

Tableau 34 : Principales classes du MOS et classes CLC auxquelles elles appartiennent

CLC_333 – MOS_14	-> Espaces ruraux vacants	
Zone à faible densité de végétation		91,127%
CLC_211,221 – MOS_04	-> Terres labourées	
Terre arable non irriguée		89,426%
Vignoble		79,103%
CLC_312,312,313 – MOS_01	-> Bois ou forêts	
Forêt de feuillus		77,577%
Forêt de conifères		83,729%
Forêt mixte		83,282%
CLC_331 – MOS_05	-> Surfaces en herbes à char. agricole	
Plages, dunes, sable		74,609%
CLC_511 – MOS_10	-> Cours d'eau	
Cours d'eau		73,477%
CLC_512 – MOS_09	-> Eau fermée	
Plans d'eau		66,923%

Source : Eifer

d) Analyse comparative –CLC dans le MOS

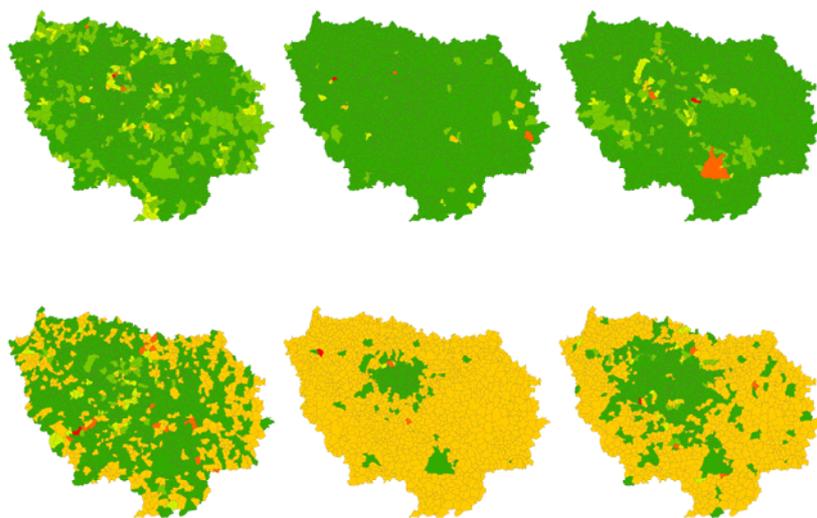
De nombreuses classes avec une probabilité élevée (plus de 70%) peuvent être trouvées dans une classe de CORINE. C'est un résultat auquel on s'attendait puisque la classification CORINE (en particulier les zones urbaines) n'est pas définie aussi précisément que dans le MOS. Comme auparavant, il y a une exception, les forêts, qui sont mieux définies dans CLC. Cela est un argument

en faveur de la possibilité de développer la classe 1 du MOS en 3 sous-classes, à l'instar de ce qui existe dans CLC.

Une autre conclusion que nous pouvons tirer de cette analyse est que, s'agissant des zones urbaines et en raison de la classification précise du MOS et du faible nombre de classes dans CLC, de nombreuses modes d'utilisation de sol MOS sont comprises dans une classe CORINE. Ceci est un point crucial. Il nous donne un aperçu sur les utilisations de sols que l'on peut trouver dans une classe, nous permettant ainsi de comprendre la composition des classes de Corine Land Cover. Cependant, l'hétérogénéité est telle qu'il est difficile de bénéficier de la confiance statistique qui nous permettrait de soutenir que cette répartition sera trouvée sur l'ensemble du territoire. Cela signifie que nous pouvons être sûrs que ces utilisations MOS se retrouvent sous l'étiquette CLC, mais qu'il est impossible de savoir si nous retrouverons ailleurs cette répartition, avec des chiffres identiques.

La première analyse préliminaire réalisée à l'aide d'un modèle mathématique montre que la répartition des erreurs liées aux modèles mathématiques présente souvent des motifs géographiques visibles sur la cartographie de ces derniers dans un système d'information géographique. La Figure 66 montre cet effet. Les trois cartes du bas, en particulier, montrent des motifs spatiaux d'erreur, ce qui signifie que, pour être en mesure de modéliser la répartition des classes MOS dans les classes CLS, il est nécessaire d'inclure une certaine forme d'information géographique comme les topologies des quartiers, les distances jusqu'au centre, des modèles d'élévation ou autres. Une recherche plus approfondie sur le terrain est nécessaire pour obtenir des résultats satisfaisants.

Figure 66 : Répartition spatiale de l'erreur



Source : Eifer

Comme cela a été expliqué dans ce chapitre, le problème de l'extrapolation des données depuis des sources d'information géographique, ainsi que les possibilités de comparaison avec les autres régions françaises ou européennes, est d'un grand intérêt pour le développement à venir de méthodes pour évaluer les émissions de CO₂ du parc de bâtiments et des transports. Les deux bases de données sélectionnées sont de bonnes qualités au regard de leurs objectifs très différents, mais ne sont pas aisément comparables. L'échelle de définition et la subdivision des classes permettent de faire une comparaison directe seulement à un niveau élevé d'agrégation. Ce constat indique une perte du contenu de l'information (par exemple les sous-classes du MOS doivent être agrégées pour correspondre aux classes de CLC), et par conséquent un niveau de définition insuffisant pour la micro-modélisation des émissions de CO₂.

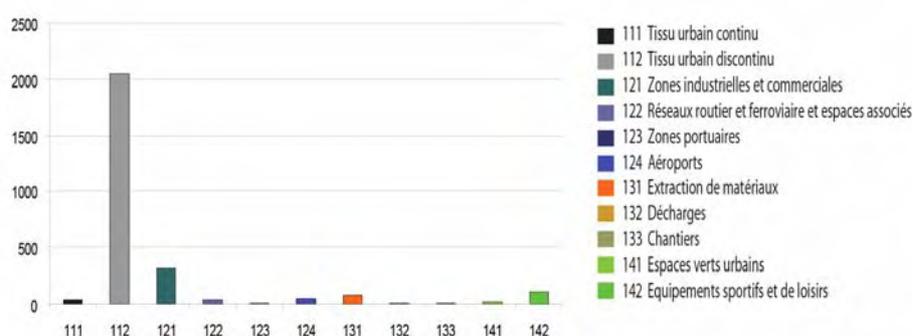
Afin de contourner ce problème, d'autres paramètres doivent être considérés dans le modèle d'extrapolation. Comme cela a été également démontré, les premiers résultats indiquent que les erreurs du modèle sont géographiquement regroupées et ainsi que l'information spatiale doit faire partie des paramètres du modèle. Les solutions envisagées sont l'introduction d'une analyse de distance (par exemple, depuis/vers le centre du village ou ville), d'une information topographique, celle de n'importe quelles sortes de réseaux distribuées (autoroutier ou autre) ou même l'introduction de données sur la distribution socio-économique. Une deuxième possibilité est l'utilisation de méthodes de agglomération afin de définir des groupes d'objets incluant l'information spatiale. Le risque de l'utilisation de cette méthode est le même que celui de toutes méthodes de classification, c'est-à-dire que les groupes soient créés sur une extension géographique spécifique et que ces mêmes groupes ne soient pas retrouvés dans une autre configuration spatiale, ou à l'inverse, que certains groupes ne soient retrouvés dans la région géographique où les groupes sont analysés (dans notre cas l'Ile de France). Quoi qu'il en soit, les deux possibilités nécessitent un approfondissement des recherches qui n'étaient pas indispensable dans ce projet.

La conséquence pour les développements ultérieurs du travail est que même si l'approche proposée dans le projet initial semblait vraiment prometteuse et aiderait à comprendre à un meilleur niveau le problème des émissions de CO₂ à une échelle méso (contrairement au micro – bâtiment ou au macro – approches statistiques), il a été décidé d'utiliser des bases de données homogènes de l'Institut Nationale de Statistiques et d'Etude Economique (INSEE) qui permette une large estimation française. L'approche originale proposée pourrait être développer davantage lorsque les questions sur la distribution et la localisation des espaces urbains aussi bien que sur les interactions entre formes urbaines et transport seront des recherches de premier plan.

4.2. L'ARTIFICIALISATION DU SOL, LA CONTINUITE ET LA DISCONTINUITÉ DE L'URBANISATION ENTRE 2000 ET 2006

L'artificialisation du sol représente en 2000 environ 2,73 millions d'hectares soit 5 % de la surface du territoire. Seul 1,6% de la surface artificialisée est constitué de tissus denses continus (soit 1,5 % des communes) alors que près de 75% est occupée par des tissus discontinus peu denses (63% des communes de France sont concernées). Deuxième type d'occupation du sol, loin derrière le tissu discontinu, ce sont les zones commerciales et industrielles qui dominent l'espace urbanisé à hauteur de 11%.

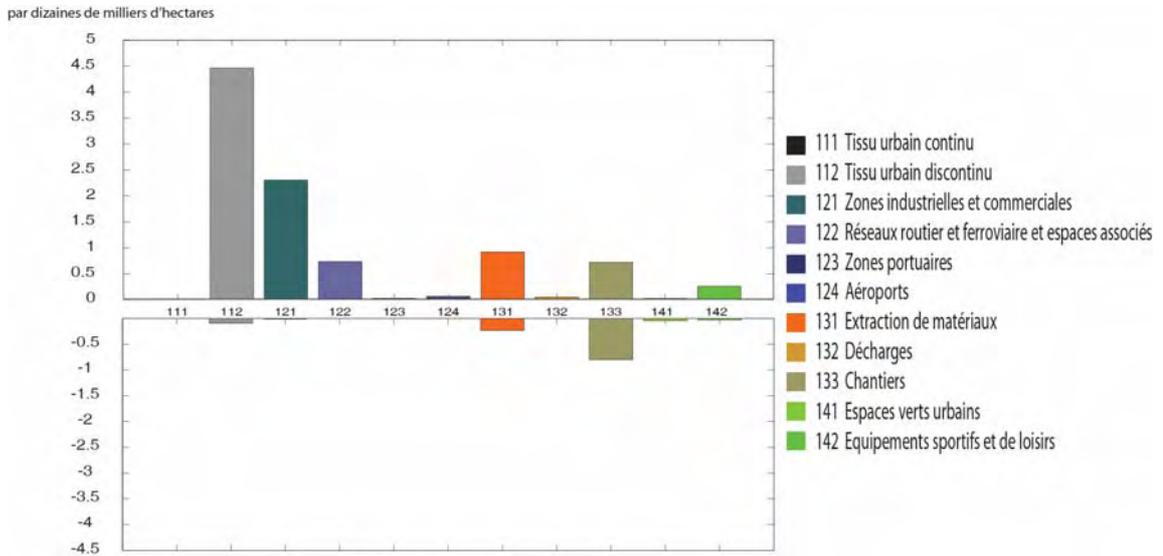
Figure 67 : Type d'occupation du sol artificialisé en 2000 en milliers d'hectares.



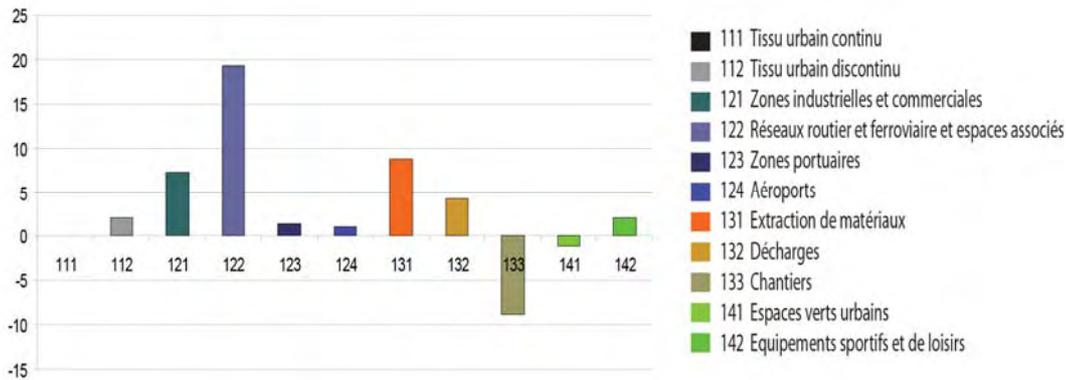
Source : M. MAÏZIÀ, UTEAM d'après CLC.

L'augmentation totale de l'artificialisation entre 2000 et 2006 représente environ 95 000 ha dont 45 000 ha sont constitués de tissus discontinus (soit près de 47 %) et 23 051 ha de zones industrielles et commerciales (24,25 %). En termes dynamiques, une analyse par type de tissu indique que ce sont les espaces occupés par des infrastructures de transports terrestres qui ont progressé le plus vite (de près de 20 %) et ceux occupés par des zones commerciales et industrielles (environ 7%).

Figure 68 : Artificialisation du sol entre 2000 et 2006, à partir de CLC



Croissance en dizaines de milliers d'hectares des surfaces entre 2000 et 2006 par type d'artificialisation.



Croissance en % des surfaces entre 2000 et 2006 par type d'artificialisation.

Source : M. MAÏZIÀ, UTEAM d'après CLC.

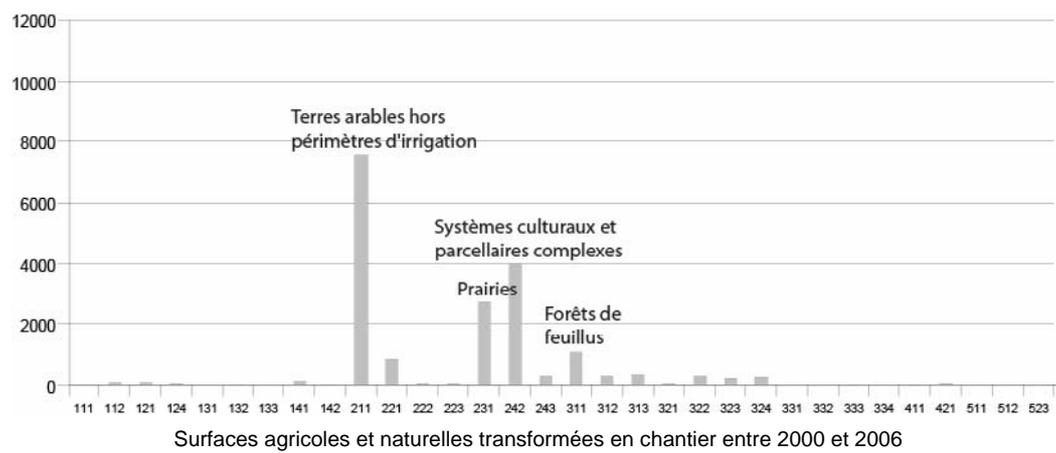
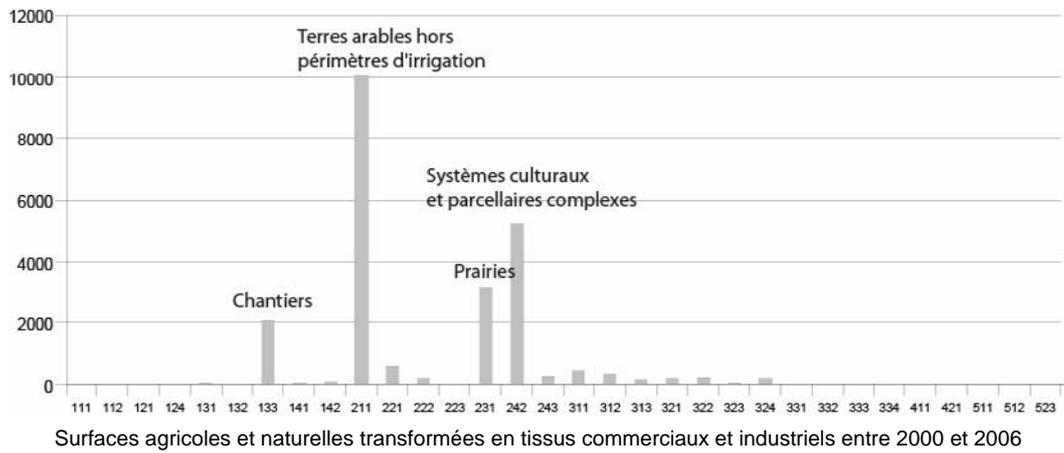
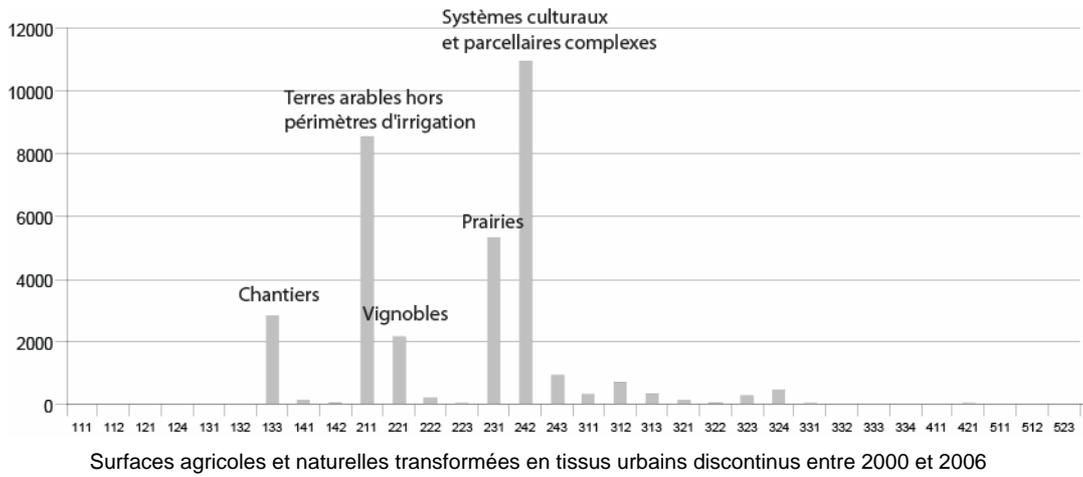
Le tissu discontinu se forme principalement à partir de la transformation de systèmes culturaux et parcellaires complexes (11 000 ha), de terres arables hors périmètres d'irrigation (8600 ha) et de prairies (5300 ha). Entre 2000 et 2006, près de 10 000 ha de surface terrestre sont mis en chantier dont 28% destinés à devenir des tissus discontinus, 21 % des zones industrielles et commerciales et 37% des infrastructures de transport terrestre (et des espaces associés).

Si l'on considère que le rythme de réalisation de ces chantiers se maintient, les 9 200 ha de chantiers présents en 2006 correspondront en 2012 à un supplément de 2600 hectares de tissus discontinus, 1900 ha de zones commerciales et de 3400 ha d'infrastructure de transport.

Sachant que le type de surfaces agricoles qui ont fait l'objet d'une urbanisation entre 2000 et 2006 croît très faiblement (seuls 14 400 ha ont été transformés en 2006 en ce type de terre agricole), c'est dans le stock existant aujourd'hui que l'essentiel de l'urbanisation se réalise. Ce stock d'environ 30 millions d'hectares, a perdu en six ans près de 72 000 ha et pourrait être le réceptacle de l'étalement urbain futur.

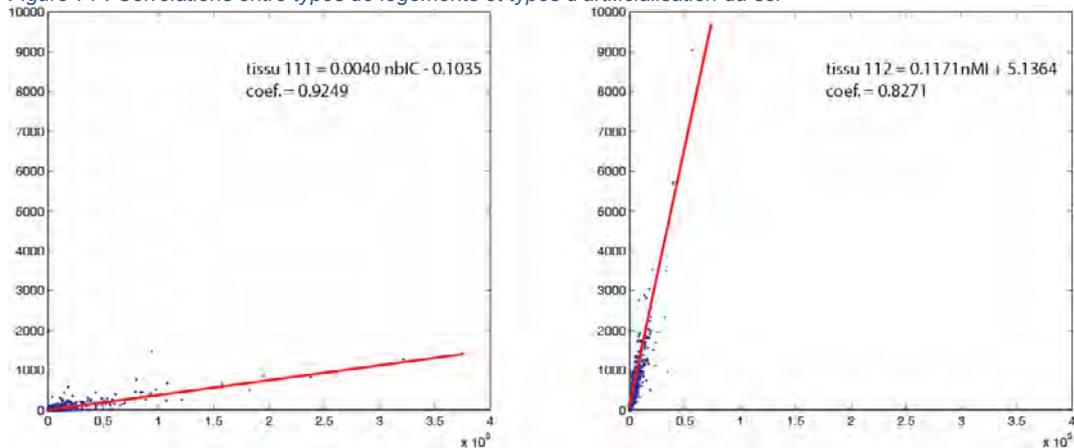
Notons une diminution substantielle des espaces verts urbains (augmentation de 132 ha contre une diminution de 423 ha soit un déficit de 291 ha). Ces derniers sont généralement transformés en tissu urbain discontinu (122 ha) et en chantiers (116 ha).

Figure 69 : Artificialisation en hectares des surfaces agricoles entre 2000 et 2006



Source : M. MAÏZIÀ, UTEAM d'après CLC.

Figure 71 : Corrélations entre types de logements et types d'artificialisation du sol



a) Relation entre nombre de logements en immeuble collectif et surface de tissu continu

b) Relation entre nombre de maisons individuelles et surface de tissu discontinu

Source : M. MAÏZIÀ, UTEAM

Un examen systématique des corrélations entre période de construction et typologie d'occupation du sol montre que la structure du parc de logements est déterminante dans les modalités d'artificialisation. Plus le parc sera ancien et doté d'immeubles collectifs plus le territoire de la commune sera potentiellement continu et compact. Les corrélations ont même plutôt tendance à diminuer avec la période de construction : en d'autres termes, la corrélation est d'autant plus élevée que le parc local est ancien (elle se situe aux alentours de 0,83 pour le bâti antérieur à 1949 et de 0,64 pour la période postérieure à 1990).

Tableau 35 : Coefficient de corrélations entre typologie de logement et période de construction et surface de tissu continu

	Av. 1949	1949 à 1974	1975 à 1981	1982 à 1989	1990 à 1999	1999 à 2006
MI	0.6625	0.489	0.3224	0.3313	0.3634	0.3562
IC	0.8334	0.7507	0.7355	0.6706	0.6429	0.6461
Autres	0.6146	0.5307	0.4196	0.2555	0.1818	0.0946

Source : M. MAÏZIÀ, UTEAM

De manière analogue, la maison individuelle est plutôt liée à des formes discontinues d'artificialisation du sol avec une intensité qui diminue, même si elle demeure très élevée, au fil des périodes de construction postérieures aux années 1950 (d'une corrélation de l'ordre de 0,75 pour le bâti antérieur à 1949 à 0,84 pour la période post 1980 en passant par un pic de l'ordre de 0,9 pour le bâti construit entre 1950 et 1974).

