



HAL
open science

L'impact des formes urbaines dans la mise en place des politiques de transition énergétique : une approche par la modélisation

Maud Haffner

► To cite this version:

Maud Haffner. L'impact des formes urbaines dans la mise en place des politiques de transition énergétique : une approche par la modélisation. Architecture, aménagement de l'espace. École des Ponts ParisTech, 2022. Français. NNT : 2022ENPC0011 . tel-03676292

HAL Id: tel-03676292

<https://pastel.hal.science/tel-03676292>

Submitted on 23 May 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

L'impact des formes urbaines dans la mise en place des politiques de transition énergétique : une approche par la modélisation

École doctorale N° 528, « Ville Transports et Territoires » (VTT)

Discipline : Aménagement de l'espace, Urbanisme

Thèse préparée au Laboratoire Ville Mobilité Transport (LVMT)

Thèse soutenue le 1^{er} avril 2022, par

Maud HAFFNER

Composition du jury :

Cristina PRONELLO, Professeure, École polytechnique de Turin
Rapporteuse

Giovanni FUSCO, Directeur de Recherche CNRS, Université Côte d'Azur
Rapporteur

Cécile TANNIER, Directrice de Recherche CNRS, Université de Franche-Comté
Examinatrice, Présidente du jury

Morgane COLOMBERT, Chef de projet recherche et développement, Efficacity
Examinatrice

Alain L'HOSTIS, Directeur de recherche, Université Gustave Eiffel
Directeur de thèse

Pierre FRANKHAUSER, Professeur émérite, Université de Franche-Comté
Co-directeur de thèse

Olivier BONIN, Chercheur HDR, Université Gustave Eiffel
Co-encadrant de thèse

Avant-propos

Cette thèse a été financée par l'ENPC et par l'Institut pour la Transition Énergétique Efficacy. Le travail de recherche s'est inscrit dans le cadre du projet Sobriété énergétique par les formes urbaines et le transport (SOFT) financé par l'ADEME et porté par le laboratoire Ville, Mobilité, Transport (LVMT) et par le laboratoire Théoriser et Modéliser pour Aménager (ThéMA).

Remerciements

Je souhaite tout d'abord remercier mes trois encadrants : Alain L'Hostis, Pierre Frankhauser et Olivier Bonin, pour m'avoir donné l'opportunité de vivre cette aventure qu'est la thèse. Merci pour vos conseils et vos relectures, qui m'ont guidé tout en me laissant construire mon propre travail. Je voudrais également remercier Cristina Pronello et Giovanni Fusco d'avoir accepté d'être rapporteurs ainsi que Cécile Tannier et Morgane Colombert de leur présence dans le jury.

Un grand merci à l'ensemble des membres du LVMT, de ThéMA et d'Efficacy, avec qui j'ai passé de bons moments et qui m'ont toujours très bien accueilli. Mes différents « séjours » au sein de ces trois structures m'ont permis de vivre une thèse riche en rencontres et en échanges.

Au sein d'Efficacy tout d'abord, j'ai rencontré des personnes passionnées par leur métier. Les nombreuses discussions, formelles ou non, m'ont permis d'élargir mon univers de recherche. J'ai une pensée particulière pour mon co-bureau, Florentin, et pour Marina, ma collègue urbaniste.

Au LVMT ensuite, je salue particulièrement mes collègues doctorants (ou docteurs aujourd'hui) avec qui j'ai commencé ma thèse. Une grosse pensée pour Baptiste, compagnon de thèse et ami. Notre road-trip au Canada a été un moment marquant de ces quatre années, une véritable « respiration », comme il le dit si bien. Je remercie également chaleureusement Sandrine, Virginie et Sophie, toujours disponibles pour nous aider dans les aspects logistiques.

Enfin, à ThéMA, où j'ai passé une bonne partie de mon temps, je remercie l'ensemble des membres du laboratoire, sur qui l'on peut toujours compter en cas de besoin. Les échanges au café, les pauses méridiennes, les nombreuses soirées au bar de l'U, et plus généralement la bonne humeur quotidienne à ThéMA ont marqué mes deux dernières années de thèse. Je souhaite particulièrement remercier les personnes qui ont pris du temps pour m'aider pendant ces quatre années. Je pense tout d'abord à Gilles, sans qui j'aurais vite été bloquée techniquement. Merci pour tout le temps que tu m'as donné, mais également pour tes conseils et tes remarques toujours très pertinentes. Merci aussi à Jérôme pour son efficacité à résoudre mes problèmes techniques ; à Pauline pour voir corrigé à plusieurs reprises ma – longue - bibliographie ; à Paul pour tous les coups de main en statistiques et pour ses relectures précises ; à Lise, François-Marie et Esteban pour leurs relectures avisées. Au-delà de la recherche, j'ajouterais que de belles amitiés sont nées à ThéMA, au fil des apéros, des raclettes, des bivouacs et des randonnées dans les Vosges, le Jura ou les Alpes.

Un grand merci à ma famille et à mes amis qui m'ont permis de décompresser régulièrement durant ces quatre années et de sortir la tête de l'eau. Vous avez été là, présents et bienveillants, sans jamais me mettre la pression. Enfin, merci Nico de m'avoir soutenu au quotidien pendant cette fin de thèse, ce rôle n'était pas simple !

Introduction générale

Forme urbaine et énergie

Les villes ont profondément changé ces dernières années : la population mondiale s'est fortement urbanisée, passant de 43 % à 55 % entre 1990 et 2017. Cette évolution est très marquée dans les pays en développement, mais la France ne fait pas figure d'exception, sa population urbaine atteignant aujourd'hui près de 80 %. Face à cette urbanisation massive, les villes françaises ont connu une véritable extension spatiale, appelée « *étalement urbain* ». À partir des années 1970, les acteurs de l'aménagement ont pris conscience des effets néfastes de l'étalement urbain, touchant les trois sphères du développement durable (Fischler, 2002). La volonté de contrôler cet urbanisme expansif et d'en réduire les conséquences négatives a conduit à revisiter la question de la forme urbaine, en cherchant notamment à identifier les formes de développement urbain les plus durables. Si les trois sphères du développement durable sont intégrées à la réflexion sur les formes urbaines, les enjeux environnementaux et plus spécifiquement les questions énergétiques, transverses aux trois principes du développement durable, vont prendre une ampleur nouvelle dans les années 2000. Face à la problématique du réchauffement climatique et aux difficultés croissantes d'approvisionnement en énergie, la sobriété énergétique apparaît en effet comme un élément central de la ville durable. Environ 50 % de l'énergie finale consommée en France est utilisée directement par les individus, c'est à dire dans les bâtiments pour les besoins de chauffage, d'éclairage ou encore d'électricité spécifique (29 %) et dans les transports pour se déplacer quotidiennement (20 %) (SDES - Ministère de la Transition Écologique, 2020b). Ces deux secteurs apparaissent ainsi comme deux champs d'action majeurs permettant de réduire significativement la consommation globale d'énergie. Face à ce constat, notre travail propose d'étudier l'impact des formes urbaines sur les consommations énergétiques des individus. Notre travail se concentrera uniquement sur les consommations énergétiques liées aux pratiques résidentielles et aux mobilités quotidiennes.

Une démarche modélisatrice

L'analyse conjointe du rôle de la forme urbaine sur les consommations énergétiques relevant du secteur des transports et du secteur résidentiel est difficile puisqu'elle nécessite la combinaison de méthodes issues de plusieurs disciplines, comme la géographie, l'urbanisme et l'énergétique urbaine. Cette dernière discipline « *appartenait* » jusqu'à peu aux ingénieurs énergéticiens, du fait de sa forte dimension calculatoire (Maïzia, 2007). Dans cette thèse, s'inscrivant explicitement dans le champ de la géographie théorique et quantitative, nous prenons le parti d'adopter une démarche modélisatrice, tant pour représenter les villes et leurs formes, que les pratiques des individus qui y prennent place et qui génèrent des consommations énergétiques. Cette démarche permet d'établir un lien entre ces différentes disciplines, en positionnant l'individu comme niveau-clé de lecture des consommations énergétiques et en considérant la forme urbaine à la fois comme le support des pratiques individuelles mais également comme un des facteurs impactant ces consommations.

Structure du document

La thèse est divisée en trois parties qui reflètent la suite logique de la démarche générale adoptée (Figure 0-1).

La première partie proposera de revenir sur des éléments conceptuels permettant de contextualiser et de positionner ce travail par rapport aux recherches existantes, à l'interface entre géographie, urbanisme et énergétique urbaine. Elle consistera d'abord à présenter les notions clés de la thèse que sont la ville, la forme urbaine et l'énergie. Après avoir exposé le contexte général et les enjeux de cette recherche, nous proposerons un état de l'art sur les liens entre la forme urbaine et les consommations énergétiques. Cela nous permettra d'avoir une vue d'ensemble de l'objet d'étude (les pratiques de consommations individuelles) et d'identifier les principales relations qui existent entre la forme urbaine et les consommations énergétiques individuelles ainsi que les manques actuels sur la question. Enfin, la démarche générale de recherche sera présentée, en justifiant le choix d'une approche modélisatrice multi-échelle et désagrégée pour évaluer les effets de la forme urbaine sur les consommations énergétiques individuelles.

La deuxième partie sera consacrée à la modélisation et à la génération des villes archétypales. Dans un premier temps, nous chercherons à identifier un cadre conceptuel de modélisation aux différentes échelles de la forme urbaine. L'enjeu sera de réussir à identifier des modèles représentatifs des villes françaises qui présentent des caractéristiques de formes variées afin de pouvoir explorer les effets de la combinaison de ces formes. Dans un second temps, nous chercherons à mieux définir et à apporter des éléments quantifiés à ces modèles urbains. Enfin dans un dernier temps, des villes archétypales seront générées, qui constitueront des terrains d'étude pour la suite de ce travail.

Enfin, la troisième partie proposera d'analyser les effets de la forme urbaine sur les consommations énergétiques des individus. Ainsi, nous proposerons tout d'abord une analyse statistique exploratoire des déplacements des habitants de plusieurs grandes villes françaises. Nous simulerons ensuite les consommations énergétiques liées aux mobilités quotidiennes et aux pratiques résidentielles dans les villes archétypales. L'analyse croisée des résultats des simulations nous permettra de répondre à notre objectif de recherche.

PREMIERE PARTIE
LA FORME URBAINE FACE À LA TRANSITION
ÉNERGETIQUE

Chapitre 1

Étudier la forme urbaine pour penser la ville durable

Chapitre 2

Identifier les liens entre forme urbaine et consommations énergétiques

Chapitre 3

Méthodologie d'évaluation des liens entre la forme urbaine et les consommations énergétiques individuelles

DEUXIEME PARTIE
MODÉLISATION ET GÉNÉRATION DES VILLES
ARCHÉTYPALES

Chapitre 4

Proposition d'un cadre conceptuel de modélisation des villes archétypales

Chapitre 5

Définition et quantification des modèles urbains conceptuels

Chapitre 6

Génération de villes archétypales

TROISIEME PARTIE
ANALYSE STATISTIQUE DU LIEN ENTRE
FORME URBAINE ET CONSOMMATIONS
ÉNERGETIQUES INDIVIDUELLES

Chapitre 7

Analyse préalable des déplacements quotidiens dans les grandes aires urbaines françaises

Chapitre 8

Appréhender l'impact énergétique des mobilités quotidiennes à l'aide d'un outil de simulation

Chapitre 9

Une évaluation multisectorielle des consommations énergétiques individuelles

Figure 0-1 : La structure de la thèse.

Première partie

La forme urbaine face à la transition énergétique

Introduction de la partie 1

L'approche interdisciplinaire proposée dans ce travail associe les trois champs que sont la géographie, l'urbanisme et l'énergétique urbaine, mobilisant des concepts qui leur sont propres. Ainsi, il nous semble tout d'abord nécessaire de définir les notions clés de la thèse que sont la ville, la forme urbaine et l'énergie. En nous appuyant sur l'histoire de l'urbanisation en France, nous verrons l'importance du rôle de l'énergie, d'abord comme levier de développement des villes puis comme contrainte d'aménagement face aux objectifs de la transition énergétique. Ce premier chapitre nous permettra ainsi d'exposer le contexte général et les enjeux de cette recherche. Dans un second temps, nous donneront une vue d'ensemble de l'objet d'étude, les consommations énergétiques individuelles, avant d'identifier les principales relations qui existent avec la forme urbaine. Une fois l'ensemble de ces éléments conceptuels posés, le questionnement de la recherche sera présenté. Il s'agira d'abord de formuler la problématique relative à l'étude des liens entre la forme urbaine et les consommations énergétiques individuelles, pour ensuite détailler la démarche expérimentale adoptée. Nous expliciterons donc ici l'ensemble des concepts nécessaires à la compréhension du sujet et des développements méthodologiques réalisés dans la suite du travail.

Chapitre 1

Étudier la forme urbaine pour penser la ville durable

Les villes, qui sont les principaux lieux de consommation énergétique (70 % de l'énergie mondiale), doivent aujourd'hui répondre aux objectifs du développement durable, et notamment à ceux de la transition énergétique. Avec la raréfaction des ressources et le changement climatique, l'énergie n'apparaît plus seulement comme un levier de développement des villes mais également comme une véritable contrainte d'aménagement. Ainsi, il est nécessaire de proposer des changements afin d'aller vers des villes plus durables. La forme des villes est une des causes aux problèmes actuels, générant des effets négatifs sur les trois sphères du développement durable. Elle apparaît ainsi inadaptée à un fonctionnement économe en énergie et la question de son adaptabilité se pose aujourd'hui. Ce premier chapitre permet tout d'abord de définir les notions clés de la thèse que sont la ville, la forme urbaine et l'énergie. Il vise également à exposer le contexte général et les enjeux qui amènent à l'objectif de cette recherche.