Tableau 36 : Coefficient de corrélations entre typologie de logement et période de construction et surface de tissu discontinu

	Av. 1949	1949 à 1974	1975 à 1981	1982 à 1989	1990 à 1999	1999 à 2006
MI	0.7529	0.8913	0.851	0.8463	0.8419	0.8172
IC	0.4167	0.6855	0.6587	0.6469	0.5976	0.6274
Autres	0.2058	0.4782	0.4433	0.3532	0.2219	0.109

Source : M. MAÏZIÀ, UTEAM

L'examen du lien entre le parc bâti et le niveau global d'artificialisation donne des résultats très proches de ceux obtenus pour les tissus discontinus. Cette proximité s'explique bien entendu par la part qu'occupe le tissu discontinu dans l'artificialisation du territoire.

Tableau 37 : Coefficient de corrélations entre typologie de logement et période de construction et surface de sol artificialisé

	Av. 1949	1949 à 1974	1975 à 1981	1982 à 1989	1990 à 1999	1999 à 2006
MI	0.7695	0.8921	0.8283	0.8228	0.8169	0.7896
IC	0.4934	0.7365	0.7158	0.6983	0.6631	0.6825
Autres	0.2677	0.5123	0.4666	0.3555	0.2401	0.1203

Source : M. MAÏZIÀ, UTEAM

Néanmoins, l'artificialisation globale du sol améliore le lien avec le parc de logements pour la maison individuelle édifiée avant 1974 et pour le logement collectif construit après cette date.

Tableau 38 : Dépendance des segments du parc de logement avec les types d'occupation des sols.

	Av. 1949	1949 à 1974	1975 à 1981	1982 à 1989	1990 à 1999	1999 à 2003
MI	artificialisation	artificialisation	discontinu	discontinu	discontinu	discontinu
IC	continu	continu	continu	artificialisation	artificialisation	artificialisation
Autres	continu	continu	artificialisation	artificialisation	artificialisation	artificialisation

Source : M. MAÏZIÀ, UTEAM

5. ARCHITECTURE GENERALE DU MODELE DE PROSPECTIVE

L'architecture générale du modèle repose sur des relations déterministes construites à partir d'observations empiriques. Comme nous le signalons dès l'introduction de cette partie, la

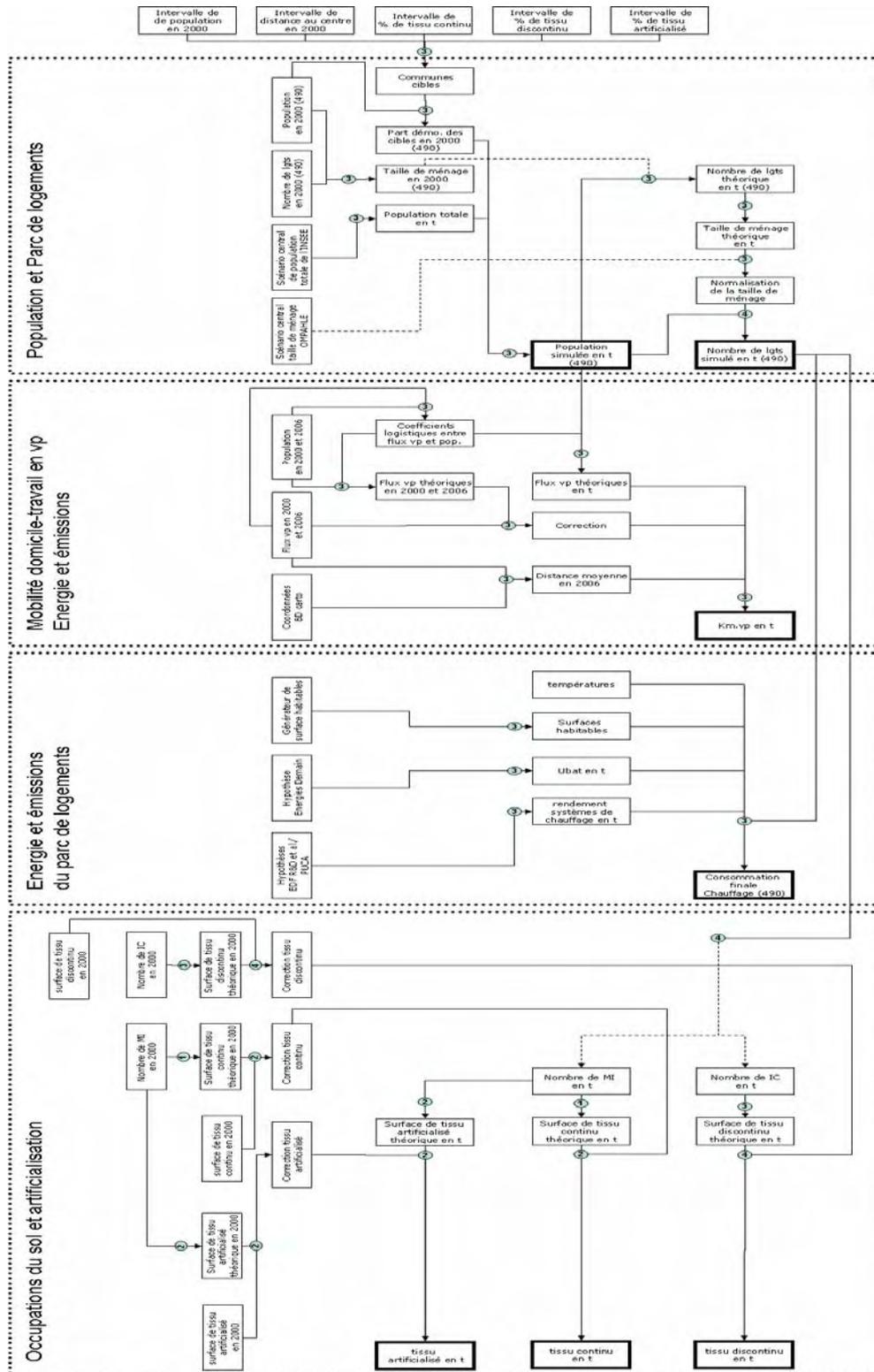
modélisation en termes de prospective débute par la détermination de « modèles de communes » appartenant au paysage des situations urbaines ou rurales observables en 2006. Ces « modèles » deviennent, à ce titre, la cible de migrations résidentielles « virtuelles » de la population des autres communes. Les communes cibles deviennent ainsi l'objet d'un développement urbain amplifié par un solde migratoire simulé mais poursuivent leur évolution selon les dynamiques observées entre 1999 et 2006. Ces dynamiques déterminent la structure du parc de logements en termes typologiques et de systèmes de chauffage, tout en respectant les plafonds démographiques fixés par le scénario central de l'INSEE et par les projections du modèle OMPHALE. Un scénario tendanciel revient, par cette approche, à considérer la totalité des communes du territoire métropolitain comme des cibles. A contrario, un scénario contrasté (en termes de « volontarisme » ou de « laisser-faire ») est équivalent à sélectionner un ensemble très réduit de cibles (mais jamais de taille nulle).

Dans ce derniers cas, le modèle impose la construction virtuelle d'un parc de logements neufs extrêmement important avec des parts de marché de systèmes de chauffage progressant selon les dynamiques locales observées entre 1999 et 2006.

La structure du parc ainsi modélisée conduit à des modifications des surfaces artificialisées, notamment de tissus continus ou discontinus. Plus les cibles visées contiendront des maisons individuelles, plus on encouragera, « virtuellement », une urbanisation discontinue. A l'inverse, un modèle de commune dominé par des immeubles collectifs engendrera potentiellement une urbanisation plus compacte.

Enfin, le nouveau solde de population induira une mobilité locale en voiture particulière selon les règles propres à la cible. Ces règles concernent la distance moyenne observée en 2006, l'intensité des flux sortants pondérés par les effets d'offre en transport en commun. Plus la commune cible sera proche des zones d'emploi et dotée d'une importante offre de transport en commun, plus les distances totales parcourues en voiture particulière, en comparaison à un scénario opposé, seront faibles.

Figure 72 : Architecture générale du modèle de prospective.



Source : M. MAÏZIA, UTEAM

VI. PROSPECTIVE A L'HORIZON 2050

[³³]

La dernière partie de ce rapport est consacrée à la présentation des perspectives fondées sur les hypothèses du chapitre précédent. Rappelons ici que l'exercice de prospective consiste à explorer des possibles et nullement des probables. En d'autres termes, il s'agira, dans cette partie, de présenter les bornes à l'intérieur desquelles se produiront, à partir de notre connaissance de la situation en 1999 et 2006, les futurs développements urbains. Trois scénarios contrastés seront examinés dans cette partie. Le choix d'en retenir un nombre si restreint, s'explique, comme on le verra plus loin, par la modestie des écarts entre les résultats des modélisations (et donc par la faiblesse de l'éventail des possibles) en termes de consommations d'énergie finale et primaire, d'émissions de CO₂ et d'artificialisation du sol.

Le premier scénario, à travers une projection tendancielle, est ici envisagé comme tenant lieu de référence. A ce titre, le scénario tendanciel présuppose que les ménages poursuivent leur localisation dans les communes les plus attractives et continuent de délaisser celles supposées ne pas l'être. Un second scénario baptisé « scénario d'éloignement » simule à l'horizon 2050 une migration des ménages vers des communes dont les migrations alternantes se réalisent à des distances moyennes de l'emploi de plus de 10 km. Un troisième scénario, à l'inverse du second, simule les effets sur les consommations d'énergie finales et primaires, sur les émissions de Co₂ des secteurs de l'habitat et des transports et sur l'occupation de l'espace, des migrations résidentielles vers les communes situées à moins 10 km de l'emploi. Rappelons que ces distances moyennes ne préfigurent en rien l'organisation du territoire en termes de centralité. Les logements « s'éloignent » ou « se rapprochent » de l'emploi dans des configurations fortement centralisées ou multi-polarisées.

1. LE PARC DE LOGEMENT : BILAN ENERGETIQUE ET EMISSION DE CO₂

1.1. LE SCENARIO DE REFERENCE : LA POURSUITE DES TENDANCES LOURDES DEMOGRAPHIQUES

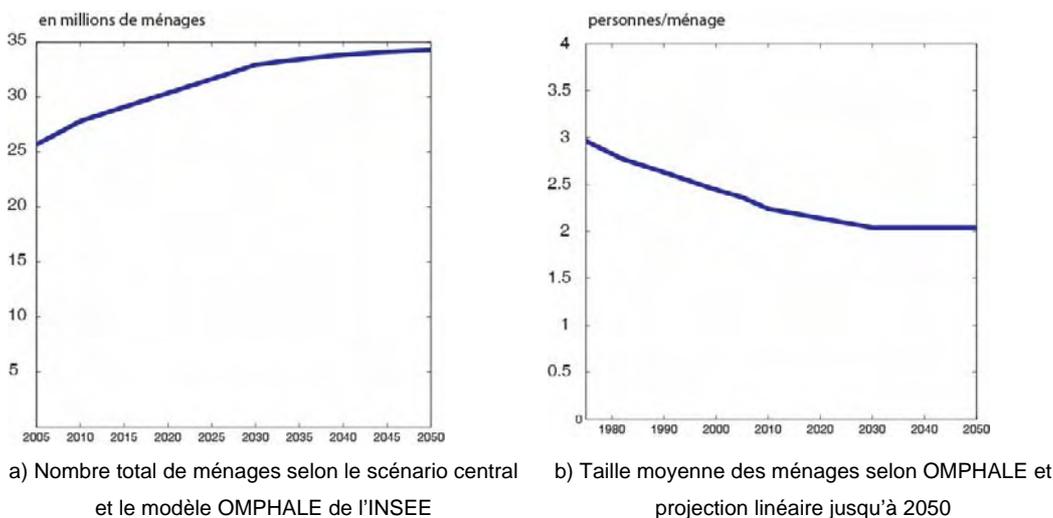
Prolonger les tendances à l'échelle communale afin d'élaborer un scénario de référence revient également à poursuivre la stratégie de localisation des ménages dans le territoire selon le rythme démographique instauré entre 1999 et 2006.

Il n'est pas utile de développer ici les divers scénarios relatifs à l'évolution de la population à l'horizon 2050 (cf. les nombreux travaux en bibliographie). Rappelons simplement que le nombre

³³Ce chapitre a été rédigé par M. MAÏZIA.

de logements attendu résulte de la croissance numérique du nombre d'habitants que devrait contenir le territoire pendant la période et de la réduction progressive de la taille des ménages. Le peuplement moyen d'un logement devrait atteindre à l'échéance 2050 près de 2,04 personnes/logement si l'on accepte l'hypothèse qu'il se stabilisera aux alentours de 2030. Le parc des résidences principales passerait ainsi de près de 26 millions d'unités en 2000 à un peu moins de 34 millions en 2050.

Figure 73 : Évolutions démographique à l'horizon 2050



Source : M. MAÏZIÀ, UTEAM

1.2. L'ÉVOLUTION DES PERFORMANCES ÉNERGETIQUES DES LOGEMENTS NEUFS ET DES SYSTÈMES DE CHAUFFAGE

Outre son évolution numérique, le parc connaîtra des transformations d'ordre technique dans les solutions bâties qu'il met en exergue, notamment en ce qui concerne l'enveloppe. Dans cette recherche, on estime que la mise en œuvre des dispositions des réglementations thermiques ne connaîtront aucun retard et respecteront les échéances de 2012 et 2020. Examinées uniquement du point de vue de l'appel de charges (de la demande), ces échéances concernent, dans le logement neuf, l'application des niveaux de consommations du label BBC.

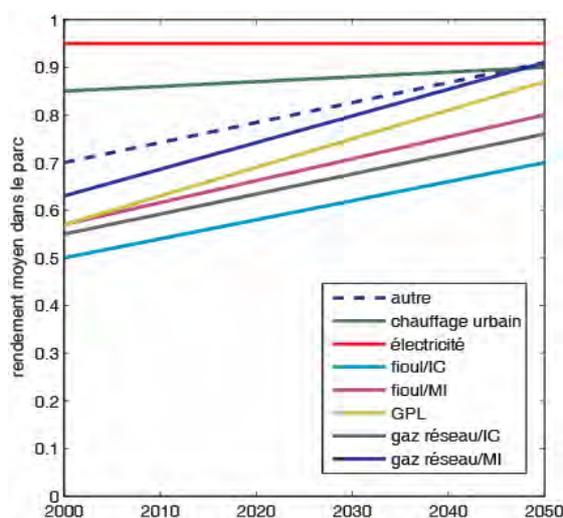
Outre un plafond des consommations totales des bâtiments en énergie primaire ne dépassant pas 50 kWh/m².an (avec des pondérations selon les zones climatiques et d'altitude), ce label impose une production thermique d'ECS représentant au moins 50% des consommations du logement. Réglementaire à partir de 2012, il est réputé parfaitement atteint dans le logement neuf grâce à des installations de solaire thermique et à une orientation appropriée du bâti. La productivité des capteurs thermiques et le taux de couverture des besoins sont approchés grâce à une méthode d'interpolation du rayonnement solaire (en tenant compte de la nébulosité) et un calibrage avec la méthode SOLO. La pénétration de ces installations dans le neuf est ainsi totale de 2012 à 2050

quelle que soit la zone climatique. Le rendement de génération des systèmes d'appoint suit celui des systèmes de chauffage. Le taux de réduction des consommations d'eau poursuit, de 2000 à 2050, une croissance linéaire jusqu'à atteindre un taux de 70%.

Dans les simulations qui viendront plus bas, on exclut du calcul la compensation électrique des logements (qui deviennent par ce biais des BEPOS), compensation devenant obligatoire à partir de 2020. En effet, le calcul étant limité ici aux consommations de chauffage et d'ECS, il aurait été nécessaire d'intégrer, afin de mesurer l'ampleur de la production électrique du bâti à partir des techniques photovoltaïques, celles des autres postes, en particulier l'éclairage et les systèmes auxiliaires. En outre, la question de la compensation est avant tout une question de production énergétique. Or nous avons fait le choix, dans cette partie de la recherche, d'examiner exclusivement la problématique de la demande.

Enfin, comme annoncé en introduction, aucune hypothèse d'actions techniques sur le bâtiment n'a été formulée. Cette recherche, en cherchant à isoler les effets induits par la dimension urbaine, écarte tous gestes réalisables à l'échelle du bâti (notamment la réhabilitation thermique des enveloppes). Seules les tendances lourdes relatives aux systèmes de chauffage sont intégrées dans l'analyse prospective. Ces tendances sont empruntées à Laurent M.H. et al., 2006. On estime alors que les rendements des émetteurs de l'électricité demeureront constants (0,95) pendant que les autres types de systèmes gagneront environ 0,2 en rendement global (génération, distribution et émission).

Figure 74 : Evolution des rendements globaux des systèmes de chauffage

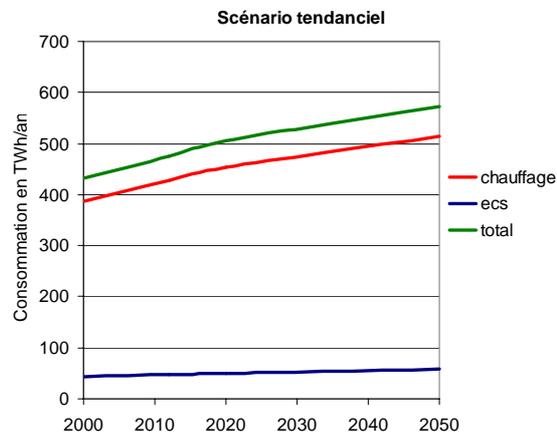


Source : Laurent M-H et al., 2006, et pour le chauffage urbain M. MAiziA, UTEAM

1.3. LES CONSOMMATIONS D'ENERGIE DE CHAUFFAGE ET D'ECS SELON LES SCENARIOS DE LOCALISATION DES MENAGES

Le scénario tendanciel consiste, comme nous l'avions signalé plus haut, à poursuivre les dynamiques locales relatives au parc de logements. De l'ordre de 385 TWh/an en 2000, les consommations de chauffage passeraient à 515 TWh/an en 2050 (soit une croissance de l'ordre de 32 %) lorsque l'on ne tient pas compte des réhabilitations qui pourraient être réalisées dans cet intervalle et que l'on admet l'ensemble des hypothèses de la partie précédente et celle relatives à l'évolution des rendements des systèmes évoquées plus haut. Les consommations d'ECS progresseraient de près de 44 à 57 TWh/an (une croissance en pourcentage du même ordre que celle du chauffage). Les consommations par ménage diminueraient légèrement grâce aux efforts réalisés sur le bâti édifié à partir de 2012 et sur les rendements des systèmes de chauffage tout le long de la période. De près de 18,6 MWh/an/ménage, la consommation d'énergie finale pour ces deux postes avoisineraient à l'horizon 2050 environ 17 MWh/an/ménage. Ces gains par ménage de moins de 10 % sont quasi identiques pour le chauffage et l'ECS mais ont des causes bien distinctes : les gains sont principalement dus, pour le chauffage, aux effets mécaniques du jeu de parc de logements, le poids des logements construits selon le label BBC à partir de 2012 pesant sur la moyenne ; pour l'ECS, ce sont les effets de pénétration des économiseurs d'eau couplés à l'amélioration des rendements des chaudières fonctionnant principalement au gaz qui explique la plus grande partie de ce gain.

Figure 75 : Consommations en énergie finale (en TWh/an) du chauffage et de l'ECS à l'horizon 2050 selon un scénario tendanciel.

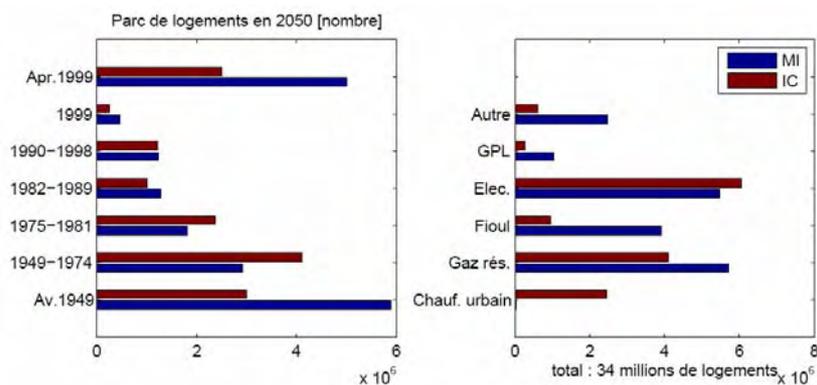


Source : M. MAÏZIA, UTEAM.

Si les tendances observées entre 2000 et 2006 se poursuivaient, la structure du parc, en proportion, se modifierait très peu hormis le déstockage significatif de près d'un million de maisons individuelles. Outre la non prise en cause des efforts de réhabilitation, c'est cette entrée massive de logements anciens (antérieurs à 1949) et de grandes surfaces habitables qui explique le niveau assez élevé des consommations en énergie finale du chauffage. Cette augmentation est peu

compensée par l'amélioration des rendements de génération et par la croissance des parts de marché du chauffage électrique. Cette dernière passerait en effet à 12 millions de logements (contre un peu plus de 7 millions en 2006) et devrait contribuer à diffuser des rendements de génération proches de 0,95 mais à alourdir quelque peu le bilan en énergie primaire des segments anciens (ce qui ne serait pas le cas du parc neuf grâce, notamment, à l'adoption de pompes à chaleur permettant de respecter le plafond établi par le label BBC). Dans un tel scénario, le gaz en réseau perdrait des parts de marché dans l'immeuble collectif (1 million) pour en gagner autant dans la maison individuelle et réduire son poids relatif en proportion par rapport à 2000. Signalons que cette permutation n'en serait réellement pas une d'un point de vue énergétique car l'échange ne se ferait pas sur les mêmes bases de surfaces habitables, ni sur celles des besoins de chauffage. Les seuls systèmes de chauffage en réseaux qui bénéficieraient d'une croissance significative seraient le chauffage urbain qui atteindrait près de 2,5 millions d'unités, exclusivement dans l'immeuble collectif.

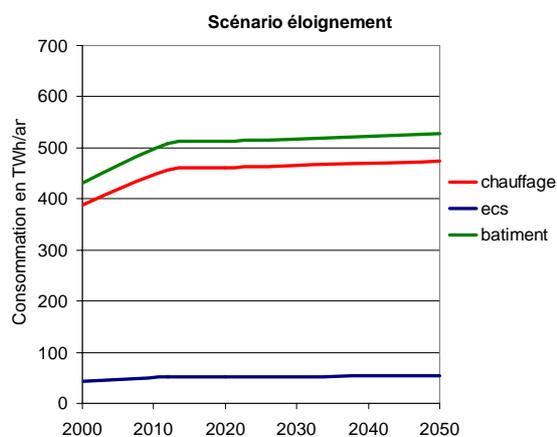
Figure 76 : Structure du parc de logements par type, période de construction et système de chauffage à l'horizon 2050 selon un scénario tendanciel



Source : M. MAÏZIA, UTEAM.

Le scénario d'éloignement à l'emploi conduirait quant à lui à une croissance des consommations de chauffage et d'ECS de l'ordre de 22% (soit 526TWh/an). La faiblesse relative par rapport au scénario tendanciel (de l'ordre de 8%) s'explique par le nombre de logements neufs supplémentaires qu'il faudrait construire pour mettre en œuvre cet éloignement (près du double par rapport au scénario précédent) et le poids plus important des édifices répondant aux exigences BBC. Notons que ces deux propriétés du stock de logements se retrouvent dans tous les scénarios envisageables comme signalé au chap. V.5 (hors scénario tendanciel). Les consommations moyennes par ménage pour le chauffage et l'ECS passeraient ainsi de 18,6 en 2000 à un peu plus de 16 MWh/ménage/an en 2050.

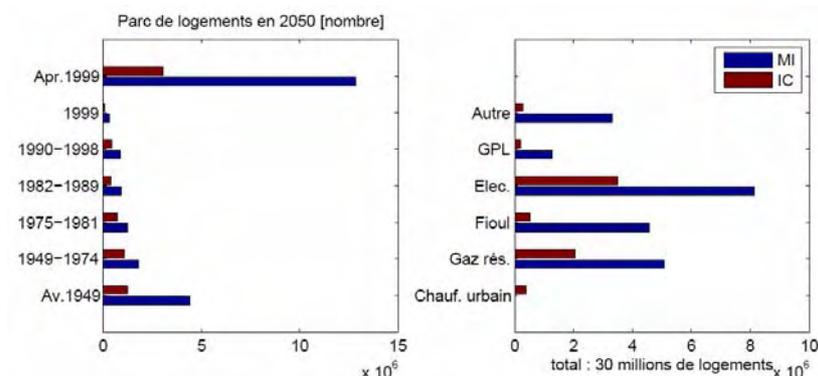
Figure 77 : Consommations en énergie finale (en TWh/an) du chauffage et de l'ECS à l'horizon 2050 selon un scénario éloignement au lieu d'emploi (distance moyenne supérieure à 10 km)



Source : M. MAÏZIA, UTEAM.

Dans ce scénario, le poids de la maison individuelle neuve serait 4 fois supérieur à celui de l'immeuble collectif et accélérerait l'érosion de ce dernier segment dans le stock existant en 2006. Le parc de logements avoisinerait 30 millions d'unités, soit près de 4 millions de moins de ce que suggère la tendance. Cette diminution de la taille du parc, qui amplifie la réduction des consommations en énergie finale, s'explique par un peuplement des logements convergeant vers celui de la maison individuelle (et de ce fait sensiblement supérieur à la tendance). Les systèmes en réseau favorables à l'immeuble collectif, tant le gaz que le chauffage urbain, seraient les grands perdants d'un tel scénario, puisqu'ils perdraient respectivement pas moins de 500000 et 1 millions d'unités par rapport à 2006. Néanmoins, il apparaît que le chauffage électrique ne profiterait que peu de cette régression des systèmes en réseau : le bois et le fioul gagneraient en effet autour de 1 million de logements chacun. La croissance des parts de marché de l'électrique serait, comme dans le scénario précédent, plutôt énergétique au regard des surfaces habitables de la maison individuelle.

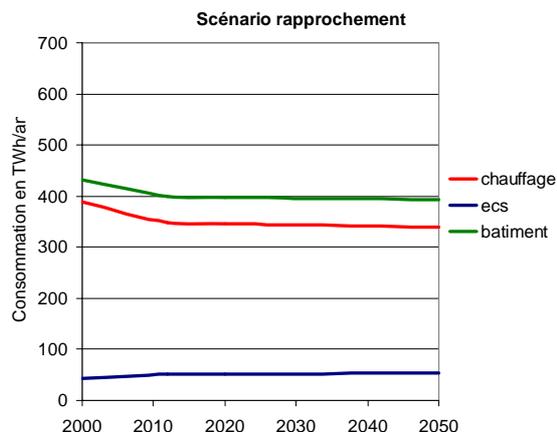
Figure 78 : Structure du parc de logements par type, période de construction et système de chauffage à l'horizon 2050 selon un scénario d'éloignement à l'emploi



Source : M. MAÏZIA, UTEAM.

De façon analogue, un scénario de rapprochement au lieu d'emploi nécessiterait la construction de logements neufs dont le poids devrait impliquer une baisse significative de la demande de chauffage et d'ECS. Mais à l'inverse des deux premiers scénarios, la dynamique du stock permettrait une décroissance des consommations de chauffage de l'ordre de 13% par rapport à 2000 (environ 340 TWh/an), les consommations en énergie finale d'ECS poursuivant leur croissance dans les mêmes ordres de grandeur que ceux des deux premiers scénarios. Ce qui ramènerait le gain pour les deux postes à environ 10 % par rapport à 2000. En passant les consommations finales moyennes à 12 MWh/ménage/an, ce scénario, par ses effets structurels de parc et malgré un stock plus important que celui du scénario précédent (avec un surplus de plus de 3 millions d'unités), mènerait à des réductions des consommations de chauffage et d'ECS de l'ordre de 46 et 34% par rapport aux scénarios tendanciels et d'éloignement à l'emploi.

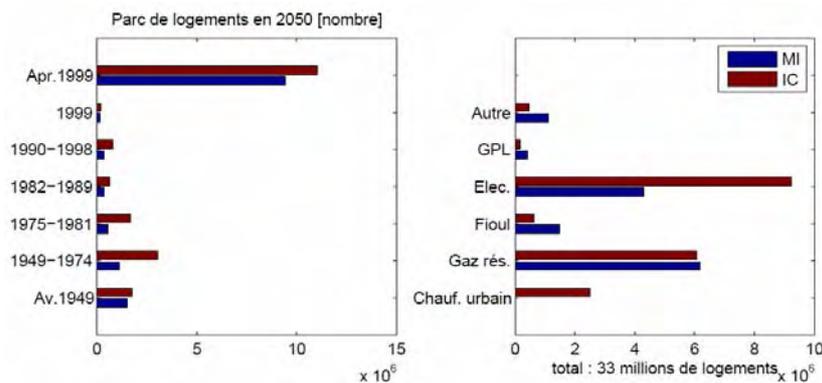
Figure 79 : Consommations en énergie finale (en TWh/an) du chauffage et de l'ECS à l'horizon 2050 selon un scénario éloignement au lieu d'emploi (distance moyenne supérieure à 10 km)



Source : M. MAÏZIA, UTEAM.

Ce scénario favorable à l'immeuble collectif accentuerait l'érosion de la maison individuelle et conduirait à un partage sensiblement égal entre les deux types pour le logement neuf (avec un léger avantage pour le logement en immeuble collectif). Les systèmes de chauffage nécessitant des infrastructures en réseau verraient leur nombre augmenter notamment les segments fonctionnant au gaz (alors qu'il avoisinerait les mêmes parts de marché que ce que suggère la tendance pour le chauffage urbain).

Figure 80 : Structure du parc de logements par type, période de construction et système de chauffage à l'horizon 2050 selon un scénario d'éloignement à l'emploi



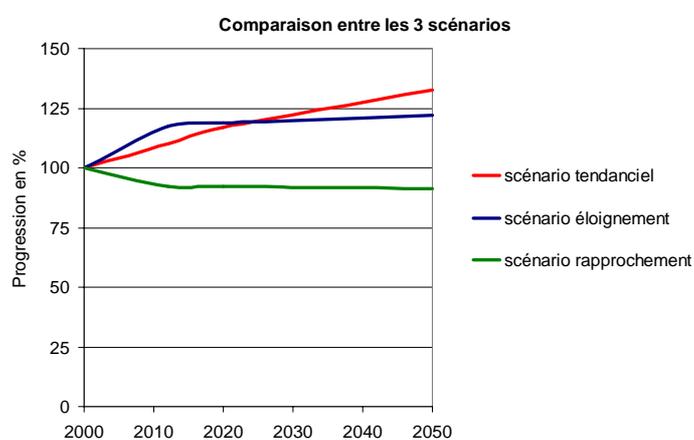
Source : M. MAÏZIA, UTEAM.

Sachant que la progression des consommations de chauffage en énergie finale serait, selon une projection tendancielle, de l'ordre de 30 %, la forte pénétration du chauffage électrique dans le stock existant en 2006 et dans le logement neuf construit dans la période, engendrerait un alourdissement supplémentaire de la facture en énergie primaire de près de 41% (de 477 à 672

TWh/an). Cet alourdissement se retrouve pour l'ECS à raison de 43 % de croissance (de 55,3 à 79,2 TWh/an). Grâce à une contribution plus ample du neuf, le scénario d'éloignement conduirait à une progression des consommations en énergie primaire de l'ordre de 37 % pour le chauffage (652 TWh/an) et de 44 % pour l'ECS (77 TWh/an) ; le différentiel avec les consommations d'ECS des projections tendancielle s'expliquant par le poids de la maison individuelle dans le stock de 2050 et par l'importance de sa surface habitable, élément accentuant les besoins en eau.

Les bénéfices du rapprochement de l'emploi et de l'habitat seraient, en énergie primaire totalement perdus à cause de l'électrification massive des logements. D'un gain de 13% en énergie finale, on passerait à une stabilisation des consommations en énergie primaire. L'addition des consommations en ECS engendrerait même une inversion de tendance avec une croissance totale de l'ordre de 2 %.

Figure 81 : Evolution des consommations d'énergie finale du chauffage et de l'ECS à l'horizon 2050 en base 100 selon les trois scénarios



Source : M. MAÏZiA, UTEAM.

Tableau 39 : Effets énergétiques et émissifs des trois scénarios pour le secteur de l'habitat

	Situation en 2000	Situation en 2050 selon tendance	Situation en 2050 selon éloignement	Situation en 2050 selon rapprochement
Consommation finale de chauffage (TWh/an)	387	515	473	340
Consommation finale d'ECS (TWh/an)	43	57	53	53
ECS + Chauffage (TWh/an)	431	573	527	393

Source : M. MAÏZiA, UTEAM.

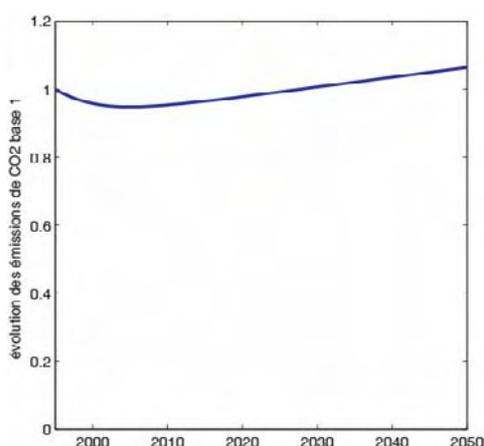
2. LA MOBILITE DOMICILE-TRAVAIL EN VP : BILAN ENERGETIQUE ET EMISSIONS DE CO2

2.1. LES SCENARIOS D'EVOLUTION DE LA PERFORMANCE ENERGETIQUE ET EMISSIVE DE CO2 DU PARC VP

A l'image de l'exercice réalisé pour le secteur de l'habitat, il est indispensable, avant de déterminer les effets énergétiques de la mobilité domicile-travail en voiture particulière, de préciser l'ampleur des gains apportés par l'amélioration technologique des véhicules. A l'instar de celle que l'on peut envisager pour les chaudières ou les émetteurs dans le secteur du bâtiment, l'élaboration de scénarios d'évolution du rendement moteur à l'échelle du parc automobile est un exercice qui demeure délicat au regard des nombreuses modifications des structures du marché et de la volatilité des stratégies des constructeurs et des choix industriels adoptés en périodes de conjoncture économique. Le modèle COPERT examiné dans la partie précédente de ce rapport (cf. chap.V.3.2) fournit un tel scénario.

Ce modèle propose une évolution structurelle du parc automobile et repose sur une prospective à 2020 prévoyant une amélioration globale des émissions unitaires de CO2 de 1995 jusqu'à 2005 puis une dégradation à terme. Cette projection résulte du changement macroscopique dans la composition du parc et des efforts microscopiques réalisés à l'échelle des véhicules. L'extrapolation linéaire de cette progression à l'horizon 2050 amènerait alors une augmentation des émissions unitaires par rapport à 1995 de l'ordre de 7% qu'il est difficile d'admettre à la lumière des tendances actuelles.

Figure 82 : Evolution du facteur de consommation d'énergie et d'émission de CO2 selon COPERT (jusqu'à 2020 et extrapolé à 2050).

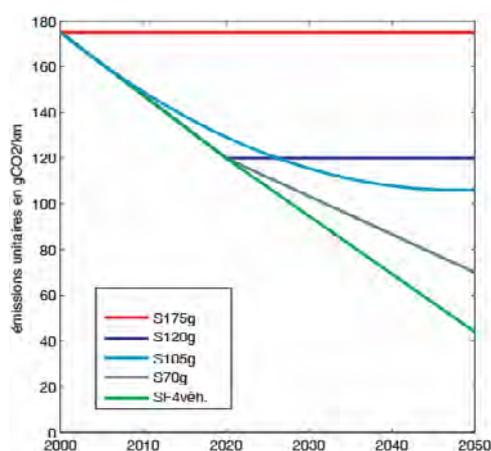


Source : M. MAÏZIÀ, UTEAM

On a donc préféré ici, même si cela paraît assez contestable, adopter des scénarios contrastés (volontaristes ou au fil de l'eau) même si ces derniers ne relèvent pas de tendances vraiment

observables. Le premier scénario maintient ainsi jusqu'à 2050 les niveaux actuels d'émissions soit 175 gCO₂/km (S175g). Le second envisage une mise sur le marché dès 2012 de véhicules neufs dont les émissions ne dépassent pas en moyenne 120 gCO₂/km. La pénétration de ce marché permettrait alors d'atteindre ce palier entre 2020 et 2030, palier se prolongeant jusqu'en 2050 (S120g) ou épousant une pente non linéaire lui permettant d'atteindre à cet horizon 105 gCO₂/km. Deux derniers scénarios volontaristes, peu probables, envisagent, d'une part, un niveau d'émission de 70 g de CO₂ (S70g), d'autre part, un facteur 4 réalisé sur les véhicules (SF4véhicule) soit une émission unitaire de 44gCO₂/km. Ces deux derniers scénarios permettent de mettre en évidence le poids des km.vp parcourus par rapport aux efforts techniques réalisés sur les véhicules.

Figure 83 : Hypothèses d'évolution de l'intensité CO₂ du parc automobile à l'horizon 2050



Source : M. MAÏZIÀ, UTEAM

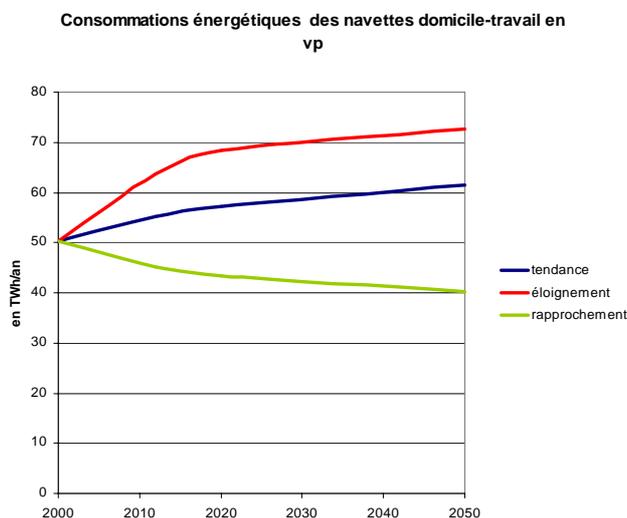
2.2. LES CONSOMMATIONS D'ENERGIE ET LES EMISSIONS DE CO₂ INDUITES PAR LA MOBILITE DOMICILE-TRAVAIL SELON LES SCENARIOS DE LOCALISATION DES MENAGES

Calculées sur la base d'un PCI moyen du carburant de 43 MJ/kg et un temps de travail annuel de 196 jours³⁴, les consommations annuelles induites par la mobilité domicile-travail avoisinerait les 50TWh/an en 2000. Cette mobilité, proche de 65,3 milliards de km parcourus, devrait croître à l'horizon 2050 (à partir des seuls effets démographiques et en considérant les distances moyennes égales à celles de 2006), de l'ordre de 22 % soit 77,8 milliards de km pour une consommation de 61,5TWh/an. Un éloignement à l'emploi de plus de 10 km doublerait cette progression en portant cette dernière à 44 % par rapport à 2000 (soit 72,5TWh/an). Le rapprochement entre l'emploi et

³⁴ Selon EIRO 2003.

l'habitat permettrait de ramener les distances parcourues à un peu plus de 5 milliards de km soit une réduction des consommations par rapport à 2000 d'environ 20 %.

Figure 84 : Consommations en énergie finale (en TWh/an) des déplacements domicile-travail en vp à l'horizon 2050 selon des scénarios éloignement au lieu d'emploi

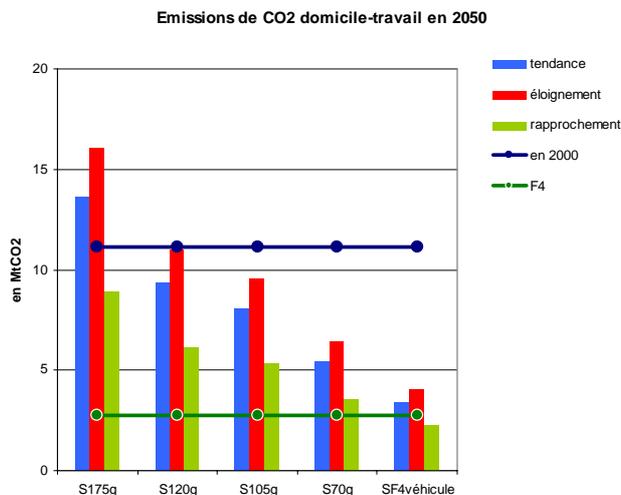


Source : M. MAÏZIÀ, UTEAM

Les efforts techniques concernant les émissions des véhicules suffiront-ils à contrebalancer les tendances de croissance des deux premiers scénarios ? Permettront-ils d'atteindre le facteur 4 pour la mobilité domicile-travail ? Un parc automobile émettant en moyenne 120gCO₂/km permettrait, à l'horizon 2050, de compenser les effets d'éloignement à l'emploi et réduirait de 17% ceux induits par les croissances tendanciennes. En réduisant les émissions de l'ordre de 20 %, le rapprochement à moins de 10 km de l'emploi, sans effort sur le facteur d'émissions du parc automobile, serait ainsi plus efficace que la généralisation du véhicule à 120gCO₂/km. A partir d'un tel niveau d'émission, le rapprochement de l'habitat et de l'emploi permettrait quant à lui d'atteindre un facteur 2. Ce facteur serait atteint pour les scénarios tendanciel et d'éloignement qu'à partir d'une pénétration parfaite du véhicule à 70gCO₂/km., il serait quasiment égal à 4 avec un rapprochement à l'emploi à des distances inférieures à 10 km.

Enfin le facteur 4 à l'échelle des véhicules correspondrait à des facteurs 3,25, 2,75 et 5 pour, respectivement, les projections tendanciennes, l'éloignement et le rapprochement domicile-travail.

Figure 85 : Émissions de CO2 en 2050 selon divers scénarios de localisation des ménages et de technologie du parc automobile



Source : M. MAÏZIÀ, UTEAM

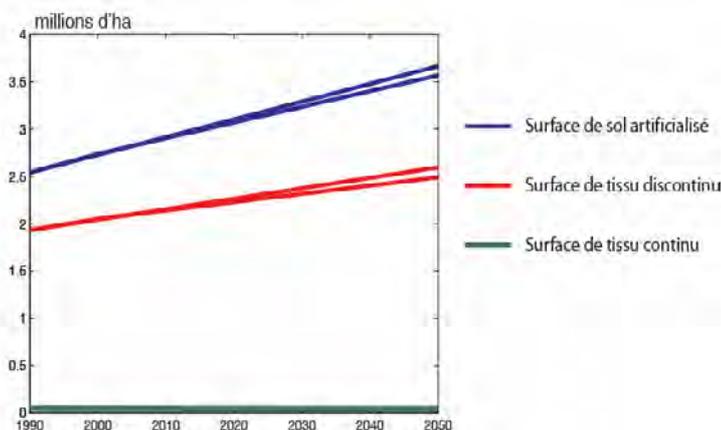
3. OCCUPATION DU SOL ET ARTIFICIALISATION

3.1. LES PROJECTIONS D'ARTIFICIALISATION DU SOL A L'HORIZON 2050 A PARTIR D'UNE RETROSPECTIVE 1990-2006

Nous avons vu que les modalités d'urbanisation, en termes d'occupation du sol, étaient fortement corrélées à la structure du parc de logements. Il est intéressant, à ce stade, d'examiner les développements à venir sans tenir compte de ces corrélations afin, dans un second temps, d'en apprécier dans une meilleure mesure la pertinence. Il s'agit donc ici de construire un scénario d'occupation du sol à l'aune d'un examen exclusif de la dynamique des surfaces continues, discontinues et artificialisées.

Ce scénario simule une croissance linéaire en se fondant sur le prolongement de deux tendances relatives à l'occupation du sol bien distinctes : d'une part, celle observée entre 2000 et 2006 (soit un intervalle court de 5 ans, courbes du bas, Figure 86), d'autre part, celle correspondant au développement entre 1990 et 2006 (soit 15 ans d'intervalle, courbe du haut, même figure). Dans les deux cas, le territoire passerait de 2,5 millions d'ha (en 1990) de sol artificialisé à 3,5 millions d'ha en 2050, soit une augmentation de l'étalement urbain de 40% par rapport à 1990 (30% par rapport à 2000 et 26% par rapport à 2006) : entre 812 000 ha et 1 millions d'hectares de surface agricole et naturel seraient ainsi rognés. La part de tissus discontinus demeurerait inchangée (environ 75 % du sol artificialisé) alors que celle du tissu continu décroîtrait au point de devenir encore plus négligeable.