1.1 Ville et forme urbaine : entre adaptabilité et inertie

Il est aujourd'hui difficile, voire impossible, de définir la ville d'une façon à la fois exhaustive et intemporelle. Baumont et al. (1996) souligne le caractère « *utopiste* » d'une telle démarche. Les mutations profondes qui ont affecté cet espace rendent en effet son appréhension délicate et complexe. Cette première sous-partie n'a pas pour objectif de lister les définitions de la ville, mais de saisir « *l'originalité commune à ces agglomérations, qui les différencie d'autres formes d'habitat* » (Antoni, 2010).

1.1.1 La ville, une entité physique et fonctionnelle

1.1.1.1 Une production anthropique qui répond à des impératifs

La ville apparaît tout d'abord comme une construction anthropique, réponse aux différents impératifs des sociétés au cours de l'histoire. Trois rôles majeurs lui sont ainsi attribués :

- Le premier rôle de la ville, dès la révolution néolithique, est de rassembler les populations. En générant des surplus alimentaires, la maîtrise des techniques agricoles (Bairoch, 1985) permet le développement d'activités nécessitant une proximité spatiale entre les habitants. La réduction des distances entre les humains maximise les interactions sociales et fait émerger des fonctions urbaines spécifiques qui n'ont plus la survie comme unique but. Ainsi, l'artisanat, l'art et la culture se développent, tandis que des fonctions de gestion et de protection de la ville apparaissent. Progressivement, les villes vont ainsi se différencier dans leurs fonctions : elles deviennent des lieux d'exercice du pouvoir politique, acquièrent une position religieuse majeure ou se construisent en centres de production et d'échanges économiques (Guérin-Pace, 1993). Cet impératif de rassemblement se traduit par une concentration spatiale des activités en villes. Ainsi pour Antoni (2010), « *sur le plan de sa forme, la ville est traditionnellement considérée comme un volume dense, qui minimise les distances entre les hommes et les activités qu'elle agglomère* ».
- Le second rôle historique de la ville est de protéger les habitants. En France, dès l'antiquité et plus particulièrement à l'époque gauloise, les premières fortifications apparaissent autour des villes pour les protéger des invasions romaines. Au Moyen-âge, les invasions barbares et la chute de l'Empire romain intensifient ce repli de la ville sur elle-même : c'est le temps de la ville close. Les murailles ceignent les villes et délimitent un espace précis, créant ainsi une opposition entre *intra* et *extra muros* : ce qui est en dehors des murailles n'appartient pas à la ville. Cette dichotomie va perdurer en géographie urbaine et de nombreuses définitions reposent encore dessus.
- Le troisième rôle de la ville apparaît lors de la révolution industrielle qui marque un changement majeur. La modernisation progressive des sociétés et une explosion démographique favorisent l'expansion des villes hors des murs. Les murailles ayant perdu de leur utilité au fil du temps, vont progressivement être ouvertes et partiellement détruites. La démarcation entre le monde urbain et rural s'efface, la ville close cède sa place à la ville ouverte. Paquot et al. (2000) soulignent cette

rupture : « *La ville de la modernité, née en Europe au XIXe siècle, marque une rupture historique. Avec elle, commence l'ère des métropoles, puis des conurbations et des mégalo-poles et enfin de l'urbain généralisé* ». Les relations de proximité laissent leurs places à des modes de vie plus complexes, basés sur des flux et des déplacements (Dupuy, 1991). Pinson (2009) parle ainsi de « *ville de fluides et de flux* ». Ainsi, le troisième impératif de la ville est d'organiser ces circulations et les modes de vie associés.

1.1.1.2 Des définitions multiples

Pour certains, les changements qui ont affecté la ville ont compromis le concept même de « *ville* », désormais obsolète. Ainsi, pour Raymond et al. (1998), « *le processus que nous appelons toujours 'ville' n'existe réellement dans l'univers nord occidental que jusqu'au XIXe siècle* ». Choay (1994) va plus loin dans ce constat et déclare « *la mort de la ville* », remplacée selon elle par « *le règne de l'urbain* ». La ville n'a pour autant pas disparu : elle s'est transformée. Le foisonnement des mots actuels pour décrire la ville traduit bien ses évolutions (urbain, métropole, mégalo-pole, conurbation, agglomération, etc.). Dans leur définition de la ville, Pumain et al. (2006) insistent sur le caractère évolutif et adaptatif des villes : « *[...] il faut insister [...] sur son adaptabilité, puisqu'aux deux échelles géographiques intra- et interurbaines, la ville et les réseaux de villes se sont constamment transformés, permettant aux sociétés d'organiser et de contrôler des territoires* ». Ainsi, « *la ville se rénove, se régénère et se refait sur elle-même, depuis ses origines* ». Ces transformations ont suivi différents rythmes et répondu à différentes attentes, elles ne sont donc pas uniformes dans le monde et même en Europe. Cela se traduit aujourd'hui par une grande diversité de définition de la notion de ville (Cattan & Rozenblat, 1991; Commission européenne, Direction générale de la politique régionale, 2011). Dans certains pays européens, la ville fait référence à la ville « *de jure* », c'est-à-dire à la cité administrative qui correspond en grande partie à la ville historique. C'est le cas de la Belgique ou encore du Royaume-Uni. Dans ce dernier, le statut de « *city* » est attribué par le gouvernement au regard de son rôle historique et religieux (présence d'une cathédrale notamment). Une autre approche de la ville fait référence à la ville « *de facto* », qui correspond aux réalités démographiques et/ou physiques et/ou fonctionnelles. Certains pays identifient ainsi les villes au regard d'un seuil ou d'une densité de population. C'est le cas de l'Espagne et de l'Italie pour qui toute commune de plus de 10 000 habitants est une ville. D'autres pays ajoutent au critère de population un critère morphologique : l'urbain est alors caractérisé par un seuil de population mais également par un seuil de distance entre les bâtiments. Au Danemark par exemple, une ville compte à minima 200 habitants et moins de 200 mètres séparent les bâtiments. Enfin une dernière approche fonctionnelle permet de définir la ville. Ainsi pour l'Union Européenne, une ville peut être définie au regard de son bassin d'emploi et des mobilités qu'il génère : elle correspond alors à une zone urbaine fonctionnelle (FUA, « *Functional urban area* »). En France, ces différentes approches des villes donnent lieu à plusieurs concepts :

- La commune urbaine, qui correspond à l'approche démographique de la ville. Elle est définie par l'Insee à partir d'une grille communale de densité. Un espace urbain correspond à une agrégation de carreaux contigus avec une densité de population au carreau d'au moins 300 habitants par km²

et un minimum de 5000 habitants¹;

- L'unité urbaine, qui correspond à l'approche morphologique de la ville. Elle correspond à une commune ou un ensemble de communes présentant une zone de bâti continu (pas de coupure de plus de 200 mètres entre deux constructions) qui compte au moins 2 000 habitants².
- L'aire urbaine, qui correspond à l'approche fonctionnelle de la ville. Elle correspond à un ensemble de communes composées d'une unité urbaine de plus de 10 000 emplois et de communes rurales dont au moins 40 % de la population résidente ayant un emploi travaille dans le pôle ou dans des communes attirées par celui-ci³.