Figure 86 : Projection linéaire de l'étalement urbain à l'horizon 2050 selon les rythmes observés entre 2000 et 2006 et 1990 et 2006



Source : M. MAÏZI, UTEAM

3.2. L'ARTIFICIALISATION DU SOL SELON LES SCENARIOS DE LOCALISATION DES MENAGES

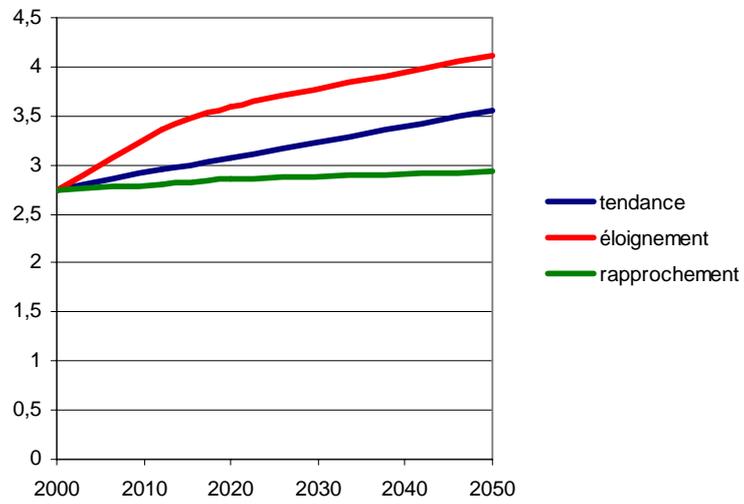
Ces résultats se retrouvent dans le scénario de référence lorsqu'on réintègre le lien avec le parc de logements. Rappelons que ce scénario a été construit à partir d'une extrapolation de la dynamique du parc observée entre 2000 et 2006 et sur la base d'un rythme de croissance (ou de décroissance) à l'échelle communale constant (en valeur absolue). Ce rythme poursuit donc la tendance de localisation de l'habitat observé dans la période en intégrant les divers processus de migration résidentielle.

Sur la base d'un tel calcul, l'artificialisation du sol atteindrait la même étendue que celle obtenue à partir du prolongement linéaire vu plus haut, à savoir un peu plus de 3,5 millions d'hectares (plus de 800 000 hectares supplémentaires par rapport à 2006). Cette convergence entre les deux scénarios s'explique par la constance relative des parts qu'occuperaient les maisons individuelles et les immeubles collectifs dans le stock de 2000 à 2050.

Le scénario d'éloignement à l'emploi, en modifiant ce partage et en favorisant la maison individuelle, accentuerait l'étalement de l'artificialisation en atteignant une surface minéralisée totale de l'ordre de 4,12 millions d'hectares. Le surplus représenterait près de 50 % par rapport à 2006 et 15 % par rapport à une projection tendancielle en 2050.

Le rapprochement de l'emploi à moins de 10 km de l'habitat permettrait de réduire la surface artificialisée d'environ 18 % par rapport à la tendance attendue à l'horizon 2050 et de 30% par rapport à un scénario d'éloignement. Néanmoins, vu le maintien d'une part non négligeable de la maison individuelle, ce scénario ne pourrait pas, à lui seul, interrompre la croissance d'une urbanisation minéralisée. Par rapport à 2006, le rapprochement à l'emploi produirait un surplus de sol artificialisé avoisinant les 200 000 hectares, soit une progression d'environ 7 %

Figure 87 : Évolutions de la surface artificialisée totale en millions d'ha à l'horizon 2050 selon les scénarios tendanciels, d'éloignement et de rapprochement à l'emploi



Source : M. MAÏZIÀ, UTEAM

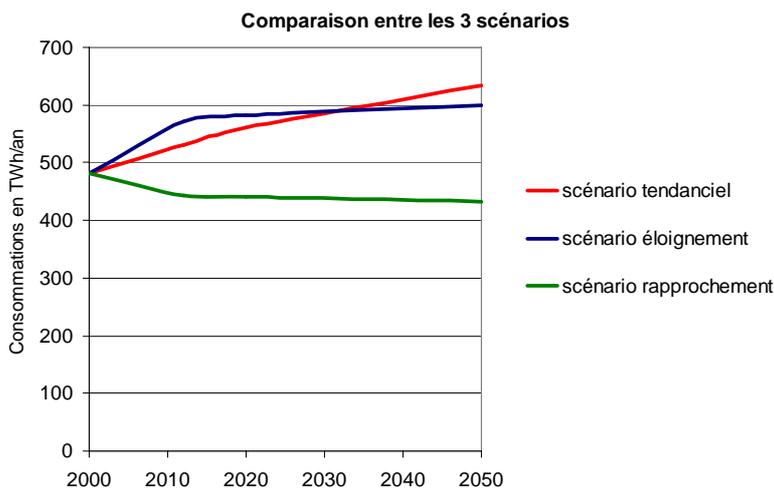
4. CONCLUSION

Que peut-on retenir de ces trois scénarios de localisation ? Essentiellement trois points.

- 1- Quel que soit le scénario, on constate que les dynamiques en jeu sont orientées vers un fort développement de la maison individuelle. Comme si celle-ci était moins sensible, en comparaison à l'immeuble collectif, aux choix de localisation de l'habitat et de l'emploi. Ce constat résulte principalement de la dynamique extrêmement vigoureuse du secteur de l'habitat individuel observé entre 1999 et 2006 et d'une modélisation qui ne remet pas en cause les mouvements à l'intérieur du stock de logements pendant cette période. On retrouve cette propriété dans l'évolution des parts de marché du chauffage électrique : peu contraint par la typologie du logement et sa localisation, ce système de chauffage a investi avec vigueur le stock au point d'assurer sa croissance pour tous les scénarios. Les scénarios de rapprochement de l'habitat et de l'emploi peuvent conduire à des réductions de consommations d'énergie encore plus significatives que celles de la Figure 88 par la seule structure du parc à condition que l'on découple la question de la typologie des logements (et de leur système de chauffage) de celle de leur localisation dans le territoire. Or il n'est envisageable de considérer une rupture entre structure de parc et localisation et de l'emploi que si l'on remet en cause les liens empiriques que nous avons mis en évidence dans cette recherche.
- 2- En outre, les effets de structure de parc n'arrivent pas, malgré des scénarios exagérant la construction de logements neufs performants, à compenser des tendances haussières dues à l'augmentation numérique des logements, des surfaces habitables et des distances parcourues lors des navettes domicile-travail. Au mieux, une généralisation de l'emploi à moins de 10 km permettrait-elle dans l'intervalle 2000-2050 de stabiliser les consommations à partir de 2030 -après un palier à 440 TWh/an aux alentours de 2020- grâce à une part du logement collectif significative et une réduction drastique des besoins de chauffage obtenue à partir des exigences BBC. Mais cette stabilisation ne serait pérenne que si la pression démographique était suspendue durablement. En d'autres termes, obtenir des trajectoires baissières des consommations d'énergie à partir du seul jeu de localisation de l'habitat et de l'emploi, ne serait possible qu'à partir d'un rapprochement itératif et de plus en plus exigeant de ces derniers. Or, c'est exactement l'inverse qui se produit entre 1999 et 2006. En augmentant, les distances moyennes aggravent la facture énergétique de la mobilité quotidienne plus que ne le fait la croissance numérique des flux. La technologie à l'échelle du véhicule permettrait au mieux d'annuler les effets de croissance des flux et ne pourrait inverser les effets de croissance résultant de l'augmentation des distances à l'emploi. Le secteur de l'habitat pourrait-il jouer un rôle de compensation ? Nous avons montré, même si nous n'avons pas cherché à déterminer la part d'énergie électrique produite par les bâtiments à partir de 2020, que la réponse à cette question est clairement négative lorsqu'on se limite à un jeu de localisation des logements. Et si l'on considère les efforts de réhabilitations thermiques du parc existant ? Là encore la réponse sera négative. Nous avons montré

dans d'autres recherches que les efforts techniques à l'échelle du bâtiment permettraient au mieux de réduire les consommations du secteur de l'habitat et d'atteindre au plus juste le facteur 4 sans pour autant disposer de gisements suffisants pour satisfaire les besoins de postes supplémentaires.

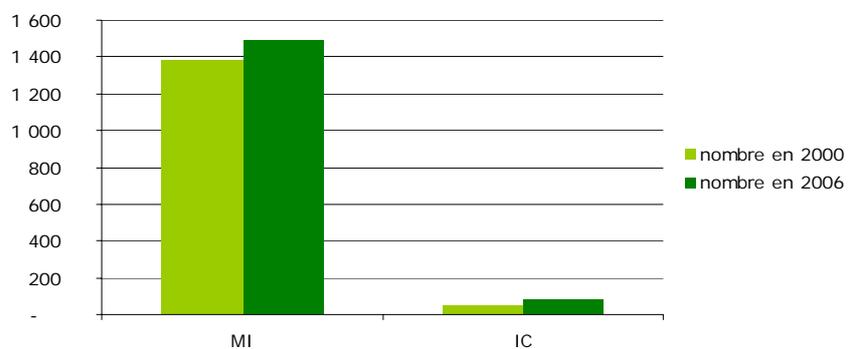
Figure 88 : Consommations en énergie finale du chauffage, de l'ECS et de la mobilité domicile-travail en vp à l'horizon 2050 selon les 3 scénarios



Source : M. MAÏZIÀ, UTEAM

- 3- Les effets structurels des deux premiers points se retrouvent dans l'évolution de l'artificialisation du sol. Tous les scénarios montrent que l'urbanisation continuera d'absorber les surfaces agricoles périphériques par extension continue ou par mitage (question non examinée ici mais très défavorable à la maison individuelle si l'on se réfère à la Figure 89). Seule l'ampleur de cette dilution de la surface urbanisée diffère d'un scénario à un autre. Le surcroît de surface artificialisée est dû à la dynamique du parc favorable, comme nous l'avons vu, à la maison individuelle. Comment réduire alors cette expansion ? La seule réponse que l'on puisse donner dans le cadre de cette recherche, serait, à l'image de ce que nous évoquons dans le 1^{er} point, de rompre la relation empirique qui lie le mode d'artificialisation du sol avec la structure du parc de logements. En effet, les simulations reposent sur les modes d'urbanisation en vigueur entre 1990 et 2006. Or ces derniers peuvent être remis en cause et, à l'image de l'amélioration des rendements énergétiques des systèmes de chauffage ou des véhicules particuliers, peuvent faire l'objet de progrès en termes de « rendement d'occupation du sol ».

Figure 89 : Mitage et nombre de maisons individuelles et d'immeubles collectifs (en milliers) localisés dans des communes totalement non artificialisées



Source : M. MAÏZIÀ, UTEAM

VII.BIBLIOGRAPHIE

1. GENERALITES

Aymonino C., Brusatin M., Fabbri G., Lena M., Lovero P., Lucianetti S., Rossi A., La città di Padova, Rome, 1970.

Barles S., Maïzia M., Souami T., Traisnel J. P. (eds.). Actes de European Conference, Energy, Material and Urban Environment (EMUE), LTMU/GSU-UTC, Paris, 2006.

Berque A., Bonnin Ph., Ghorra-Gobin C., La ville insoutenable, Paris, Belin, 2006.

Borie A., Micheloni P., Pinon P., Forme et déformation, Paris, C.E.R.A.-E.N.S.B.A., 1978.

Borie A., Micheloni P., Pinon P., Formes urbaines et sites de méandres, Rueil-Malmaison, Groupe d'étude des formes architecturales et urbaines, 1981, 149 p.

Breheny M. J., Sustainable development and urban form, Pion Limited, 1992, 292 p.

Gordon O., Richardson HW, Are Compact Cities a Desirable Planning Goal? Journal of the American Planning Association, Volume 63, Issue 1 March 1997, pages 95 - 106

Jacquot A., Projection de ménages pour la France métropolitaine à l'horizon 2030 : Méthode et résultats, ISEE, Direction des Statistiques Démographiques et Sociales, Union Nationale des Constructeurs de Maisons Individuelles, Conférence de presse du jeudi 23 février 2006.

Jacquot A., Projection de ménages pour la France métropolitaine à l'horizon 2030 : Méthode et résultats, ISEE, Direction des Statistiques Démographiques et Sociales

Marquez L. O., Smith N C, A framework for linking urban form and air quality, Environmental Modelling and Software Volume 14, Issue 6, November 1999, Pages 541-548

Morel B., Redor P., (2006), « Enquêtes annuelles de recensement 2004 et 2005, La croissance démographique s'étend toujours plus loin des villes ». Insee Première, 1058.

Peuportier B., Bâtiment, énergie et environnement, ENSMP, Paris, 1995.

Traisnel J.P, « Quartiers durables, éco-quartiers : quelles ruptures environnementales avec la ville émergente ? » Colloque Inégalités environnementales et sociales : L'environnement, facteur de cohésion urbaine ?, IUP URBA+ et Institut d'Urbanisme de Paris, 19 mai 2005. (à paraître)

Whitehand J.W.R., (ed.) The urban Landscape: historical development and management, Institute of British Geographers Special Publication 13, Academic Press, Londres).

2. TRANSPORT, MOBILITE ET EMISSIONS DE CO2

Allaire J « Choisir son mode de ville : Formes urbaines et transports dans les villes émergentes », Les cahiers de GLOBAL CHANCE - N° 21 - mai 2006

André M, Olivier D, Pruvost C - INRETS, « Impact de l'amélioration de la régulation du trafic sur la consommation d'énergie et les émissions de polluants des véhicules Légers » Laboratoire Energie Nuisances - The Science of the Total Environment 169 (1995) 273-282

Breheny.M "The compact city and transport energy consumption", Transactions of the Institute of British Geographers, Volume 20, Number 1, March 1995 , pp. 81-101

Cortés Cristián E , Vargas Luis S., Corvalán Roberto M, « A simulation platform for computing energy consumption and emissions in transportation networks », Universidad de Chile, Blanco Encalada 2002, Santiago, Chile - Transportation Research Part D 13 (2008) 413-427

Frank L D, Stone Jr. B, Bachman W « Linking land use with household vehicle emissions in the central puget sound: methodological framework and findings » - City & Regional Planning Program, Georgia Institute of Technology - Transportation Research Part D 5 (2000) 173-196

Frank L. D., Pino G., « Impacts of mixed use and density on utilization of three modes of travel : single occupant vehicle, transit and walking », Transportation Research 1466, 1994, pp. 44-52.

Gallez.C, "Indicateurs de comparaison de scénarios prospectifs : Peut-on élargir le débat sur l'avenir de la mobilité urbaine ? » Recherche Transports Stkcurit.5 77 (2002) 281-295

Gokman G, Dajani J S. « Energy, urban form and transportation policy » – transpo Res.Vol 8. pp267-276. Pergamon Press 1974. Printed in Great Britain

Grazi. F, Van den Bergh JCJM, "Spatial organization, transport, and climate change: Comparing instruments of spatial planning and policy" ECOLOGICAL ECONOMICS 67 (2008) 630 – 639

Gualtieri G., Tartaglia M., "Predicting urban traffic air pollution : a GIS framework" in Transon Res.-D, Vol. 3, N°5, pp. 329-336, 1998.

Heran F, IFRESI-CNRS / CLERSE " La réduction de la dépendance automobile » Article paru en 2001 dans le n° 37 des Cahiers Lillois d'Economie et de Sociologie, pp. 61-86

Hickman.R, Banister.D, "Transport and reduced energy consumption: what role can urban planning play?" Transport Studies Unit Oxford University Centre for the Environment - Working paper N°1026 September 2007

IAURIF, DREIF, STIF. SDRIF Transport et énergie en Ile-de-France. Rapport de synthèse. Contribution du sous-groupe "Energie" du groupe "Mobilité et transports". Août 2006.

Jaccard M, Failing Berry T, Fraser S, « From equipment to infrastructure: community energy management and greenhouse gas emission reduction » - Energy Policy, Vol. 25, No. 13, pp. 1065-1074, 1997

Kenworthy Jr « Transport Energy Use and Greenhouse Gases in Urban Passenger Transport Systems: A Study of 84 Global Cities » Third Conference of the Regional Government Network for Sustainable Development, Notre Dame University, Fremantle, Western Australia, September 17-19, 2003

Lefèvre.B, "Long-term energy consumptions of urban transportation: A prospective simulation of "transport-land uses" policies in Bangalore". pour Benoit Lefevre PhD thesis, defended in December 2007 - Energy Policy (2008), doi:10.1016/j.enpol.2008.10.036

Maizia, M., « Les leviers pour maîtriser la mobilité ne sont pas ceux que l'on pense : l'inversion de paradigme dans la gestion des transports » in sous la direction de A. DE MEYERE, l'Oise, territoire 2008, les éd. de la direction départementale de l'équipement de l'Oise, 2008, pp. 55-59.

Massot M. H, Korsu E., Eynault C., « Lieux de travail, lieux de résidence : figures de leur mise en cohérence et de leurs impacts sur les termes du développement métropolitain durable », Territoire en mouvement, numéro spécial « Mobilité, Structuration et restructuration des espaces métropolitains », Lille, 2006.

Morcheoine A., transports de marchandises, énergie, environnement et effet de serre, ADEME, 2006, 26 p.

Nicolas J.P., Duprez F, Durand S, Poisson F, Aubert P.L, Chiron M, Crozet Y, Lambert J. Local impact of air pollution: lessons from recent practices in economics and in public policies in the transport sector. Atmospheric Environment. 2005. Vol. 39, Issue 13. pp. 2475-2482.

Nicolas J.P., Duprez F, Durand S, Poisson F, Aubert P.L, Chiron M, Crozet Y, Lambert J. La monétarisation des effets locaux de la pollution atmosphérique : des évaluations scientifiques aux décisions politiques. Arcueil : INRETS; Lavoisier. 2004. 256 p. (Synthèses, n° 46). ISBN 2-85782-600-1.

Nicolas J.P., Duprez F., Durand S., Poisson F., Aubert P.L., Chiron M., Crozet Y., Lambert J., La monétarisation des effets locaux de la pollution atmosphérique : des évaluations scientifiques aux décisions politiques, Arcueil : INRETS, Lavoisier, 2004. 256 p.

Nicolas J.P., Mignot D. "Transport-Environment Issues and Countermeasures in Various Metropolises: Lyon" In : Nakamura H., Hayashi Y., May A. D. (Eds.). Urban Transport and The Environment - An International Perspective, Oxford : Elsevier, 2004. pp. 285-292.

Nicolas J.P., Verry D., « Indicateurs de mobilité durable : outils d'analyse comparative de la mobilité urbaine » [CD-ROM]. In : ASRDLF. Villes et territoires face aux défis de la mondialisation - XLII colloque de l'ASRDLF, 5-7 septembre 2005, Dijon, 2005, 20 p.

Ntziachristos L., Samaras Z., COPERT III Computer programme to calculate emissions from road transport, Methodology and emission factors (Version 2.1), Technical report No 49, ETC/AEM, European Environment Agency, nov. 2000, 86 p.

Nuissl H, Haase D, Lanzendorf M, Wittmer H, "Environmental impact assessment of urban land use transitions—A context-sensitive approach"

Orfeuil J.P., « Déplacements, contrainte énergétique et effet de serre : quelques repères pour un débat », Cahiers de l'AURIF: Contraintes énergétiques et mutations urbaines, 147, février 2008, pp. 88-98.

Steadman P., « Energy and Urban form »

Pouyanne.G, « Des avantages comparatifs de la ville compacte à l'interaction forme urbaine-mobilité. Méthodologie et premiers résultats" les Cahiers Scientifiques du Transport N° 5/2004 - Pages 49-82

Raux C., Traisnel J.P., Pochet P., Maizia M., Croissant Y., Bagard V., Peguy P.Y. (2006) Analyse et modélisation des comportements transports-habitat-localisations. ETHEL. Rapport R3. Action Concertée CNRS – Ministère de la Recherche. LET, Lyon, septembre 2006, 127 p.

Rodrigues da Silva. A.N, Camargo Ferraz Cost.G, Margarido Brondin.C, "Urban sprawl and energy use for transportation in the largest Brazilian cities", Energy for Sustainable Development • Volume XI No. 3 • September 2007

Routhier J-L., « Du transport de marchandises en ville à la logistique urbaine ». Centre de Prospective et de veille scientifique. 2002. 67 p. (2001 plus - Synthèses et Recherches, n° 59)

Saunders.MJ, Krumdieck.S, Dantas.A, "Energy reliance, urban form and the associated risk to urban activities", Road and transport research - march 2006 – Volume 15 n°1

Vanco.F, « Formes urbaines et coût de la mobilité urbaine des ménages » 155e colloque de l'Association de science régionale de langue française, Rimouski, Québec, Canada, Août 2008.

3. BATIMENT, MORPHOLOGIE URBAINE, CONSOMMATIONS D'ENERGIE ET EMISSIONS DE CO2

Adnot J., Orphelin M., « Evolution des consommations de climatisation en Europe, nouvelles mesures réglementaires », Les installations frigorifiques et l'environnement, Journée Française du Froid, Interclima, AFF, 1999, pp. 33- 44.

Adolphe L., "A simplified model of urban morphology: application to an analysis of the environmental performance of cities", Environment and Planning B, vol. 28, 2001, pp. 183-200.

Adolphe L., M. Maïzia et al., "SAGACités Towards a management aided system for integrating outdoor climate into the design of urban spaces", International conference on passive and low energy architecture, Passive and Low Energy Architecture (PLEA) 2002, Toulouse.

Alanne K., Saari A., Estimating the environmental burdens of residential energy supply systems through material input and emission factors, Building and Environment, à paraître, Disponible en ligne depuis le 19 novembre 2007.

APUR, Consommations d'énergie et émissions de gaz à effet de serre liées au chauffage des résidences principales parisiennes, 2007, APUR éditeur, 48 p.

Baccaïni B., Sémécurbe F., Thomas G., (2007), « Les déplacements domicile-travail amplifiés par la périurbanisation », Insee Première, 1129.

Berque A., Bonnin Ph., Ghorra-Gobin C., La ville insoutenable, Paris, Belin, 2006.

Buscarlet K., « La méthode SOLO ou méthode mensuelle d'évaluation des performances thermiques des installations solaires de production d'eau chaude sanitaire », Chauffage, ventilation, conditionnement d'air, vol. 5, 2001, pp. 36-38.

Cardenas-Jirón L.A., Azar S., Teller J. (2006), « Thermal characterisation of urban fabrics using GIS and Townscope modelling tool », Proc. of 4th European Conference on Energy Performance & Indoor Climate in Buildings (EPIC), Lyon, 20-22 novembre 2006.

CERMA, Actes du colloque : Conception des formes urbaines et contrôle énergétique, Nantes, 24-25 avril 1986. Nantes, CERMA, 1986, 274 p.

CETE Lyon, Perméabilité à l'air de l'enveloppe des bâtiments, généralités et sensibilisation, CETE Lyon, Département Villes et Territoires, 2006, 42 p.