La ville ne possède donc pas une définition unique : elle varie en fonction du moment, du lieu et du regard que l'on souhaite poser sur elle.

1.1.1.3 Un objet complexe

Afin d'appréhender la ville d'aujourd'hui dans sa complexité, la notion de « *forme* » s'est imposée. Du latin « *forma* », la forme désigne dans sa définition première, l'organisation des contours d'un objet, sa structure et sa configuration⁴. Appliquée à l'urbanisme, cette définition de la forme caractérise la matérialité de la ville, au travers de sa configuration morphologique. Alexander (1965), dans son ouvrage « *A city is not a tree* », parle alors de « *forme urbaine* », et la définit comme étant l'organisation spatiale des composantes physiques de la ville. Pour lui, les éléments physiques tangibles et temporellement stables, comme les bâtiments, les rues, etc., constituent le support du mouvement des autres éléments. La distinction effectuée par Alexander entre le support et les mouvements renvoie aux termes latins issus de l'Antiquité, *urbs* et *civitas*, désignant respectivement la ville comme unité spatiale, physique (*urbs*) et la ville comme unité fonctionnelle, composée d'un ensemble de citoyens (*civitas*). Forme physique et forme fonctionnelle interagissent et évoluent conjointement. Ainsi, comme éclairée par Choay (1994), la ville est depuis l'Antiquité « *l'union indissociable de ce que les romains appelaient urbs et civitas* ».

¹ D'après la grille communale de densité | Insee (<https://www.insee.fr/fr/information/2114627>)

² D'après la Base des unités urbaines 2020 | Insee (<https://www.insee.fr/fr/information/4802589>)

³ D'après la Base des aires urbaines | Insee (<https://www.insee.fr/fr/information/2115011>)

⁴ Définition de « forme » du CNRTL (<https://www.cnrtl.fr/definition/forme>)

1.1.2 La forme urbaine comme résultat d'un processus évolutif

1.1.2.1 La forme urbaine face au phénomène de croissance

Les villes actuelles sont des éléments historiques, résultat d'une construction par ajouts successifs, au fur et à mesure de leur évolution. Cette croissance des villes prend plusieurs formes en Europe : elle s'est traduite par une extension spatiale des villes, appelée « *étalement urbain* », mais également par un renouvellement et des transformations de la ville sur elle-même. On distingue usuellement le centre-ville, les faubourgs et banlieues qui constituent la première couronne et les espaces périurbains qui constituent la seconde couronne.

Le centre-ville

Le centre-ville est l'espace le plus ancien, hérité de l'époque romaine. La ville romaine fonde son développement sur une trame urbaine organisée autour de deux axes principaux, le *cardo* (axe Nord/Sud) et le *decumanus* (axe Est/Ouest) qui se croisent à angle droit. L'époque romaine apporte également des édifices publics imposants, tels que les forums, théâtres, amphithéâtres, temples, aqueducs et fontaines, disposés autour de places publiques. Cette organisation de l'espace urbain, basée sur un découpage orthogonal, avec des rues larges et des places, structure aujourd'hui encore le paysage du centre ancien de nombreuses villes européennes et notamment françaises. Le Moyen-âge déforme la trame héritée de l'antiquité, la ville médiévale étant fondée sur un urbanisme défensif. L'objectif est d'optimiser l'utilisation de l'espace pour accueillir la population à l'intérieur des murs d'enceinte. Le plan orthogonal est délaissé, les rues deviennent plus étroites, plus sinueuses. L'urbanisme du 18^e siècle et 19^e siècle, avec une recherche d'embellissement, de salubrité et de circulation (hygiénisme), propose de nouvelles configurations dans les centres-villes. L'urbanisme Haussmannien est ainsi appliqué à de nombreuses villes françaises. De nouvelles rues et avenues sont percées, des jardins et des parcs sont insérés dans la ville, des places en étoiles sont créées, de nouveaux équipements publics sont construits. Les principes d'Haussmann interviennent aussi sur l'aspect des immeubles. Suite à la mise en place d'un règlement des façades très strict, les immeubles ne sont plus autonomes et doivent constituer un ensemble homogène avec les autres immeubles de l'îlot. De fait, les centres-villes européens présentent aujourd'hui un cadre bâti majoritairement ancien (construit avant 1950), aligné, continu (mitoyen et accolé aux limites séparatives), dont la hauteur des constructions est comprise entre 15 et 50 mètres (de R+4 à R+8) et principalement composé d'immeubles collectifs hauts. Un parcellaire dense et irrégulier, avec des petites parcelles dont les côtés adjacents aux rues sont courts (moins de 10 mètres) caractérise les îlots des centres-villes. Le réseau de rues conserve globalement un plan orthogonal avec un nombre important d'intersections. La proximité d'habitats, commerces et services au sein de la ville crée une importante mixité fonctionnelle. Cet espace est également caractérisé par la possibilité de modes de déplacements alternatifs à l'automobile (modes doux et transports collectifs).

Les faubourgs et les banlieues

Cette première couronne s'inscrit dans la continuité du centre-ville. C'est à partir du 18^e siècle que cet espace a connu un développement majeur. La forte poussée démographique qui caractérise cette période, associée à l'industrialisation et à l'essor des transports collectifs (train et tramway), entraîne une importante croissance de la taille des villes. Cette croissance se traduit tout d'abord par l'apparition de faubourgs le long des axes de transports majeurs, puis au niveau d'espaces laissés vacants. Le parcellaire se modifie et de très grandes parcelles apparaissent (supérieures à l'hectare), dédiées aux activités manufacturières et logistiques (gares, entrepôts, etc.). Le développement du tissu résidentiel est planifié, mais n'est pas centralisé car différents propriétaires fonciers privés et publics mènent des opérations en parallèle. Plusieurs formes de bâti aux fonctions variées s'entremêlent, pouvant être des quartiers luxueux de villas, des quartiers ouvriers de maisons mitoyennes, des zones d'entrepôts, etc. Dès le début du 20^{ème} siècle, en réponse aux règles hygiénistes, les pavillons se développent dans cette couronne. En France, ce développement est favorisé par la loi Loucheur de 1928, entre autres, qui permet aux particuliers d'emprunter à taux réduit afin d'acheter un terrain et d'y faire construire un pavillon. Les îlots pavillonnaires prennent une forme standardisée, généralement rectangulaire, avec des parcelles étroites, profondes et régulières. Le réseau viaire est hiérarchisé avec des boulevards et grandes artères qui ceignent les quartiers, qui sont irrigués par des voiries plus locales. Pendant cette période, la rue continue de structurer le parcellaire et le bâti, qui s'implante majoritairement de façon alignée ou en léger retrait par rapport aux rues. La période après la Seconde Guerre mondiale est marquée par la reconstruction massive de logements dans une situation d'urgence. Cette reconstruction s'effectue en rupture avec la ville ancienne : la rue s'efface, les îlots s'ouvrent pour accueillir de grands logements collectifs. Afin d'atteindre l'objectif de 320 000 logements par an pendant trente ans fixé par l'État, la fonctionnalité est mise en avant et les constructions se standardisent et s'appauvrissent. La construction des quartiers des grands ensembles dès les années 1960 marque l'apogée de cette recherche de standardisation. En application des principes de Le Corbusier et de la charte d'Athènes, des barres et des tours sont construites en série et disposées de manière régulière dans de grandes parcelles géométriques. L'espace au sol est « libéré », les flux de circulation sont séparés. Ces opérations de grande ampleur sont souvent déconnectées du reste de la ville. La même logique de construction est appliquée aux équipements tels que les campus universitaires, les parcs d'activités et les grandes infrastructures de transports. Observée dans sa globalité, cette couronne se caractérise par une très grande diversité de formes et de fonctions et par de nombreux sous-espaces aux caractéristiques parfois totalement opposées. Avec le temps, ces différents espaces se sont connectés et forment aujourd'hui un tissu urbain généralement continu d'un point de vue de la forme physique.

La couronne périurbaine

Le début des années 1970 marque une accélération de la diffusion spatiale de la ville. Cette extension des villes est nommée « *périurbanisation* ». Ce terme désigne un développement résidentiel s'effectuant dans les campagnes et à la périphérie des villes. Les causes à l'origine de cette extension des villes sont multiples, à la fois d'ordre administratif, culturel, démographique, économique et technologique. Ainsi pour Simard (2014), c'est la juxtaposition de ces facteurs pendant la période des Trente Glorieuses qui entraîne ce mouvement. Il identifie notamment le rôle de l'attrait des paysages végétalisés et de celui du pavillon de banlieue, de

l'augmentation de la taille et du revenu des ménages, du bas coût du foncier en milieu périurbain combiné à des accès plus faciles au crédit, de la création des comptes en banque pour les particuliers et celui de la généralisation massive de l'automobile. Barcelo & Trépanier (1999) distinguent des formes caractéristiques de cet étalement urbain : « les strips, principalement commerciaux, qui s'étendent le long des axes routiers, le développement sporadique en saut-de-mouton ainsi que les vastes étendues de la nouvelle banlieue monofonctionnelle, à faible densité, presque exclusivement composées de maisons unifamiliales ». L'habitat pavillonnaire individuel avec jardin est symbolique de ce mode d'urbanisation. À ces formes d'habitat est associées des pratiques spécifiques (Stock, 2004), marquées essentiellement par une utilisation intensive de l'automobile pour rejoindre des destinations quotidiennes (travail, commerces et services). Cette extension spatiale très rapide et importante de la ville marque un tournant dans la pratique urbanistique : c'est la fin des villes mixtes et denses, où « l'on peut marcher » (Leinberger, 2008). Les frontières des villes s'effacent, leurs structures se complexifient.

1.1.2.2 Le poids de l'héritage sur les formes urbaines actuelles

Les formes urbaines actuelles sont le résultat d'un long processus évolutif. Les évolutions des trente dernières années, marquées par la prédominance de l'automobile, semblent toujours structurer les logiques foncières et de déplacements actuelles et il semble difficile de s'en abstraire (Kaufmann, 2012 cité dans CERTU, 2012). Fusco (2018) souligne cette spécificité de la forme urbaine : elle présente aujourd'hui une « grande inertie temporelle par rapport aux dynamiques de changement : au cours d'une génération humaine, c'est-à-dire 20-30 ans, le changement de forme est normalement marginal par rapport à la ville héritée du passé ». Ces dynamiques sont à la fois spontanées (par exemple, en réponse à une innovation technique, comme internet) ou impulsées (par exemple, en réponse à une politique de mitigation des effets du changement climatique). La notion d'héritage est ici essentielle. Ainsi, pour Thierry (2015), les formes urbaines actuelles sont fortement marquées par deux grandes contraintes d'aménagement (Figure 1-1) :

- L'espace physique : qui sert à la production du territoire, dont les caractéristiques dépendent de la localisation géographique de la ville : climat, relief, etc.
- L'espace géographique historique : les productions humaines datant de périodes antérieures. Cet espace est propre à une société : il dépend de ses besoins, de ses savoirs et techniques et de ses attentes.

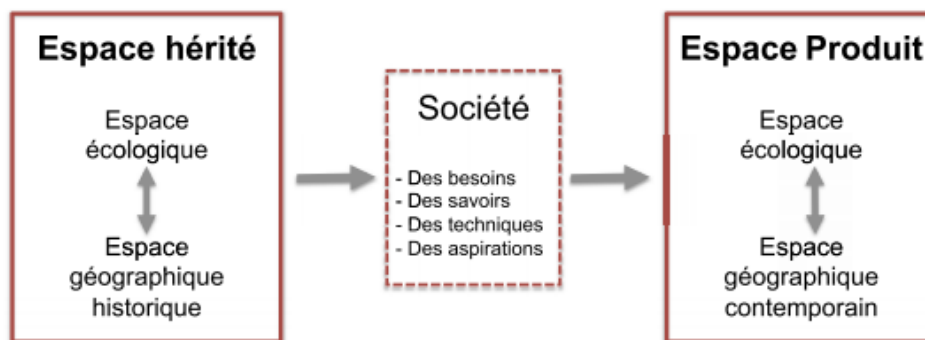


Figure 1-1 : Aménager l'espace urbain : composer avec un espace hérité (d'après Thierry, 2015).

L'espace produit dépend donc de l'espace hérité. Le plan des villes romaines et médiévales a ainsi traversé les siècles, et est encore visible dans de nombreuses villes françaises. Plus récemment, d'importantes infrastructures ont été mises en place dans de nombreux secteurs tels que le logement, le transport, l'énergie, l'eau, les déchets. Le remplacement ou l'évolution de ces équipements implique des investissements considérables qui entraînent une certaine inertie de la ville. Les infrastructures routières françaises illustrent bien ce propos : la valeur du réseau de routes nationales et d'autoroutes concédées, qui représente environ 20 000 km (kilomètres), est estimée à 250 milliards d'euros (IDRRIM, 2014). Les réseaux énergétiques des villes présentent également une forte inertie. À titre d'exemple, il existe aujourd'hui près de 195 000 km de canalisations de distribution de gaz naturel. L'analyse du parc actuel de logements français traduit également bien l'inertie des formes urbaines : en 2013, près de 17 % des logements datent d'avant 1919, et 27 % d'avant 1945 (Tableau 1-1). Le parc de logements existants affiche ainsi un taux de renouvellement inférieur à 1 % par an (PACTE, 2017).