Champel B., Paredes, L.Current Development of Green IPPs: Experiences, Challenges, and Strategies

David J. Sailor, Lu Lu, "A top-down methodology for developing diurnal and seasonal anthropogenic heating profiles for urban areas" Atmospheric Environment 38 (2004) 2737-2748

Deilmann C., « Climate change: lessons from Germany », Building Research and Information, vol. 32(1), 2004, pp. 65-66.

Deilmann C., Gruhler K. - Changes in housing sector heating demand. Scenario 2030 – building type and age groups - Evolution de la demande en chauffage dans le secteur résidentiel. Scénario 2030. Type et période de construction Leibniz-Institute for Ecological and Regional Development (IOER) (Allemagne-Germany)

Depecker P., Brau J., Pallier J.M., « Économie d'énergie et forme des bâtiments. L'analyse morphologique » CVC,

Depecker P., Roux J. J., Breton J., Le rôle de la configuration des bâtiments. Une question hybride de conception architecturale et d'énergétique, Collège International des Sciences de la Construction, ITBTP, 1984.

Deque, F., Rylatt, M., Kabele, K., Manolaki, E., Nieminen, J. (2003), "Integrated resource flow modelling of urban neighbourhoods: Project SUNtool", Proc. of CISBAT Conference 2003, Lausanne, Switzerland

Druckman A.,T. Jackson "Household energy consumption in the UK: A highly geographically and socio-economically disaggregated model" - Energy Policy 36 (2008) 3177– 3192

EEA, (2006), Report No 10/2006, Urban sprawl in Europe. The ignored challenge. http://reports.eea.europa.eu/eea_report_2006_10/en/eea_report_10_2006.pdf

ENERGIES DEMAIN, Cadastre des émissions de pollution, MEDD, CITEPA

ENERGIES DEMAIN, CO2 usages, Ministère de l'équipement - DGUHC,

ENERGIES DEMAIN, DIACT Neutralité Carbone, DIACT (ex DATAR),

ENERGIES DEMAIN, DPT Climat, MIES,

ENERGIES DEMAIN, Indicateurs plan climat, Ministère de l'équipement - DGUHC,

Escourrou G., Roussel I., Climat et microclimat urbain, pollutions atmosphériques et nuisances météorologiques localisées, 1995, IAURIF, Paris, 168 p.

Ewing R, Rong F, "The Impact of Urban Form on U.S. Residential Energy Use"

Favrat D., Marechal F., Epelly O., "The challenge of introducing an exergy indicator in a local law on energy", Energy Volume 33, Issue 2, 19th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems - ECOS 2006, 2008, pp. 130-136.

Ferrante A., M. Santamouris, I. Koranaki, G. Mihalakakou, N. Papanikolaou. "The design parameters' contribution to improve urban microclimate: An extensive analysis within the frame of polis research project in Athens", Epic '98, pp 757-762.

Heiple S, Sailor D J., "Using building energy simulation and geospatial modeling techniques to determine high resolution building sector energy consumption profiles"

Helle A. J., "Heat-load modelling for large systems", Applied Energy Volume 72, Issue 1, 2002, pp. 371-387.

Hens H., G. Verbeeck, B. Verdonck « Impact of energy efficiency measures on the CO2 emissions in the residential sector, a large scale analysis" 2001 Published by Elsevier Science B.V.

Hepbasli A., "A key review on exergetic analysis and assessment of renewable energy resources for a sustainable future", *Renewable and Sustainable Energy Reviews* Volume 12, Issue 3, 2008, pp. 593-661.

Hepbasli A., "A study on estimating the energetic and exergetic prices of various residential energy sources", *Energy and Buildings* Volume 40, Issue 3, 2008, pp. 308-315.

Hui S C.M, "Low energy building design in high density urban cities" - *Renewable Energy* 24 (2001) 627– 640

IAURIF, « Contraintes énergétiques et mutations urbaines » 2006-2007 Programme de travail et références documentaires

Jaurequi, E., *Bibliography of Urban climatology for the period 1992-1995*, World Meteorological Organisation W. M. O. /T. D. N ° 759, 1996, Geneva.

Johansson P., Nylander A., Johnsson F., "Electricity dependency and CO2 emissions from heating in the Swedish building sector-Current trends in conflict with governmental policy?", *Energy Policy*, Volume 34, Issue 17, 2006, pp. 3049-3064.

Jones P, Lannon S, Williams J. "Modelling building energy use at urban scale", *Proc. of the Seventh International IBPSA Conference Rio de Janeiro, Brazil, 2001*, pp. 13-15.

Jun Li, "Towards a low-carbon future in China's building sector--A review of energy and climate models forecast", *Energy Policy*, Volume 36, Issue 5, 2008, pp. 1736-1747.

Kampf J, Robinson D.A, "A simplified thermal model to support analysis of urban resource flows", *Energy and Buildings* 39, 2007, pp. 445–453.

Laurent M.-H., Barthel L., Traisnel J.-P., Nibel S., Maïzia M. et al, *Le système énergétique des bâtiments résidentiels de demain, Rapport final version 1, LTMU/CNRS/Paris8-CSTB-EDF, PUCA, 7 juin 2006, 125 p.*

Littlefair P.J., Santamouris M., Alvarez S., Dupagne A., Hall D., Teller J., Coronel J.F., Papanikolaou N., *Environmental site layout planning: solar access, microclimate and passive cooling in urban areas*, CRC, London, 2000, 151 p.

Maïzia M., « Energie, réseaux et formes urbaines », *Cahiers de l'IAURIF : Contraintes énergétiques et mutations urbaines*, 147, février 2008, pp. 174-179.

Maïzia M., « L'énergétique urbaine et la morphologie des villes : l'analyse du bâti parisien » *Les Annales de la recherche urbaine*, N°103, 2007, pp. 81-87.

Maïzia M., *GIS and district cooling : Paris' case study in SANTAMOURIS*, Mattheos, ADNOT, Jérôme et alii. *URBACOOOL- Energy efficient cooling systems & techniques for urban buildings. Handbook, Reference Manual.*, 2003, SANTAMOURIS ed. 225p.

Maïzia M., *L'énergétique urbaine et la question de la morphologie des villes : les consommations du bâti parisien soumis aux Annales de la Recherche urbaine*, à paraître 2007.

Maïzia M., *Prospective des consommations d'énergie et des émissions de CO2 dans l'habitat : les Gisements offerts par les pompes à chaleur*, *Cahier du CLIP N°18*, 2007.

Maïzia M., Traisnel J. « Energie et Habitat. Des économies d'énergie à domicile », *Vie de la recherche scientifique : dossier spécial Energie : produire et économiser*, 370, juillet-août-septembre 2007, pp. 42-44.

Maïzia M., Traisnel J.P. « Prospectives à l'horizon 2030 et 2050 des consommations d'énergie dans le secteur résidentiel français » in BARLES, S., MAÏZIA, M., SOUAMI, T., TRAISNEL, J. P. (eds.). *Énergies et matières dans la ville.*

Maïzia, M., Prospective des consommations d'énergie et des émissions de CO2 dans l'habitat : les gisements offerts par les pompes à chaleur, Cahier du CLIP N°19, Iddri, 2007.

Miller P. Chagas P., Configurations Urbaines : Apport Énergétique et Microclimat Étude des Espaces Extérieurs de Trois Ensembles à Strasbourg, Rapport de Recherche n°78/61/015 Plan de Construction ARIAS, Palais du Rhin, Strasbourg, Juillet 1980, 182 p.

Mitchell G, "Urban development, form and energy use in buildings: a review for the solution project" August 2005

Norman J; MacLean H L., Asce M.; and Christopher A. Kennedy, "Comparing High and Low Residential Density: Life-Cycle Analysis of Energy Use and Greenhouse Gas Emissions" - JOURNAL OF URBAN PLANNING AND DEVELOPMENT / MARCH 2006

Oke T., « Street design and urban canopy layer climate », Energy and Buildings, Vol. 11, 1988, pp. 103-113.

Oke T., Boundary layer climates, Methuen, London & New York, 1987.

Oke, T., Bibliography of urban climatology 1981- 1988, World Meteorological Organisation W. M. O. /T. D., 397 , Geneva, 1990.

Oliveira, L. A., Maïzia, M.; Oliveira, C.T, Melhado, Burrattino, S., « The integrated design process of building facade renovation: a French case study », Gestao & tecnologia de Projeto no Ambiente Construido, Vol.3. N°1, mai 2008, pp 14-25.

Owens , Energy, urban form and planning,University of Nottingham, 1980.

Peneau J. -P. , « Morphologie urbaine et climat urbain » in : Journée du CUEPE 1995 Énergie et climat urbain, Genève, pp. 19-29.

Peuportier B., « Bancs d'essais de logiciels de simulation thermique », Journée thématique SFT-IBPSA mars 2005, 8 p.

Ratti C, Baker N, Steemers K, " Energy consumption and urban texture" - Energy and Buildings 37 (2005) 762–776

Rickaby P. A., Steadman J. P., Marett M., « Patterns of land use in English towns: implications for energy use and carbon dioxide emissions » European research in regional science, vol. 2, 1992.

Rolfman B., "Optimal supply and demand investments in municipal energy systems", Energy Conversion and Management, Volume 45, Issue 4, 2004, pp. 595-611.

Rolfman B., CO2 "emission consequences of energy measures in buildings", Building and Environment Volume 37, Issue 12, 2002, pp. 1421-1430.

Sakawa M., Kato K., Ushiro S., "Operation planning of district heating and cooling plants through genetic algorithms for nonlinear 0-1 programming", Computers & Mathematics with Applications, Volume 42, Issues 10-11, 2001, pp. 1365-1378.

Shimoda Y., Mizuno M., Yamaguchi Y., "Transition to a sustainable urban energy system from a long-term perspective: Case study in a Japanese business district " - Energy and Buildings 39 (2007) 1–12

Shimoda Y., Mizuno M., Asahi T., Taniguchi A., "Evaluation of city-scale impact of residential energy conservation measures using the detailed end-use simulation model" - Energy 32 (2007) 1617–1633

Shimoda Y., Mizuno M., Fujii T., Morikawa T., "Residential end-use energy simulation at city scale" - Building and Environment 39 (2004) 959 – 967

Shimoda Y., Mizuno M., Yamaguchi Y., "Proposal of a modeling approach considering urban form for evaluation of city level energy management », Energy and Buildings 39 (2007) 580–592

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.

Shimoda, Y. Mizuno, T. Yamaguchi, Y. (2007) "Proposal of a modeling approach considering urban form for evaluation of city level energy management", Energy and Buildings n°39, pp. 580–592.

Sjodin J., Henning D., "Calculating the marginal costs of a district-heating utility", Applied Energy, Volume 78, Issue 1, 2004, pp. 1-18.

Steeners K,"Energy and the city: density, buildings and transport" - Energy and Buildings 35 (2003) 3–14

Steeners, K., Baker, N., Crowther, D., Adolphe, L. et al. , Towards Zero Emission Urban Development, Final report, DGXII APAS RENA CT 94 0016, 1997.

Teller J. (2006), « Des indicateurs pour la conception des ambiances urbaines », conférence finale du projet ADEQUA (Aménagement Durable des Quartiers), Chambéry, 18 octobre 2006.

Teller J., Azar S., (2001) « TOWNSCOPE II - A computer system to support solar access decision-making », Solar Energy Journal, Elsevier, vol. 70, n°3, pp. 187-200.

Teller J., "TOWNSCOPE : a Project Information System for Urban Environmental Design", COST UCE Action C4 conf.on Information Systems and Processes for Urban Civil Engineering Applications, Rome,21-22 Novembre 1996, U. SCHIAVONI (ed.), European Commission DGScience, Research and Development, pp.158-166.

Thyholt M., Hestnes A.G., "Heat supply to low-energy buildings in district heating areas: Analyses of CO2 emissions and electricity supply security", Energy and Buildings, Volume 40, Issue 2, 2008, pp. 131-139.

Torchio M. F., Genon G., Poggio A., Poggio M., « Merging of energy and environmental analyses for district heating systems », Energy à paraître, disponible en ligne depuis le 26 mars 2008.

Traisnel J.P, « Les forces contrariées entre le centre et la périphérie : quelle mesure environnementale ? », colloque Les trois sources de la ville-campagne, Cerisy, Septembre 2004. Texte publié dans : A. Berque, Ph. Bonnin, C. Ghorra-Gobin, La ville insoutenable, Paris, Belin, 2006, pp. 129-143.

Traisnel J.P, Habitat et développement durable, étude rétrospective et prospective, Cahiers du CLIP, n°13, programme ECODEV-CNRS, mai 2001.

Traisnel J.-P., Maizia, M., Roditi, D., « Habitat et développement durable, les perspectives offertes par le solaire thermique », Cahier du CLIP N°16, Sept. 2004, pp. 3-46.

Viejo Garcia P. , BEHNISCH, MARTIN: "Comparing German Building Stocks in Space and Time, from City to Region" CUPUM, July 2005

Viejo Garcia P., Behnisch, Martin „Methodische Untersuchungsansätze zur Beschreibung des deutschen Gebäudebestandes unter Verwendung von Bodenbedeckungsdaten und Informationen aus dem Automatischen Liegenschaftskataster.“ Workshop: Simulation in den Umwelt- und Geowissenschaften, Medizin und Biologie an der Universität Leipzig, 2006

Viejo Garcia P., Estimación del consumo de energía basado en teledetección y SIG – Caso de estudio: el barrio de Bourzwiller en Mulhouse (Francia) Paredes, L.; Kuhnle, C.; Lemp, D.; Poyac, Bender G.; T.: ESRI GIS Conference September 2005, Madrid, Spain

Viejo Garcia P., Potential of Deep Aquifers for Geothermal Energy production in Alsace

Viejo Garcia P., GIS based Forest Biomass Exploitation for Energy Supply in the Northern Black Forest Region. Heisig, H.; Kuhnle, C.; Paredes, L.; Wiesel, J. Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation (PFG), 4/2005, S. 273-280

Wang W., Rivard H., Zmeureanu R., "An object-oriented framework for simulation-based green building design optimization with genetic algorithms" Journal of Advanced Engineering Informatics, Vol. 19, No. 1, 2005, pp. 5-23.

Weber C., Maréchal F., Favrat D., "Design and optimization of district energy systems", Plesu V., Agachi S., Editor(s), Computer Aided Chemical Engineering Elsevier, 2007, Volume 24, 17th European Symposium on Computer Aided Process Engineering, pp. 1127-1132.

VIII. TABLES

1. TABLE DES TABLEAUX

Tableau 1: Variables de formes urbaines et échelles	17
Tableau 2 : Bilan environnemental en fonction des tissus urbains	19
Tableau 3 : Synthèse de la géométrie des échantillons.....	38
Tableau 4 : Caractéristiques thermiques des éléments constitutifs de l'enveloppe par période de construction.	39
Tableau 5 : Caractéristiques des typologies de formes urbaines.....	40
Tableau 6 : Propriété du type urbain 6.5.....	41
Tableau 7 : Propriété du type urbain 6.5.....	42
Tableau 8 : Propriété du type urbain 5.4.....	44
Tableau 9 : Propriété du type urbain 4.1.....	46
Tableau 10 : Propriété du type urbain 6.5.....	47
Tableau 11 : Propriété du type urbain 1.1.....	52
Tableau 12 : Caractéristiques des types de tissu urbain.....	54
Tableau 13 : Synthèse des besoins chauds froids, apports solaires par type urbain	54
Tableau 14 : Synthèse des caractéristiques des types urbains, besoins froids, chauds et gisements solaires. 58	
Tableau 15 : Matrice de description des déplacements.....	61
Tableau 16 : Parts modales selon deux motifs dans l'aire métropolitaine lyonnaise.....	61
Tableau 17 : Répartitions par motifs, nombre de déplacements et distances parcourues des déplacements en Ile-de-France.....	63
Tableau 18 : Villes retenues pour croiser les données EMD et TCU.....	66
Tableau 19 : Coefficients de corrélation entre paramètres de systèmes de transport en commun et parts modales disponibles.....	68
Tableau 20 : Nomenclature MOS des tissus considérés dans l'étude.....	70
Tableau 21 : Choix de l'indicateur de tissu le plus impactant pour les parts modales.....	71
Tableau 22 : Lien entre limite inférieure des flux pour prise en compte et corrélations entre PM et part de tissu dense commune d'origine + part de tissu dense commune de destination	82
Tableau 23 : découpage en zones selon les ZAUER.....	86
Tableau 24 : Evolution de la répartition des logements (résidence principale) par ZAUER entre 1999 et 2006.87	
Tableau 25 : Progression des parts de marché des systèmes de chauffage.....	88
Tableau 26 : Taille des ménages selon la localisation.....	90
Tableau 27 : Surface moyenne des logements (m ²) en 1999 et 2006.....	91
Tableau 28 : Surface du parc logements en 1999 et 2006	91
Tableau 29 : Portée moyenne des migrations domicile- travail en 1999 et 2006 par ZAUER.....	103
Tableau 30 : Portée moyenne des migrations domicile- travail en 1999 et 2006 par ZAUER et selon l'orientation des flux.....	103
Tableau 31 : Nomenclature de Corine Land Cover à divers niveaux.....	116
Tableau 32 : Comparaison statistique des objets contenus dans le MOS et dans CLC.....	117
Tableau 33 : Comparaison des pourcentages CLC dans MOS.....	122
Tableau 34 : Principales classes du MOS et classes CLC auxquelles elles appartiennent.....	123

Tableau 35 : Coefficient de corrélations entre typologie de logement et période de construction et surface de tissu continu	131
Tableau 36 : Coefficient de corrélations entre typologie de logement et période de construction et surface de tissu discontinu.....	132
Tableau 37 : Coefficient de corrélations entre typologie de logement et période de construction et surface de sol artificialisé	132
Tableau 38 : Dépendance des segments du parc de logement avec les types d'occupation des sols.	132
Tableau 39 : Effets énergétiques et émissifs des trois scénarios pour le secteur de l'habitat	145

2. TABLE DES FIGURES

Figure 1 : Répartition de la population et consommation d'énergie en fonction des tissus urbains.....	21
Figure 2 : Architecture du modèle de Shimoda et al.	26
Figure 3 : architecture du modèle de Yamguchi et al.....	27
Figure 4 : Facteurs affectant la consommation énergétique dans le bâtiment.....	29
Figure 5 : Facteurs impactant la forme urbaine et les consommations d'énergie résidentielles- Architecture du modèle.....	30
Figure 6 : Extrait de "Référentiel de densités et formes urbaines ».....	34
Figure 7 : Architecture du modèle de calcul des besoins énergétiques résidentiels	36
Figure 8 : Variations des besoins chauds et froids en fonction du U fenêtres.	41
Figure 9 : Variations des besoins chauds en fonction du taux de vitrage.	42
Figure 10 : Variations des apports solaires et des besoins froids en fonction du taux de vitrage.....	43
Figure 11 : Variations des besoins chauds et froids en fonction du taux de vitrage.	44
Figure 12 : Variations des besoins chauds et froids en fonction de la conductivité des parois.	45
Figure 13 : Variations de l'énergie solaire reçue en fonction de l'orientation.	46
Figure 14 : Rayonnement solaire annuel reçue en toiture et en façade par type – unité : kWh/m ² paroi.an.	47
Figure 15 : Energie solaire reçue en façade.	48
Figure 16 : Energie solaire reçue en toiture.	48
Figure 17 : Consommations de maisons individuelles.	51
Figure 18 : Corrélation entre température moyenne annuelle et température du sol.	52
Figure 19 : Consommations en fonction de la température du sol.....	53
Figure 20 : Besoins Chauds selon le type et la localisation	56
Figure 21 : Besoins Froids (kWh/m ² SHON .an) selon le type et la localisation..	56
Figure 22 : Illustration de la démarche générale.	60
Figure 23 : Impacts de la forme urbaine sur les déplacements - Organisation des variables.....	63
Figure 24 : Architecture du modèle au motif travail.....	64
Figure 25 : Schéma de l'architecture de détermination des flux au motif travail.....	65
Figure 26 : Carte des agglomérations sélectionnées pour déterminer l'effet des systèmes de transport sur les parts modales.....	67
Figure 27 : Impacts de la forme urbaine sur les déplacements - Organisation des variables.....	74
Figure 28 : Graphique de détermination des coefficients du modèle gravitaire	75
Figure 29 : Lien entre l'indicateur OTagglo et part modale des transports en commun	77
Figure 30 : Lien entre l'indicateur OTagglo et part modale des transports en commun au motif travail. Source Energie Demain.....	77
Figure 31 : Lien entre l'indicateur OTagglo et part modale des transports en commun avec l'IdF	78
Figure 32 : Lien entre l'indicateur OTagglo et part modale des transports en commun au motif travail avec l'IdF	78

Figure 33 : Régression entre part de tissu dense et part modale TC au motif travail par ville de résidence	80
Figure 34 : Régression entre part de tissu dense et part modale VP au motif travail par ville de résidence	80
Figure 35 : Régression entre part de tissu dense et part modale TC au motif travail par ville d'emploi	81
Figure 36 : Régression entre part de tissu dense et part modale VP au motif travail par ville d'emploi	81
Figure 37 : Structure du modèle de parc de logements	85
Figure 38 : Etat du parc de logements en 2006	89
Figure 39 : Hypothèses de températures à l'échelle du territoire.....	92
Figure 40 : Hypothèses de rayonnements solaires à l'échelle du territoire.....	93
Figure 41 : Apports internes interpolés de manière linéaire à partir des conventions RT et des DH.....	94
Figure 42 : Besoins théoriques de chauffage par type de logement et par période de construction	95
Figure 43 : Consommations primaires et finales unitaires et émissions de CO2 par m2 en 2000.....	96
Figure 44 : Besoins ECS par segment du parc en MWh/logement pour l'année 2006.....	97
Figure 45 : Consommations en énergie primaire et finale et émissions de CO2 induites par l'ECS	98
Figure 46 : Relations logistiques entre la population et la mobilité domicile-travail selon les données 2006 ...	100
Figure 47 : Ecart entre les km.vp observés en 1999 et 2006 et les km.vp simulés à partir de la relation logistique entre la population et les km.p	101
Figure 48 : Ecart entre les km.vp observés en 1999 et 2006 et les km.vp simulés à partir de la relation logistique entre la population et les flux vp auxquels est affectée la distance moyenne domicile-travail de 2006	102
Figure 49 : Évolution des portées domicile-travail des villes de plus de 50000 habitants entre 1999 et 2006.	104
Figure 50 : Structure du modèle COPERT.....	105
Figure 51: Consommations d'énergie et émissions de CO2 en fonction de la vitesse moyenne	106
Figure 52 : Émissions de CO2 unitaires en fonction de la distance au centre.....	106
Figure 53 : Émissions cumulées de CO2 en fonction de la distance au centre.	107
Figure 54 : Surémissions de CO2 induites par le démarrage à froid en fonction de la distance	107
Figure 55 : Part des surémissions dues au démarrage à froid.....	108
Figure 56 : Relation théorique entre éloignement au centre et consommations d'énergie et émissions de CO2	109
Figure 57 : Eloignement par rapport à Paris et consommations d'énergie de la voiture particulière.	110
Figure 58 : Base de données Corine Land Cover 2000 pour la région Ile de France.....	112
Figure 59 : Extrait du MOS.....	113
Figure 60 : Comparaison des informations du MOS (à gauche) et de CORINE (à droite) pour la ville de Paris	114
Figure 61 : Recoupement de MOS et de CLC pour Paris.....	115
Figure 62 : Distribution MOS	117
Figure 63 : Distribution CLC	118
Figure 64 : Répartition de la taille et du périmètre des zones dans CLC des zones dans le MOS	119
Figure 65 : Répartitions des zones dans le MOS et le CLC (logarithmique).....	120
Figure 66 : Répartition spatiale de l'erreur	124
Figure 67 : Type d'occupation du sol artificialisé en 2000 en milliers d'hectares.....	126
Figure 68 : Artificialisation du sol entre 2000 et 2006, à partir de CLC.....	127
Figure 69 : Artificialisation en hectares des surfaces agricoles entre 2000 et 2006	129
Figure 70 : Structure du modèle de l'occupation du sol	130
Figure 71 : Corrélations entre types de logements et types d'artificialisation du sol.....	131
Figure 72 : Architecture générale du modèle de prospective.....	134
Figure 73 : Évolutions démographique à l'horizon 2050	138
Figure 74 : Evolution des rendements globaux des systèmes de chauffage	139

Figure 75 : Consommations en énergie finale (en TWh/an) du chauffage et de l'ECS à l'horizon 2050 selon un scénario tendanciel.	140
Figure 76 : Structure du parc de logements par type, période de construction et système de chauffage à l'horizon 2050 selon un scénario tendanciel	141
Figure 77 : Consommations en énergie finale (en TWh/an) du chauffage et de l'ECS à l'horizon 2050 selon un scénario éloignement au lieu d'emploi (distance moyenne supérieure à 10 km).....	142
Figure 78 : Structure du parc de logements par type, période de construction et système de chauffage à l'horizon 2050 selon un scénario d'éloignement à l'emploi	143
Figure 79 : Consommations en énergie finale (en TWh/an) du chauffage et de l'ECS à l'horizon 2050 selon un scénario éloignement au lieu d'emploi (distance moyenne supérieure à 10 km).....	144
Figure 80 : Structure du parc de logements par type, période de construction et système de chauffage à l'horizon 2050 selon un scénario d'éloignement à l'emploi	144
Figure 81 : Evolution des consommations d'énergie finale du chauffage et de l'ECS à l'horizon 2050 en base 100 selon les trois scénarios	145
Figure 82 : Evolution du facteur de consommation d'énergie et d'émission de CO2 selon COPERT (jusqu'à 2020 et extrapolé à 2050).	146
Figure 83 : Hypothèses d'évolution de l'intensité CO2 du parc automobile à l'horizon 2050	147
Figure 84 : Consommations en énergie finale (en TWh/an) des déplacements domicile-travail en vp à l'horizon 2050 selon des scénarios éloignement au lieu d'emploi.....	148
Figure 85 : Émissions de CO2 en 2050 selon divers scénarios de localisation des ménages et de technologie du parc automobile.....	149
Figure 86 : Projection linéaire de l'étalement urbain à l'horizon 2050 selon les rythmes observés entre 2000 et 2006 et 1990 et 2006	150
Figure 87 : Évolutions de la surface artificialisée totale en millions d'ha à l'horizon 2050 selon les scénarios tendanciels, d'éloignement et de rapprochement à l'emploi	151
Figure 88 : Consommations en énergie finale du chauffage, de l'ECS et de la mobilité domicile-travail en vp à l'horizon 2050 selon les 3 scénarios	154
Figure 89 : Mitage et nombre de maisons individuelles et d'immeubles collectifs (en milliers) localisés dans des communes totalement non artificialisées	155
Figure 90 -TAS 3D Modeler. Modélisation 3D.....	175
Figure 91 - TAS Building Simulator. Paramétrage de la simulation	176
Figure 92 - Extrait du code VBA utilisé pour l'extraction des résultats. Source: Elioth.	176

3. TABLE DES MATIERES

I. Sommaire	7
II. Objectifs de la recherche et contexte scientifique	9
1. Rappel des objectifs de la recherche.....	9
1.1. Contexte et problématique.....	9
1.2. Objectifs de la recherche	11
1.3. Les étapes de la recherche	12
2. Etat de l'art : la forme urbaine et son corollaire énergétique	15
2.1. Objectifs de l'état de l'art et méthode bibliographique	15
2.2. De la densité à l'organisation fonctionnelle des territoires urbanisés	16
2.3. De la densité à la géométrie de la forme urbaine	24
2.4. Une architecture scientifique complexe imbriquée dans le débat opérationnel.....	31
III. Forme urbaine, bilan de chauffage et de climatisation	33
1. Méthodologie et objets d'étude	33
2. Hypothèses générales du calcul énergétique à l'échelle urbaine.....	35
2.1. Géométrie de la forme urbaine	36
2.2. Caractéristiques constructives des bâtiments	38
2.3. Scénarii d'occupation et apports internes.....	48
2.4. Hypothèses climatiques et températures du sol.....	50
3. Analyse des besoins chauds et froids par typologie.....	53
IV. Forme urbaine, transport et mobilité quotidienne des ménages	59
1. Architecture du modèle et objet d'étude	59
1.1. Le détail des déplacements	60
1.2. Architecture du modèle de simulation pour les déplacements domicile-travail	63
2. Hypothèse de calcul	65
2.1. Le module de détermination des flux pour les déplacements domicile-travail.....	65
2.2. Effet du système de transport en commun à l'échelle de l'agglomération.....	66
2.3. Effet du tissu urbain communal	70
2.4. Des distances à vol d'oiseaux aux distances « réelles ».....	72
2.5. Des distances parcourues au bilan énergétique.....	73
3. résultats du Secteur Transport	74
3.1. Le module de détermination des flux.....	74
3.2. Effet du système de transport en commun à l'échelle de l'agglomération.....	76
3.3. Effet du tissu urbain communal	80
V. Hypothèses, structure du modèle de prospective	83
1. La population et le parc de logement.....	83
2. Les consommations d'énergie et les émissions de CO ₂ du secteur de l'habitat.....	85
2.1. Le parc de logements par segments typologiques	85
2.2. La taille des ménages dans le parc par type de logement en 2000 et 2006	88
2.3. Les surfaces habitables	90
2.4. Les hypothèses climatiques et apports calorifiques gratuits.....	92
2.5. les besoins et les consommations de chauffage et d'ECS	94
3. Les consommations d'énergie et les émissions de CO ₂ induites par la mobilité domicile travail en vp 99	
3.1. Population à l'échelle communale, génération des flux vp domicile-travail et distance moyenne de déplacement.....	99

3.2.	Les consommations d'énergie et les émissions de CO2 dues à la mobilité domicile-travail en vp	104
4.	Occupation et artificialisation du sol	110
4.1.	Des tissus urbains à l'occupation du sol.....	110
4.2.	L'artificialisation du sol, la continuité et la discontinuité de l'urbanisation entre 2000 et 2006 ...	126
4.3.	Les relations entre formes d'artificialisation du sol et parc de logements.....	130
5.	Architecture générale du modèle de prospective	132
VI.	Prospective à l'horizon 2050	137
1.	Le parc de logement : bilan énergétique et émission de CO2.....	137
1.1.	Le scénario de référence : la poursuite des tendances lourdes démographiques	137
1.2.	L'évolution des performances énergétiques des logements neufs et des systèmes de chauffage	138
1.3.	Les consommations d'énergie de chauffage et d'ECS selon les scénarios de localisation des ménages.....	140
2.	La mobilité domicile-travail en vp : bilan énergétique et émissions de CO2.....	146
2.1.	Les scénarios d'évolution de la performance énergétique et émissive de CO2 du parc vp	146
2.2.	Les consommations d'énergie et les émissions de CO2 induites par la mobilité domicile-travail selon les scénarios de localisation des ménages	147
3.	Occupation du sol et artificialisation	149
3.1.	Les projections d'artificialisation du sol à l'horizon 2050 à partir d'une rétrospective 1990-2006	149
3.2.	L'artificialisation du sol selon les scénarios de localisation des ménages.....	150
4.	Conclusion	153
VII.	Bibliographie	157
1.	Généralités	157
2.	Transport, mobilité et émissions de CO2.....	158
3.	Bâtiment, morphologie urbaine, consommations d'énergie et émissions de CO2	160
VIII.	Tables	167
1.	Table des tableaux	167
2.	Table des figures	168
3.	Table des matières	171
IX.	Annexes	173
1.	Le calcul thermique dynamique réalisé à partir de TAS.....	175
1.1.	Simulations thermiques	175
1.2.	Collecte et synthèse des résultats	176
2.	Les variables du MOS	177

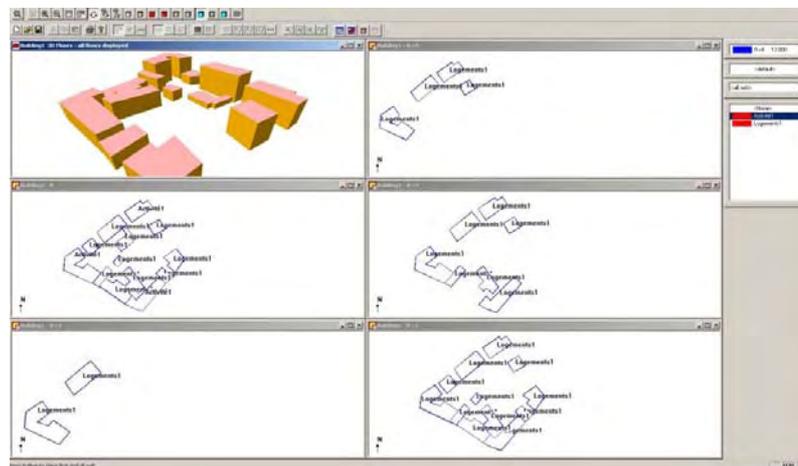
IX.ANNEXES

1. LE CALCUL THERMIQUE DYNAMIQUE REALISE A PARTIR DE TAS

1.1. SIMULATIONS THERMIQUES

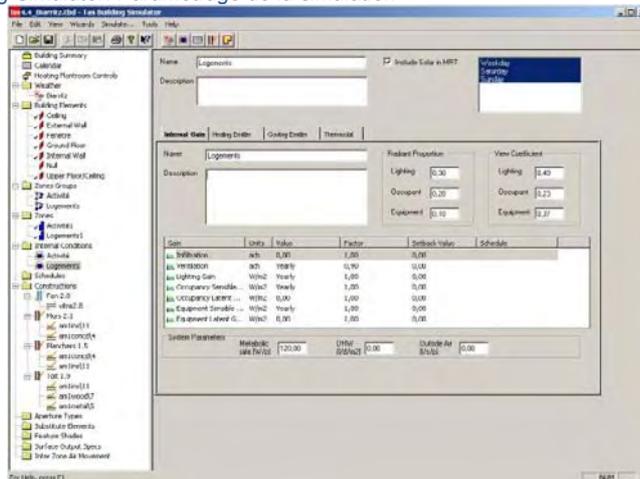
Une fois les typologies définies, les variables choisies, on évalue les besoins énergétiques de chaque typologie grâce au logiciel TAS (Thermal Analysis Software). Ce logiciel comprend 2 interfaces, l'une pour la définition de l'objet étudié et l'autre pour entrer les variables de calcul. La première interface, *3D Modeler*, permet de modéliser la volumétrie générale de l'ensemble bâti et d'évaluer la quantité et la fréquence des ombres portées des bâtiments les uns sur les autres.

Figure 90 -TAS 3D Modeler. Modélisation 3D



3D Modeler est alimenté par la deuxième interface, *Building simulator*. On y définit les paramètres de la simulation : conditions météorologiques sur site, les matériaux constructifs, conditions internes (thermostats, apports internes) et plannings d'occupation associés.

Figure 91 - TAS Building Simulator. Paramétrage de la simulation

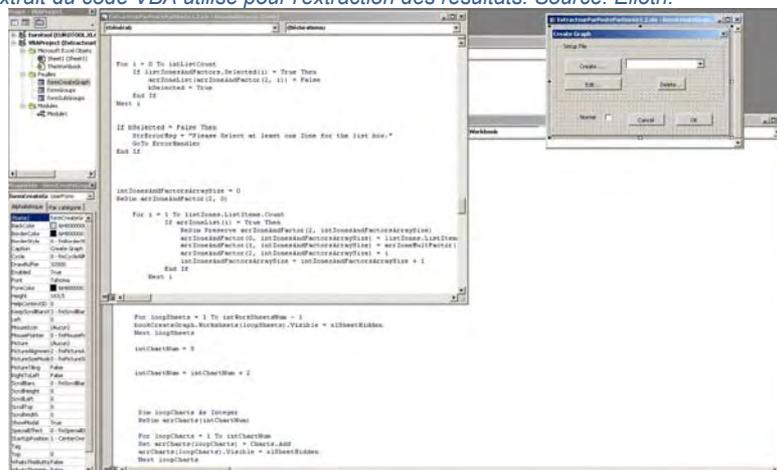


1.2. COLLECTE ET SYNTHÈSE DES RESULTATS

Les résultats obtenus à partir des simulations thermiques sont dans un format (.tsd) propre au logiciel TAS.

Result viewer est une troisième interface de TAS qui permet de visualiser les résultats mais il n'est pas adapté à l'exploitation de fichiers résultats produits. On a donc développé une application en Visual Basic³⁵ qui extrait de façon automatique toutes les informations contenues dans les fichiers de résultats et permet d'en déduire les informations qui nous sont utiles. A l'origine le logiciel TAS n'est pas prévu pour évaluer le rayonnement solaire incident, mais on peut tout de même obtenir ces données en modifiant les caractéristiques de matériaux de l'enveloppe des bâtiments. Une deuxième application a ensuite été développée pour permettre de rendre exploitable les informations sur le rayonnement solaire.

Figure 92 - Extrait du code VBA utilisé pour l'extraction des résultats. Source: Elioth.



35 Le visual basic est un langage de programmation

2. LES VARIABLES DU MOS

[³⁶]

³⁶ Cette annexe a été rédigée par H. Lerolles

1. Variables et données prises en compte dans la recherche

La méthodologie générale consiste à identifier et rassembler les variables pertinentes sur les caractéristiques des tissus urbains résidentiels (à dominante d'habitat), d'établir des bilans énergétiques de ces tissus selon leur morphologie (chapitre 3), et de les corrélérer avec la mobilité domicile-travail des ménages résidents (chapitre 4). Par ailleurs, les caractéristiques des ménages et du parc de logements sont fournies par l'INSEE pour toutes les communes de France, au niveau de l'îlot IRIS (découpage agrégé au niveau communal). Le principe de base a donc été de constituer des bases de données à l'IRIS rassemblant ces variables.

Dans un premier temps, la constitution de ces bases de données et l'étalonnage des modèles ont été entrepris sur le cas francilien, vu la variété des tissus urbains rencontrés et la richesse des données disponibles à l'IAU-ÎdF (voir 2.1). Les conditions d'extension au reste du territoire national ont été vérifiées (voir 2.2).

1.1. Variables du MOS : les espaces à dominante d'habitat des tissus urbains d'Île-de-France

L'occupation du sol de l'Île-de-France est décrite par le Mode d'Occupation du Sol de l'IAU-ÎdF .

Source : Base de connaissance sur le MOS <http://www.iaurif.org/basemos>

Extraits

Le MOS est un atlas cartographique informatisé qui décrit l'occupation du sol de l'Île-de-France avec une précision au 1/5000, selon une nomenclature en 83 postes, à partir d'une couverture photographique aérienne complète. Comme la précédente (1999), la mise à jour 2003 a été réalisée directement à l'écran, à partir d'une orthophotographie numérique régionale en couleur de résolution 1 mètre, acquise auprès de l'IGN. Cette technique efficace permet un travail plus précis et plus fiable que la méthode antérieure (photo-interprétation sur calques, à partir de clichés papier), tant pour la photo-interprétation visuelle que pour la saisie des modifications géométriques.

Le premier inventaire MOS complet a été réalisé en 1982, selon une nomenclature en 130 postes. Depuis il a connu 5 mises à jour (1987, 1990, 1994, 1999, 2003), et une sixième est en cours. Pour garantir l'observation des évolutions multidates, la cohérence géométrique et thématique de ces inventaires a été conservée malgré les changements méthodologiques intervenus.

Cet inventaire détaille les **tissus urbains à dominante d'habitat** selon huit postes (n° 30 à 37) correspondant à des morphologies d'habitat caractéristiques, dans la mesure où elles peuvent être repérées par photo-interprétation :

	30	Habitat individuel	Lotissements et constructions individuelles.
	31	Ensembles d'habitat individuel identique	Ensemble de maisons le plus souvent identiques et disposées régulièrement.
	32	Habitat rural	Groupement de bâtiments de forme rurale.
	33	Habitat continu bas.	Zones surtout linéaires, en bordure de voirie dans les faubourgs et les centres anciens (les villes nouvelles en font part).
	34	Habitat collectif continu haut	Centres urbains.
	35	Habitat collectif discontinu	Ensembles d'habitats relativement récents.
	36	Prisons	Centres pénitentiaires.
	37	Habitat autre	Il s'agit essentiellement des hôtels, auberges de jeunesse, centres d'accueil, centre de vacances et de loisirs, foyer de travailleurs et d'étudiants, couvents, séminaires, maisons de retraite, habitat précaire ou mobile.

Description et commentaires : voir extraits Base MOS ci-après

Cette nomenclature de postes « habitat » peut être mise en relation avec les données INSEE sur les types de logement : individuel, collectif, « hébergement collectif ».

Pour alimenter cette recherche, l'IAU-îdF a fourni :

- la couverture régionale IRIS 1999 (INSEE)
- pour chaque îlot IRIS, les données MOS 1999 et 2003, pour les tissus urbains à dominante d'habitat : références des postes concernés et surfaces - en valeur absolue, et en pourcentage de la surface de l'îlot IRIS.

Poste n°30

Habitat individuel

Commentaires pour cet exemple

Ortho :

Coordonnées : 615 650 - 123 900
Communes : Champigny sur Marne
(94)

Image :

Photographe : Philippe GUIGNARD
Organisme auteur : La Documentation
Française, IAURIF, CRIF
Légende : Habitat pavillonnaire à
Villebon (91)

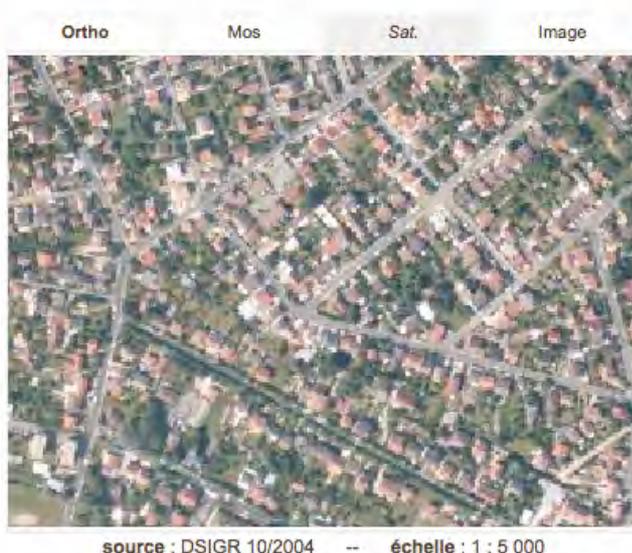
Description

Lotissements et constructions individuelles. Si la parcelle a plus de 1000 m², on ne prend en compte que les bâtiments avec en plus une bande de 10 m rattachée si possible à la voirie.

Remarques

Mutation / Evolution

Les mutations entre type d'habitat sont à vérifier systématiquement.



Poste n°31

Ensembles d'habitat individuel identique

Commentaires pour cet exemple

Ortho :

Coordonnées : 578 100 - 117 700
Communes : Voisins-le-Bretonneux
(78)

Image :

Photographe : Philippe GUIGNARD
Organisme auteur : La Documentation
Française, IAURIF, CRIF
Légende : Maisons à Nozay (91)

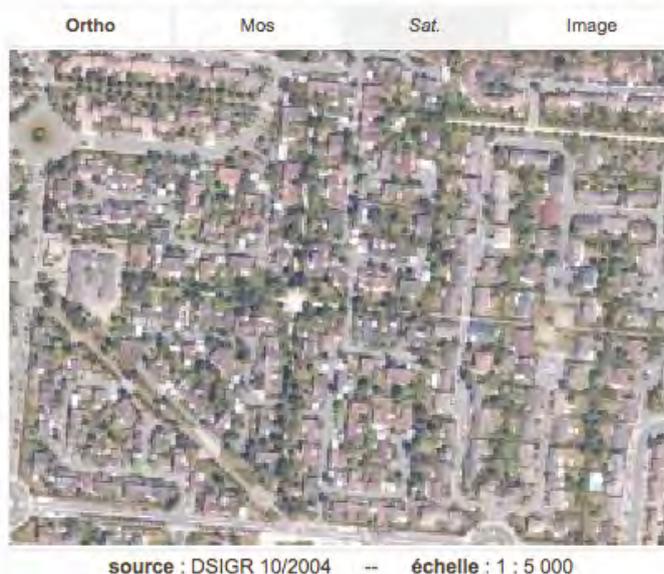
Description

Ensemble d'habitations réalisé par un même promoteur, maisons le plus souvent identiques et disposées régulièrement.

Remarques

Mutation / Evolution

Les mutations entre type d'habitat sont à vérifier systématiquement.