Année de construction du logement	Nombre de bâtiments	%
Avant 1919	4 536 955	16,7
De 1919 à 1945	2 725 762	10,1
De 1946 à 1970	6 191 176	22,8
De 1971 à 1990	7 820 440	28,8
De 1991 à 2005	4 066 945	15,0
2006 ou après	1 789 129	6,6

Tableau 1-1 : Années de construction du parc actuel de logements (d'après SOeS, enquête Phébus 2013).

La durée de vie d'un immeuble est en effet de l'ordre de 100 à 150 ans (Gusdorf, 2008). Outre ces considérations techniques, l'héritage urbain a acquis en France une valeur importante, patrimoniale. Le patrimoine est défini comme étant « *ce qui demeure, ce que la société choisit de mettre « hors du temps... »* » (Garat et al., 2005). Le patrimoine bâti est aujourd'hui devenu un « *bien commun* » et concerne des espaces de plus en plus étendus et de plus en plus variés (Leniaud, 2002; Neyret, 2004). Cette dilution spatiale du patrimoine contribue à l'inertie des espaces urbains et tend « *à entrer en contradiction avec d'autres utilisations de l'espace, avec des projets de développement, de requalification ou de réutilisation d'espaces* » (Garat et al., 2005). Cependant, inertie ne signifie pas immobilité. Aucune construction anthropique n'est irréversible, et l'histoire des tramways français en est un exemple représentatif. Les transports en commun en site propre sur rail font partie des infrastructures lourdes des villes. Dans les années 1920, âge d'or du tramway, presque toutes les villes françaises sont équipées d'un réseau de tramway : c'est le principal moyen de transport en ville. L'arrivée de l'autobus dans les années 1930, puis la généralisation de l'automobile vont entraîner son déclin. Les réseaux de tramway, qui apparaissent désuets sont progressivement démontés, pour libérer de l'espace pour circuler. Les dernières lignes disparaîtront dans les années 1960 et trois lignes seulement resteront, à Lille, Marseille et Saint-Étienne. Vingt ans plus tard, la situation se renverse et les villes se tournent à nouveau vers ce mode de déplacement, dans une version modernisée. La crise économique et énergétique, combinée à une prise de conscience des problèmes de pollution et de changement climatique militent en faveur du développement

des transports collectifs urbains. Les formes urbaines s'adaptent : les voies de circulations routières disparaissent au profit de voies de tramway. Ainsi, en 2019, 22 agglomérations sont dotées de tramways et leurs réseaux cumulent plus de 1100 km de lignes. Ce mouvement reste cependant mesuré et si la circulation des automobiles est réduite, elle reste maintenue. Ainsi, les structures héritées, et notamment les structures bâties, contraignent les évolutions de la forme urbaine, mais certains équipements, plus adaptables, comme le tramway, continuent d'évoluer au gré de choix politiques. L'adaptation des formes n'apparaît pas impossible, mais la question de la vitesse de cette adaptation se pose face aux enjeux actuels (voir partie 1.2.1.2).

1.1.2.3 Des nouvelles contraintes à prendre en compte dans l'évolution des formes urbaines

Il apparaît également que les villes ont du mal à accueillir des nouvelles pratiques et les formes urbaines ne semblent plus adaptées aux enjeux actuels. Elles ont en effet des impacts négatifs et ne satisfont plus les attentes sur les trois plans du développement durable.

Des conséquences sociales

Les formes urbaines actuelles et leurs fonctionnements ont des impacts sociaux. Ainsi, elles abritent et/ou accentuent des phénomènes d'exclusion et de ségrégation sociale. Cette division socio-spatiale est un fait ancien, voire inhérent à la ville : elle a d'abord été verticale au sein des immeubles, puis horizontale avec l'extension spatiale des villes. Si le fait est ancien, c'est le passage à une véritable exclusion sociale (des pratiques, voire physique) qui est aujourd'hui remis en question. Les premières recherches sur la question remontent aux travaux de l'école de Chicago aux États-Unis. Les schémas bien connus d'organisation de la ville en zones concentriques (Burgess, 1925), en zones sectorielles (Hoyt, 1939) ou en noyaux multiples (Harris & Ullman, 1945) modélisent déjà ce phénomène de ségrégation socio-spatiale. Les résultats de ces travaux sont en partie valables en Europe, et les recherches françaises sur la question se sont essentiellement développées à partir des années 1970. Elles mettent en avant l'importance des aspects économiques liés au choix résidentiel des ménages, mais également du rôle de la planification urbaine. Ainsi, d'après Charlot et al. (2009), la composition sociale actuelle des quartiers est le résultat de choix historiques et institutionnels qui ont façonné l'offre de logements (au travers des politiques et réglementations urbaines) mais également de forces économiques. Les choix résidentiels des ménages résultent en effet d'après eux d'un double arbitrage entre le coût du foncier et le coût des transports, en adéquation avec l'économie urbaine classique et les modèles d'Alonso, Mills et Muth, ainsi que leurs développements ultérieurs. À ce double arbitrage économique, s'ajoutent les aspirations des ménages.

Si les différentes formes produites par la croissance urbaine ont déjà été porteuses d'un tri de la population, la périurbanisation a grandement accentué ce phénomène. La mixité sociale de ces espaces est quasi-inexistante. Cette homogénéisation de leur population s'explique par la similitude des arbitrages résidentiels et des aspirations des ménages : des revenus suffisants pour accéder à la propriété et le rêve de la maison individuelle (Pouyane, 2004; Youssoufi, 2011). La domination de ce type d'habitat, associé à un déficit de logements sociaux ont été des filtres importants pour d'autres catégories de ménages. Ceux qui

n'ont pas les moyens d'accéder à la propriété ou ceux qui n'aspirent pas à ce type d'habitat sont exclus, ou relégués dans les franges lointaines de cet espace périurbain. La forme des voiries qui desservent les quartiers périurbains, souvent de type « *raquette* », transforme ces espaces en îlots résidentiels, où seuls ceux qui y vivent y circulent (Antoni, 2010). Cet enfermement est parfois poussé volontairement à l'extrême : les quartiers sont alors clôturés, avec un accès contrôlé. Ces « *gated-communities* » sont de plus en plus nombreuses aujourd'hui et témoignent d'une véritable fragmentation socio-spatiale des espaces urbains (Antoni et al., 2011). Elles apparaissent comme « *le négatif* » des zones de grands ensembles dégradés.