Poste n°32

Habitat rural

Commentaires pour cet exemple

Ortho :

Coordonnées : 654 750 - 110 000

Communes : Vaudoy-en-Brie (77)

Image :

Photographes : Jean-Marie GOBRY et Daniel GUIHO

Organisme auteur : DREIF, IAURIF

Légende : La-Croix-en-Brie (77)

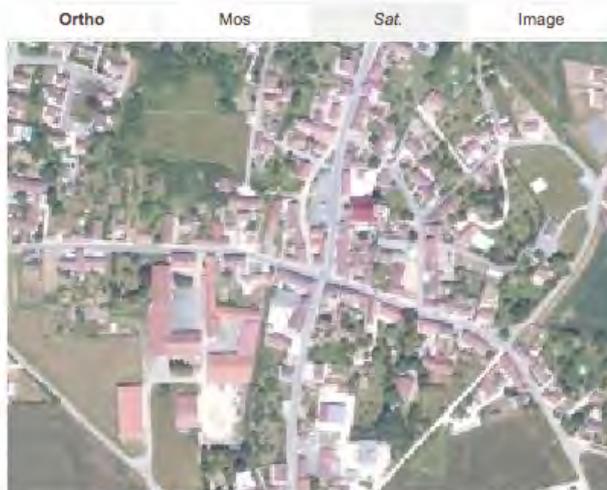
Description

Il s'agit de groupements de bâtiments espacés de moins de 100 m majoritairement de forme rurale de 1 à 2 niveaux, exceptionnellement 3, édifiés en continuité les uns des autres, formant un noyau bâti, comportant dans sa partie centrale un point de convergence ou un point particulier (monument, église) incluant des bâtiments de ferme, comportant une structure de voirie dont la faible largeur et le tracé témoignent d'une voirie d'origine villageoise.

Remarques

Mutation / Evolution

Faible évolution (des apparitions sont toujours possibles mais très modérées : elles vont concerner essentiellement la construction de hangars agricoles).



source : DSIGR 10/2004 -- échelle : 1 : 5 000

Poste n°33

Habitat continu bas.

Commentaires pour cet exemple

Ortho :

Coordonnées : 639 700 - 140 000

Communes : Meaux (77)

Image :

Photographe : Sylvie BARCELO

Organisme auteur : IAURIF

Légende : La Marne à Meaux, Berge herbeuse et maisons

Description

de R+1 à R+3. Les zones concernées sont surtout linéaires, en bordure de voirie dans les faubourgs et les centres anciens, dans les nouveaux quartiers "maisons de ville", les Villes nouvelles, les châteaux (sauf ceux ouverts au public).

Remarques

Mutation / Evolution

Les mutations entre type d'habitat sont à vérifier systématiquement.



source : DSIGR 10/2004 -- échelle : 1 : 5 000

Poste n°34

Habitat collectif continu haut

Commentaires pour cet exemple

Ortho :

Coordonnées : 601 200 - 130 300

Communes : Paris 10ème
arrondissement (75)

Image :

Photographe : Bernard GEGAUFF

Organisme auteur : IAURIF

Légende : Immeubles haussmanniens,
rue Sarrette à Paris (14e)

Description

de R+4 à R+7. Il s'agit de centres
urbains (immeubles haussmanniens ou
ceux en brique de l'immédiat après-
guerre).

Remarques

S'il y a des jardins dans ces zones, ils
sont traités en espaces verts.

Mutation / Evolution

Les mutations entre type d'habitat sont
à vérifier systématiquement.

Ortho Mos Sat. Image



source : DSIGR 10/2004 -- échelle : 1 : 5 000

Poste n°35

Habitat collectif discontinu

Commentaires pour cet exemple

Ortho :

Coordonnées : 602 700 - 142 000

Communes : Sarcelles (95)

Image :

Photographe : C. LE TOQUIN

Organisme auteur : IAURIF

Légende : Les Lochères - vue prise du
haut d'un immeuble

Description

de R+4 à R+12 et plus. Ensembles
relativement récents. Toute la zone
concernée par l'emprise de ce type
d'habitat est cernée. Sont indiqués à
l'intérieur, les parkings, les espaces
verts, commerces, aires de jeux faisant
partie intégrante de l'ensemble et
repérés en tant que tels.

Remarques

Mutation / Evolution

Les mutations entre type d'habitat sont
à vérifier systématiquement.

Ortho Mos Sat. Image



source : DSIGR 10/2004 -- échelle : 1 : 5 000

Poste n°36

Prisons

Commentaires pour cet exemple

Ortho :

Coordonnées : 602 850 - 104 170

Communes : Fleury-Merogis (91)

Image :

Photographe : Daniel GUIHO

Organisme auteur : DREIF

Légende : Vue aérienne de la prison de Fleury-Merogis

Description

Centres pénitentiaires.

Remarques

Mutation / Evolution

Ce poste n'évolue quasiment pas.



Poste n°37

Habitat autre

Commentaires pour cet exemple

Ortho :

Coordonnées : 615 000 - 114 700

Communes : Boissy-Saint-Léger, Marolles-en-Brie (94)

Image :

Photographe : Laurence REYNAERT

Organisme auteur : IAURIF

Légende : Habitat précaire à Gournay-sur-Marne en Seine-St-Denis (93)

Description

Il s'agit essentiellement des hôtels (hors zone d'activité), les auberges de jeunesse (orphelinat), centres d'accueil, centre de vacances et de loisirs, foyer de travailleurs et d'étudiants, couvents, séminaires, maisons de retraite, habitat précaire ou mobile (caravanes ou mobil-homes isolés).

Remarques

Les parcelles codées 37 le sont en général par connaissance du terrain ou à partir d'informations complémentaires collectées par ailleurs.

Mutation / Evolution

Les mutations entre type d'habitat sont à vérifier systématiquement.

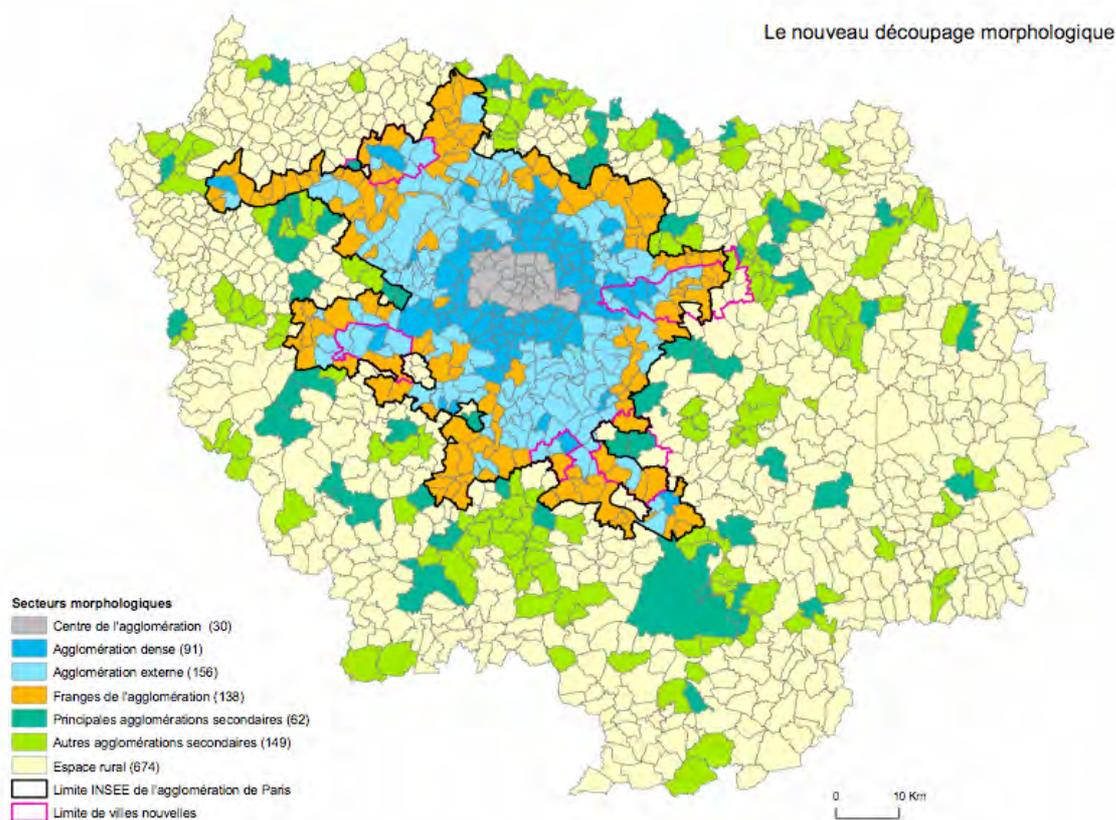


1.2. Corrélation avec l'inventaire CLC et extension aux agglomérations France entière

L'inventaire « CLC » (Corine Land Cover) décrit l'occupation du sol du territoire national en 1990 et 2000. Deux de ses postes (« tissu urbain continu » et « tissu urbain discontinu ») correspondent pour l'essentiel aux postes du MOS décrivant les tissus d'habitat franciliens. Ils peuvent donc servir de base à une extension au niveau national des résultats franciliens.

Pour 1999, l'IAU-îdF a en outre mis au point un « découpage morphologique » cohérent avec les définitions INSEE :

- centre de l'agglomération
- agglomération dense
- agglomération externe
- franges de l'agglomération
- principales agglomérations secondaires
- autres agglomérations secondaires
- espace rural



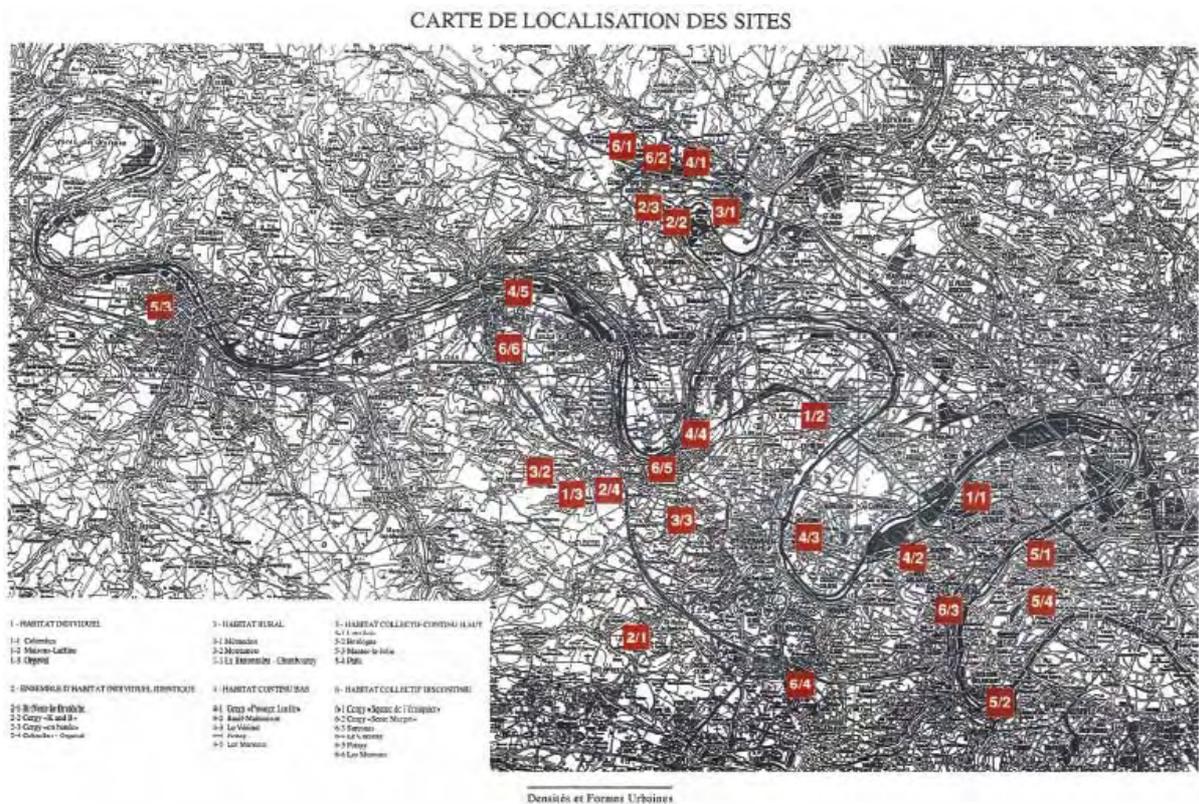
Ce découpage permet de classer les communes de la région selon leurs caractéristiques en termes de densités de population et d'emploi et d'occupation du sol. Il peut être transposé hors Ile-de-France pour affiner la caractérisation des communes en fonction de leur place dans les dynamiques d'agglomérations.

2.3 La morphologie des tissus urbains franciliens à dominante d'habitat

Afin de clarifier les liens entre formes urbaines et densités après la révision du SDRIF en 1994, l'IAU-idF a élaboré en 1995 un « référentiel de densité et de formes urbaines » qui décrit finement, à l'îlot, la morphologie d'un échantillon de tissus résidentiels franciliens caractéristiques.

Source : *Référentiel de densités et de formes urbaines (IAURIF, Elisabeth Bordes-Pagès, 1995)*

Cet échantillon a été constitué sur un « cadrant » large - de Paris ouest à Mantes - , dans lequel les sites étudiés ont été sélectionnés selon l'importance et la variété des tissus résidentiels rencontrés.



Ce référentiel a été construit en cohérence avec les critères du MOS concernant ces tissus.

Extraits (p. 11, 12 et 15)

Le MOS donne un premier aperçu des grandes typologies d'habitat. Les postes habitat du MOS font référence à la fois à des formes d'habitat individuel et/ou collectif, à des hauteurs du bâti (« continu bas », « discontinu haut »), et indirectement à des périodes de production différentes du cadre bâti (...). Dans cette étude, vingt cinq échantillons ont été sélectionnés. Trois à six exemples (par catégorie d'habitat MOS) ont été retenus selon leur importance dans le secteur d'étude (...). Sur la base du MOS, des périmètres **homogènes** - composés d'îlots réservés à l'habitat et présentant une **même typologie bâtie** - ont été choisis. La taille des périmètres peut y varier (...) suivant la nature des opérations et les typologies bâties étudiées (moyenne entre 1 et 2 hectares).

L'échelle retenue ici correspond à l'îlot, constitué d'un ensemble de parcelles dans les tissus anciens, ou encore au périmètre d'un ou plusieurs lots cédés dans une opération d'habitat (en ville nouvelle par exemple). Ces « îlots » privés sont généralement encadrés par le réseau des voies publiques (...). La sélection des îlots d'habitat à partir du MOS permet d'assurer une bonne **homogénéité** quant à leur composition. Ce sont des îlots composés par du bâti à dominante logement. La présence de locaux d'activités, de commerces (en particulier au rez-de-chaussée, dans les îlots de centre-ville) ou encore de certains petits équipements insérés dans le tissu ne peut toutefois être complètement exclue.

Pour appréhender la forme bâtie, trois indicateurs ont (...) été associés : la **densité nette**, le **coefficient d'emprise au sol** et la **hauteur** moyenne du bâti.

La surface totale de planchers

Les m² bâtis ont été évalués en multipliant l'emprise au sol du bâti par le nombre de niveaux d'habitation. Cette surface peut intégrer les m² réservés à d'autres usages que l'habitat (commerces, petits équipements, annexes, parkings couverts). La surface des emprises réservées à d'autres usages que le logement est précisée dans les fiches de présentation, en particulier pour les équipements (lorsqu'ils sont individualisés sur leurs parcelles).

Le coefficient d'emprise du bâti

Le coefficient d'emprise du bâti, sur chaque îlot, correspond à la surface totale de terrain qui supporte les bâtiments. C'est à dire à la projection des surfaces bâties au sol de l'îlot.

Densité nette « visuelle », hors sol

La densité nette visuelle prend en compte toutes les masses bâties, hors sol (annexes de logements, parkings construits...). Les parkings construits en sous-sols ont été exclus. Le choix d'îlots à dominante résidentielle permet de limiter l'incidence de la « mixité d'usage » sur le calcul de la densité « nette » de formes bâties liées à l'habitat.

$$\text{Densité nette} = \text{m}^2 \text{ de plancher bâtis} / \text{surface de l'îlot}$$

Hauteur moyenne pondérée

Les hauteurs des bâtiments sont précisées dans les planches graphiques. Par contre la hauteur « moyenne pondérée » inscrite dans le tableau a été calculée en divisant la densité par le coefficient d'emprise au sol. Ce rapport s'obtient également en divisant la surface bâtie totale par l'emprise au sol totale.

$$\text{Hauteur moyenne pondérée} = \text{densité nette} / \text{CES}$$

Chacun des sites étudié est décrit par ces indicateurs et par une série de schémas, ainsi que par des commentaires, cartes et photos qui le situent dans son contexte urbain.

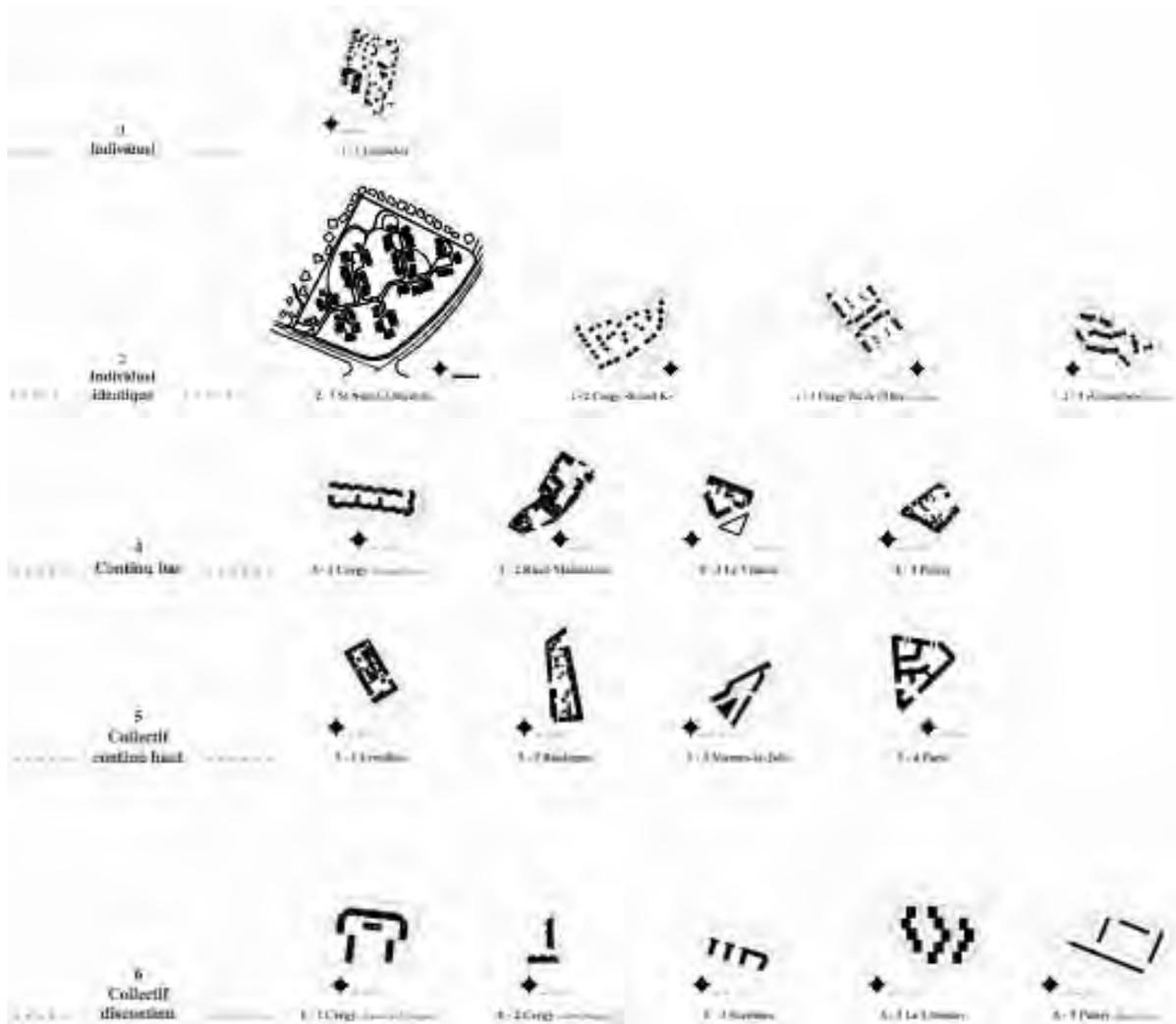
Voir extraits ci-après sur les sites sélectionnés pour cette recherche

Ce référentiel a été repris en 2006 dans un ouvrage rassemblant une série d'exemples représentatifs des différents tissus d'habitat des agglomérations françaises (Habitat – Formes urbaines, FNAU).

Il a été utilisé dans cette recherche (pour 18 de ses 25 types) pour construire la typologie des tissus urbains à dominante d'habitat mise au point pour modéliser leur bilan énergétique et de climatisation (voir ci-dessous 3).