Plus récemment, les aspirations d'une certaine partie des ménages aisés changent. Les changements sociétaux, culturels entraînent de nouvelles aspirations résidentielles. Ainsi pour Gerber (1999), « *le confort du logement choisi n'est plus suffisant ; l'achat ou la location d'une résidence principale suppose un espace environnant urbain riche en activités ou en équipements, dans un cadre agréable.* ». Cela se traduit par un phénomène de gentrification qui désigne le processus de remplacement de populations dans des secteurs urbains centraux par des catégories plus aisées, associé à la réhabilitation physique de ces mêmes secteurs (Rérat, 2012). Ainsi, les centres historiques des villes, longtemps délaissés, attirent à nouveau des populations plus aisées. La rénovation des logements anciens, le renforcement de l'attractivité culturelle et sociale et la revalorisation des espaces publics entraînent un regain d'intérêt pour ces espaces centraux. Les différences sociales sont ainsi de plus en plus prégnantes entre les différents espaces de la ville, renforcées encore par un véritable enfermement spatial. Ce phénomène de gentrification est surtout visible dans les agglomérations importantes qui présentent de nombreuses aménités et services. Dans les villes moyennes, la paupérisation des centres-villes tend à s'accroître, avec une persistance des logements précaires et une fermeture progressive des commerces et services.

Cette structure de la ville pose aujourd'hui des questions sur la cohésion de la ville et soulève des problèmes d'inégalités d'accès aux différentes aménités urbaines, aux commerces et services, aux emplois, mais également aux espaces récréatifs.

Des conséquences économiques

Dans un autre registre, les formes urbaines et plus particulièrement celles résultant de la périurbanisation, ne semblent pas minimiser les coûts économiques. Cette forme de développement est identifiée par de nombreuses études comme la plus coûteuse du point de vue de l'aménagement (Calvet, 2010; Jaglin, 2010). La diffusion de l'habitat individuel semble entraîner un accroissement des budgets des collectivités : des voiries, des réseaux techniques (assainissement, eau, électricité, ...) mais aussi des équipements supplémentaires comme les écoles sont nécessaires pour accueillir les nouveaux habitants (Guelton & Navarre, 2010). L'argument avancé repose notamment sur le phénomène d'économie d'échelles et les formes plus denses et plus compactes seraient ainsi plus optimales. Plusieurs auteurs confirment cette hypothèse en montrant que le coût de la mise à disposition des services publics dans des formes peu denses et étalées est plus élevé que dans les autres formes (Camagni et al., 2002, Solé-Ollé & Hortas Rico, 2008). Outre le coût de construction, le coût d'entretien de ces équipements est également pointé du doigt. D'autres études viennent cependant modérer ces conclusions. Fouchier (2001) et Guengant (1989) montrent par exemple

dans leurs études que les coûts de mise à disposition des réseaux routiers et des services augmentent avec la densité urbaine. Les conclusions de Morlet (2001) vont également dans ce sens : selon lui, les dépenses d'investissements ne dépendent pas de la forme d'urbanisation. Pour Guelton & Navarre (2010), cette variabilité dans les résultats provient de la grande différence entre leurs approches conceptuelles et méthodologiques, et de la manière même dont ils définissent l'étalement urbain.

Des conséquences environnementales

Les différentes formes d'urbanisation issues de l'étalement urbain ont des conséquences multiples du point de vue environnemental (Sainteny, 2008).

L'émergence d'un tissu résidentiel peu dense, associé aux nouvelles infrastructures routières entraîne une forte augmentation de la consommation d'espace. Dans la plupart des villes de France, cette consommation d'espace urbanisé par habitant a été multipliée par deux ou trois depuis les années 1970 (Orfeuill, 2000). Cette perte d'espaces naturels, agricoles et forestiers a des conséquences sur les espèces animales. Elle entraîne une fragmentation, voire une suppression des taches d'habitat, pouvant affecter durablement la biodiversité (Berling-Wolff & Wu, 2004; Díaz-Reviriego et al., 2019; Jaeger et al., 2005). L'imperméabilisation croissante des sols impacte également les réseaux hydrographiques, en perturbant le ruissellement, modifiant les flux d'eau, de nutriments et de sédiments (Arnold & Gibbons, 1996).

L'évolution des modes de vie dans un cadre spatial inadéquat a pour effet une augmentation des mobilités quotidiennes et du taux de motorisation des ménages. Cette forte dépendance à l'automobile a des effets indéniables sur la qualité de l'air, mais également sur les émissions de gaz à effet de serre, contribuant notablement au changement climatique. Dans leurs études, Fouchier (1997) et Orfeuill (2000) montrent que les villes moins denses sont plus émettrices de CO₂ que les autres. Du fait de cette dépendance à l'automobile, les formes de villes étalées auraient une consommation d'énergie supérieure à celle des villes aux formes plus denses. Ce constat est fait pour la première fois en 1989 par Newman et Kenworthy, dans leur ouvrage « *Cities and automobile dependence* ». Ils montrent ainsi la relation existante entre la densité urbaine et la consommation annuelle de carburant pour 32 villes dans le monde (Figure 1-2).

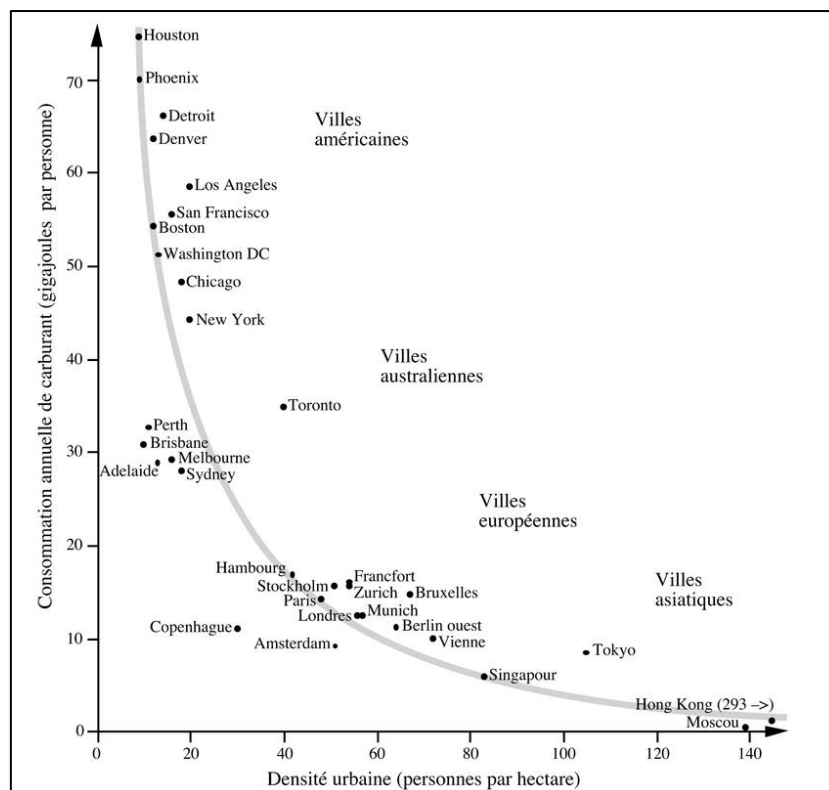


Figure 1-2 : Consommation de carburant et densité urbaine d'après Newman & Kenworthy (1989) (version française publiée par Frédéric Héran, 2001).