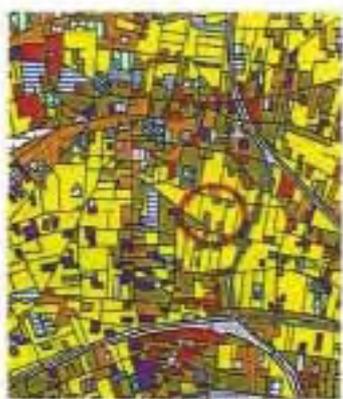
Les exemples retenus ont été les suivants :

Type	Poste MOS	Commune	Localisation
1.1	Habitat individuel	Colombes	
2.1	Habitat individuel identique	Saint-Nom-la-Bretèche	
2.2	Habitat individuel identique	Cergy (ville nouvelle)	Lotissement K and B
2.3	Habitat individuel identique	Cergy (ville nouvelle)	Bd de l'Oise
2.4	Habitat individuel identique	Orgeval	Colombet
4.1	Habitat continu bas	Cergy (ville nouvelle)	Passage Lucile
4.2	Habitat continu bas	Rueil-Malmaison	
4.3	Habitat continu bas	Le Vésinet	
4.4	Habitat continu bas	Poissy	
5.1	Habitat collectif continu haut	Levallois	
5.2	Habitat collectif continu haut	Boulogne-Billancourt	
5.3	Habitat collectif continu haut	Mantes-la-Jolie	
5.4	Habitat collectif continu haut	Paris 17°	Porte de Champerret
6.1	Habitat collectif discontinu	Cergy (ville nouvelle)	Square de l'Echiquier
6.2	Habitat collectif discontinu	Cergy (ville nouvelle)	Sente Margot
6.3	Habitat collectif discontinu	Suresnes	Cité-jardin
6.4	Habitat collectif discontinu	Le Chesnay	
6.5	Habitat collectif discontinu	Poissy	Beauregard



Typologie 1 : habitat individuel – 1 / 1 Colombes

Densité nette	0,57
C.E.S.	0,27
Hauteur moyenne pondérée	2
Surface îlot	16 984 m ²
m ² de planchers	9 683 m ²



Densités et Formes Urbaines



Typologie 2 : habitat individuel identique – 2 / 1 Saint-Nom-la-Bretèche

Densité nette	0,28
C.E.S.	0,11
Hauteur moyenne pondérée	2,5
Surface îlot	71 476 m ²
m ² de planchers	19 869 m ²

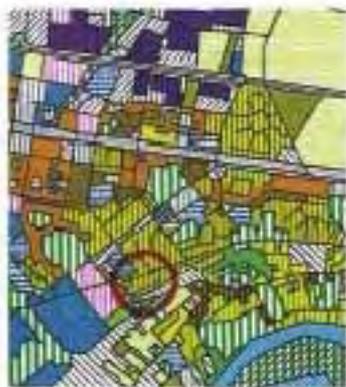


Densités et Formes Urbaines

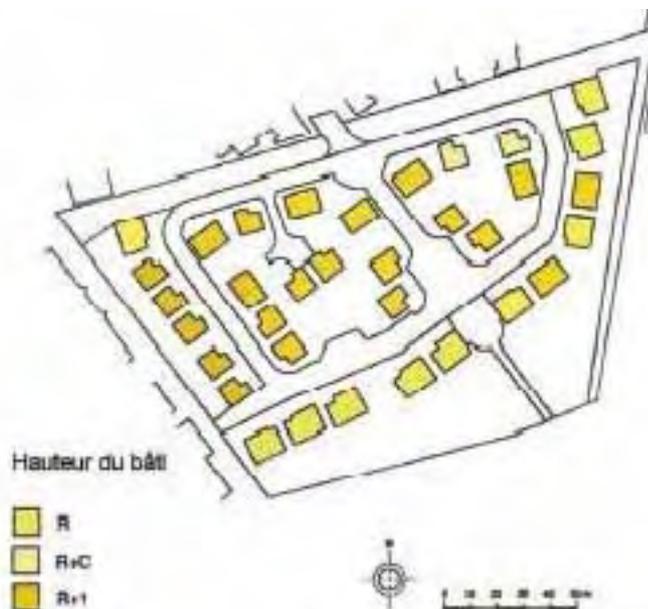


Typologie 2 : habitat individuel identique – 2 / 2 Cergy (ville nouvelle)

Densité nette	0,27
C.E.S.	0,17
Hauteur moyenne pondérée	1,6
Surface îlot	20 504 m ²
m ² de planchers	5 694 m ²

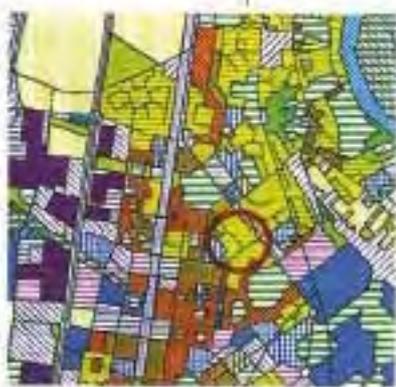


Densités et Formes Urbaines

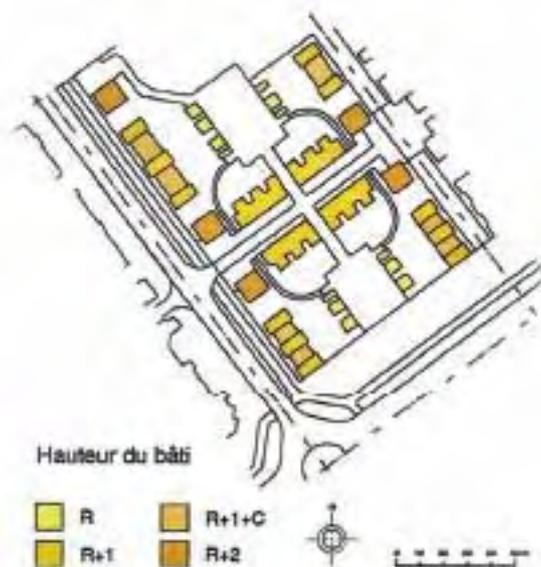


Typologie 2 : habitat individuel identique – 2 / 3 Cergy (ville nouvelle)

Densité nette	0,53
C.E.S.	0,24
Hauteur moyenne pondérée	2,2
Surface îlot	12 005 m ²
m ² de planchers	6 383 m ²



Densités et Formes Urbaines



Typologie 2 : habitat individuel identique – 2 / 4 Colombet (commune d'Orgeval)

Densité nette	0,48
C.E.S.	0,26
Hauteur moyenne pondérée	1,8
Surface îlot	13 025 m ²
m ² de planchers	6 228 m ²



extrait de M.O.S.

Densités et Formes Urbaines



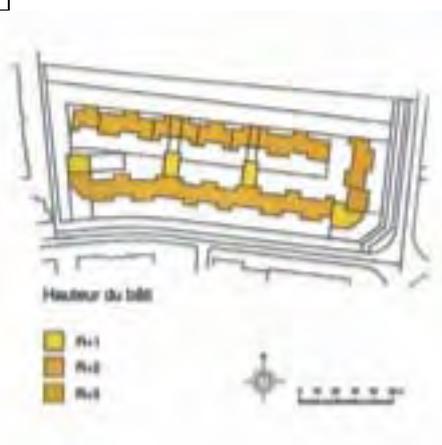
Typologie 4 : habitat continu bas – 4 / 1 Cergy (ville nouvelle)

Densité nette	0,88
C.E.S.	0,27
Hauteur moyenne pondérée	3,25
Surface îlot	13 883 m ²
m ² de planchers	12 187 m ²



extrait de M.O.S.

Densités et Formes Urbaines



Typologie 4 : habitat continu bas – 4 / 2 Rueil-Malmaison

Densité nette	1,82
C.E.S.	0,54
Hauteur moyenne pondérée	3,3
Surface îlot	10 803 m ²
m ² de planchers	19 651 m ²



carte de M.D.S.

Densités et Formes Urbaines

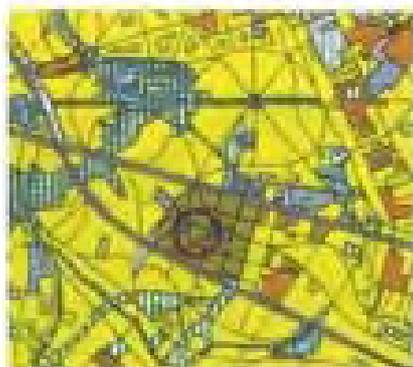


Hauteur du bâti



Typologie 4 : habitat continu bas – 4 / 3 Le Vésinet

Densité nette	1,75
C.E.S.	0,56
Hauteur moyenne pondérée	3,1
Surface îlot	5 096 m ²
m ² de planchers	8 948 m ²



carte de M.D.S.

Densités et Formes Urbaines

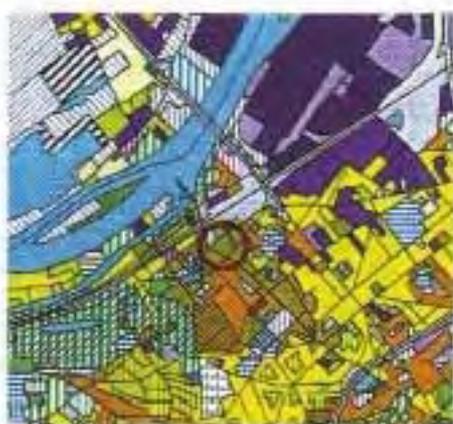


Hauteur du bâti



Typologie 4 : habitat continu bas – 4 / 4 Poissy

Densité nette	1,45
C.E.S.	0,48
Hauteur moyenne pondérée	3
Surface îlot	5 511 m ²
m ² de planchers	8 030,5 m ²



extrait du M.O.S.

Densités et Formes Urbaines



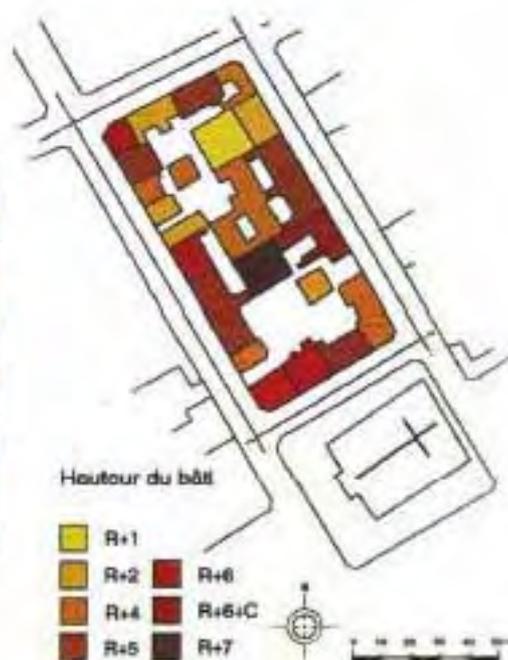
Typologie 5 : habitat collectif continu haut – 5 / 1 Levallois

Densité nette	3,7
C.E.S.	0,68
Hauteur moyenne pondérée	5,4
Surface îlot	5 895 m ²
m ² de planchers	21 861 m ²



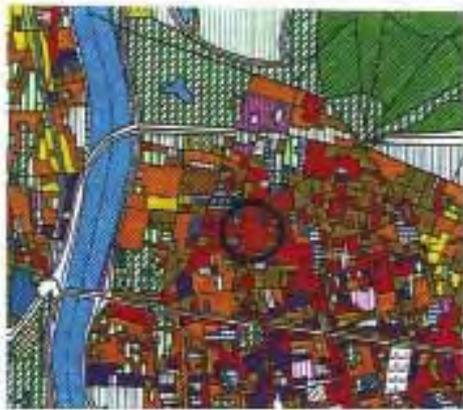
extrait du M.O.S.

Densités et Formes Urbaines

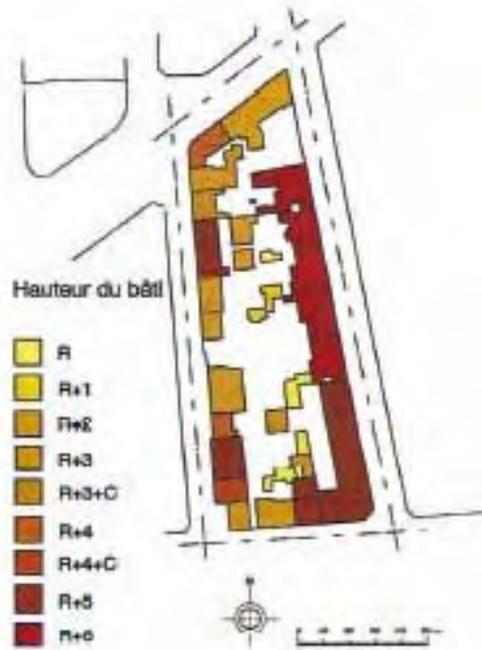


Typologie 5 : habitat collectif continu haut – 5 / 2 Boulogne-Billancourt

Densité nette	2,8
C.E.S.	0,56
Hauteur moyenne pondérée	5
Surface îlot	8 301 m ²
m ² de planchers	23 947,5 m ²

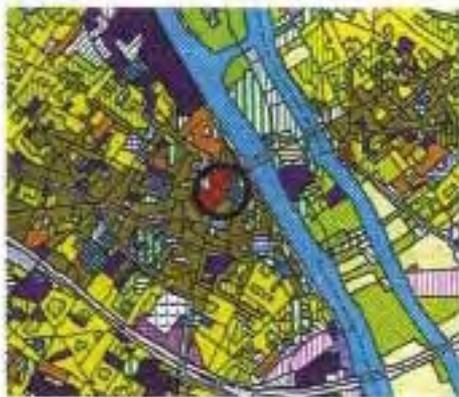


Densités et Formes Urbaines

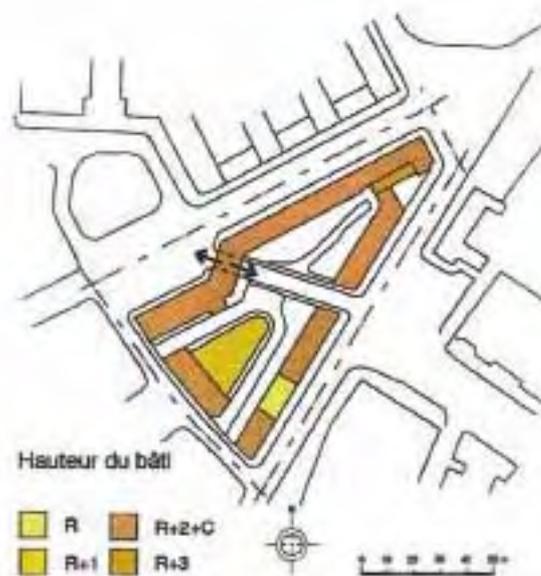


Typologie 5 : habitat collectif continu haut – 5 / 3 Mantes-la-Jolie

Densité nette	1,85
C.E.S.	0,57
Hauteur moyenne pondérée	3,6
Surface îlot	4 995 m ²
m ² de planchers	9 232,5 m ²

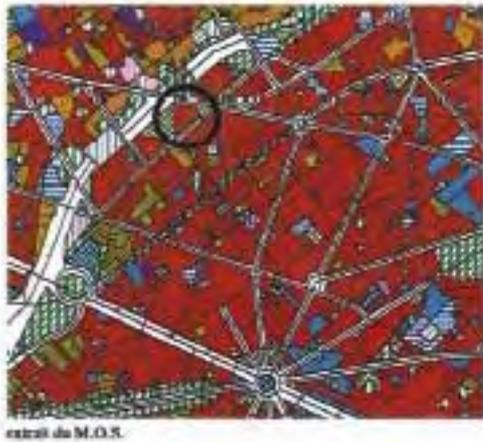


Densités et Formes Urbaines

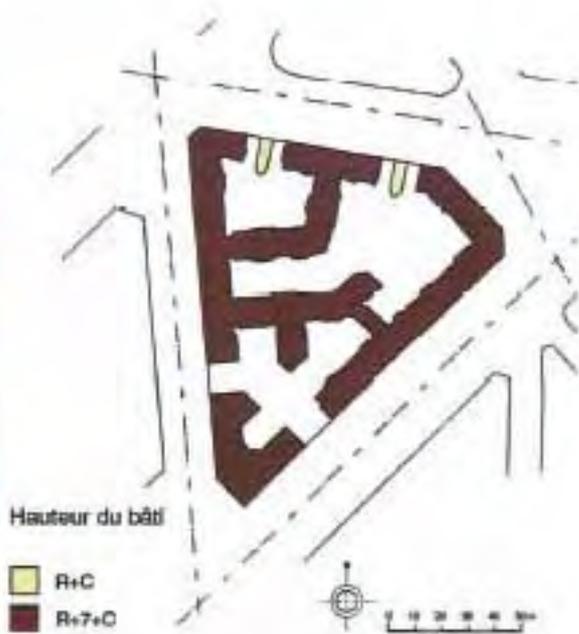


Typologie 5 : habitat collectif continu haut – 5 / 4 Paris 17° (Porte de Champerret)

Densité nette	4,3
C.E.S.	0,52
Hauteur moyenne pondérée	8,2
Surface îlot	10 117 m ²
m ² de planchers	43 867 m ²

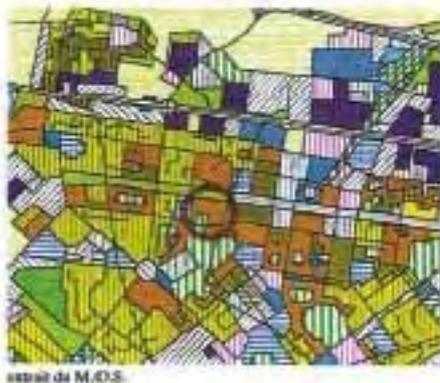


Densités et Formes Urbaines

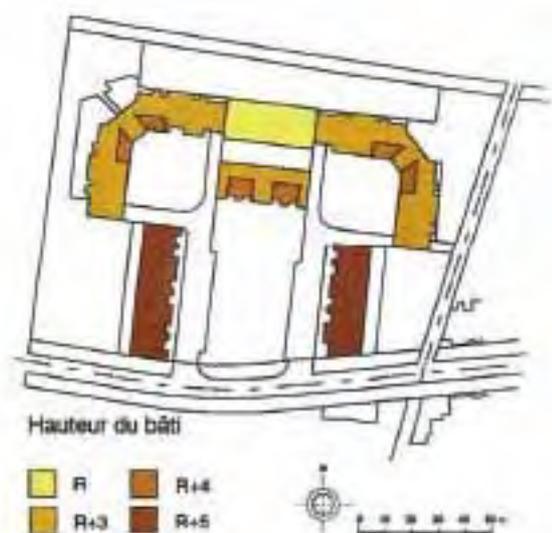


Typologie 6 : habitat collectif discontinu – 6 / 1 Cergy (ville nouvelle)

Densité nette	0,99
C.E.S.	0,23
Hauteur moyenne pondérée	4,3
Surface îlot	18 461 m ²
m ² de planchers	18 351 m ²



Densités et Formes Urbaines



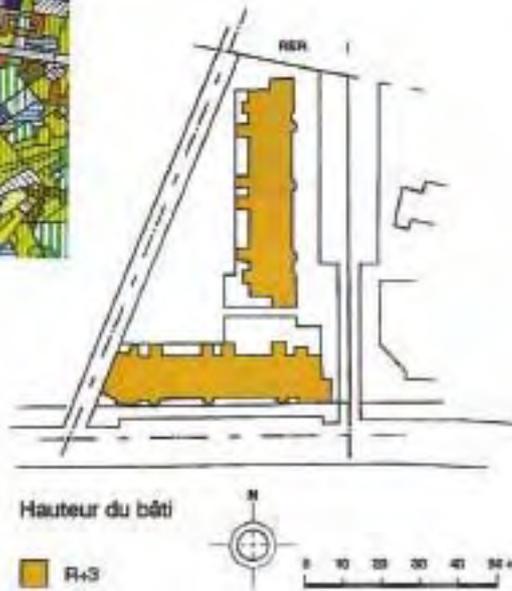
Typologie 6 : habitat collectif discontinu – 6 / 2 Cergy (ville nouvelle)

Densité nette	1,35
C.E.S.	1,33
Hauteur moyenne pondérée	4
Surface îlot	4 275 m ²
m ² de planchers	5 764 m ²



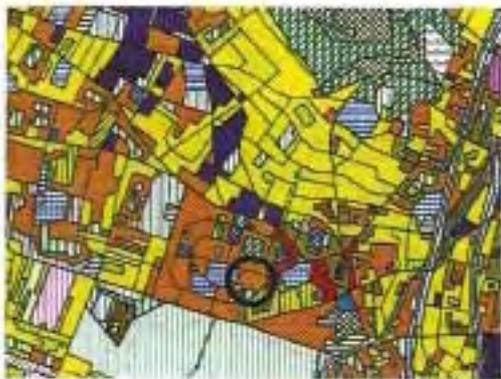
extrait du M.O.S.

Densités et Formes Urbaines



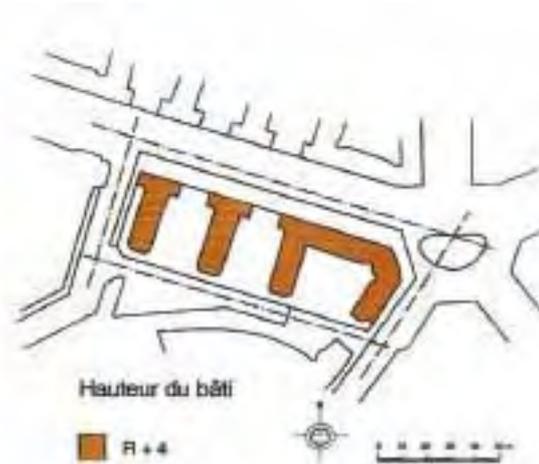
Typologie 6 : habitat collectif discontinu – 6 / 3 Suresnes (cité-jardin)

Densité nette	2,06
C.E.S.	0,41
Hauteur moyenne pondérée	4,8
Surface îlot	3 952 m ²
m ² de planchers	8 130 m ²



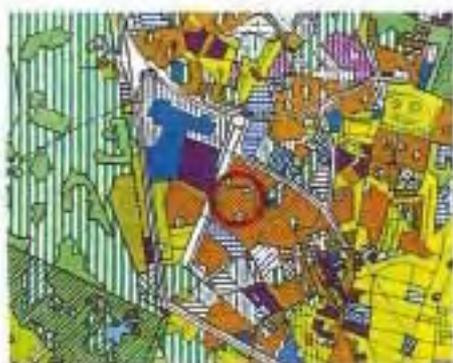
extrait du M.O.S.

Densités et Formes Urbaines



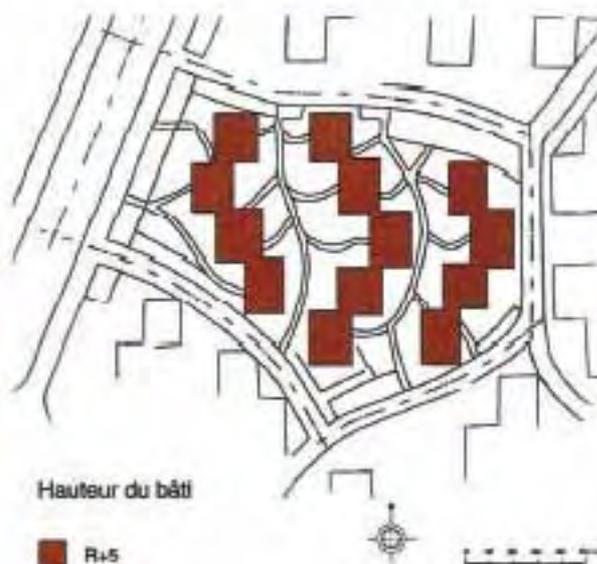
Typologie 6 : habitat collectif discontinu – 6 / 4 Le Chesnay

Densité nette	1,71
C.E.S.	0,28
Hauteur moyenne pondérée	6
Surface îlot	15 791 m ²
m ² de planchers	27 090 m ²



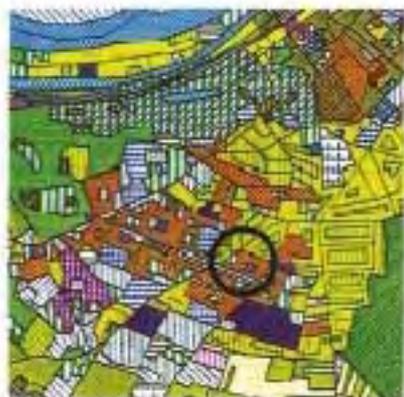
extraît du M.O.S.

Densités et Formes Urbaines



Typologie 6 : habitat collectif discontinu – 6 / 5 Beauregard (commune de Poissy)

Densité nette	0,70
C.E.S.	0,14
Hauteur moyenne pondérée	5
Surface îlot	16 604 m ²
m ² de planchers	11 705 m ²



extraît du M.O.S.

Densités et Formes Urbaines