De nombreuses études s'accordent par la suite sur ce constat : les consommations énergétiques sont moins élevées dans les villes denses et compactes (Banister et al., 1997; Camagni et al., 2002; Næss et al., 1995). Si cette conclusion est globalement admise aujourd'hui, les relations entre la forme des villes et la consommation d'énergie font encore débat, la diversité des formes urbaines ne se résumant pas à un seul indicateur de densité.

1.1.3 L'énergie, principal vecteur de transformation de la ville

1.1.3.1 Définitions et mesure de l'énergie

L'énergie fait partie des objets d'étude classiques de la géographie, généralement utilisée comme clé de lecture des territoires. Dans le cadre de cette thèse, il est cependant nécessaire de rappeler quelques distinctions élémentaires pour les énergéticiens car elles sont essentielles pour la compréhension de ce travail.

Le terme énergie provient du grec *energeia* qui signifie « *force en action* ». Le terme a été précisé pour la première fois au 18^e siècle en physique et désigne la capacité d'un système à produire un travail. Si l'on se réfère au Larousse en ligne, l'énergie désigne aujourd'hui aussi bien « *la puissance physique de quelqu'un* », la « *vigueur dans la manière de s'exprimer* », la « *volonté tendue vers une action déterminée* » que « *la grandeur caractérisant un système physique [...] et exprimant sa capacité à modifier l'état d'autres systèmes avec lesquels il entre en*

interaction. »⁵. En géographie, l'énergie désigne dans son acception la plus courante la « *ressource utilisée par l'humanité pour ses besoins.* »⁶. Nous retiendrons ainsi la définition suivante de l'énergie : les apports nécessaires pour effectuer un travail répondant aux besoins des humains.

Les sources et les formes d'énergie sont multiples. On distingue généralement six formes d'énergie : chimique, thermique, rayonnante, électrique, nucléaire et mécanique. On oppose également les sources d'énergie non renouvelables à celles qui sont renouvelables. Les sources d'énergies non renouvelables, dites de « *stock* » ou fossiles, existent dans la nature en quantité finie et disparaissent une fois la réserve épuisée. Elles concernent l'ensemble des hydrocarbures conventionnels (pétrole et gaz naturel), non conventionnels (gaz et pétrole de schiste, gaz de houille), le charbon et l'uranium. Les énergies renouvelables, dites de « *flux* », sont inépuisables⁷ à l'échelle de temps humaine. Il en existe cinq grands types : le solaire, l'éolien, la biomasse, l'hydraulique et la géothermie.

Au concept d'énergie est associé celui de rendement énergétique. Il correspond au rapport de l'énergie produite sous la forme souhaitée à la quantité d'énergie consommée pour la produire. La différence entre l'énergie consommée et l'énergie produite pour le service demandé correspond aux pertes énergétiques. En réalité, il n'y a pas de « *perdes* », l'énergie suivant le premier principe de la thermodynamique, dit principe de conservation de l'énergie : « *Rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme* » (Lavoisier, 1789). Les pertes correspondent ainsi à de l'énergie produite sous une forme non souhaitée. Une ampoule incandescente par exemple, possède généralement un rendement d'environ 10 %, ce qui signifie que 90 % de l'énergie consommée pour produire de la lumière est considérée comme perdue (elle est en réalité transformée en chaleur).

En lien avec la notion de rendement, un autre concept nécessaire à l'analyse des consommations énergétique est le stade énergétique auxquelles elles sont exprimées. Quatre stades énergétiques sont usuellement distingués (Mons, 2007) (Figure 1-3) :

- L'énergie primaire correspond à l'énergie directement disponible, renouvelable ou non.
- L'énergie secondaire est une énergie primaire qui a subi une transformation. Elle dépend du rendement de transformation.
- L'énergie finale correspond à l'énergie livrée aux différents secteurs consommateurs *via* les circuits

⁵ Définition du Larousse en ligne (<https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/%C3%A9nergie/29421>)

⁶ Définition d'Hypergé (<https://www.hypergeo.eu/spip.php?article105>).

⁷ Il est important de noter que les matériaux nécessaires à leur production ne sont eux pas inépuisables.

et les réseaux de distribution. Elle dépend du rendement de transport.

- L'énergie utile est celle qui résulte de la satisfaction d'un besoin énergétique. Elle dépend du rendement des appareils utilisés.

Si l'on prend l'exemple de la voiture thermique, l'énergie primaire est le pétrole brut, l'énergie secondaire l'essence raffinée, l'énergie finale l'essence à la pompe et enfin l'énergie utile correspond à l'énergie utilisée pour le déplacement du véhicule. La consommation d'énergie finale en France représente environ 60 % de la consommation d'énergie primaire (SDES - Ministère de la Transition Écologique, 2021), tandis que l'énergie utile représente 40 % de cette consommation d'énergie primaire (Mérenne-Schoumaker, 2007).

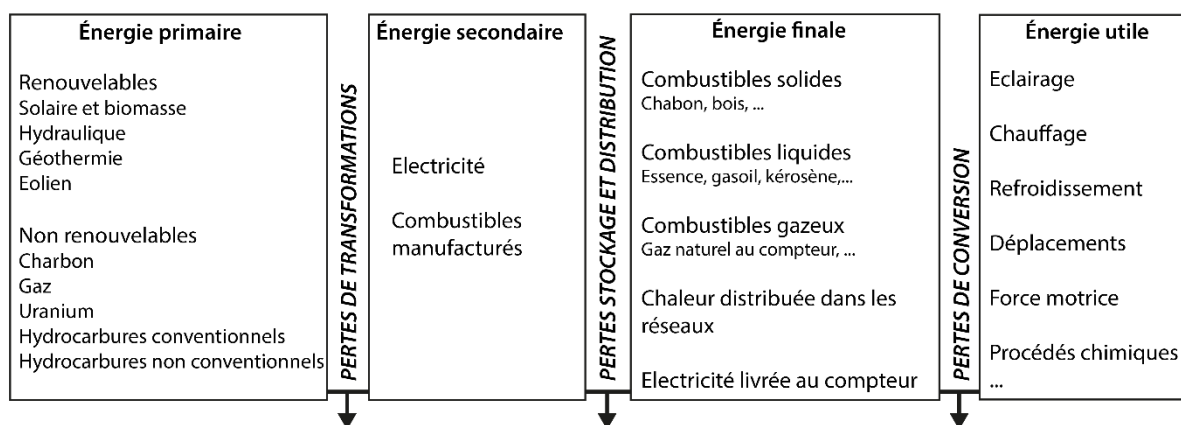


Figure 1-3 : Les quatre stades énergétiques.

Cette distinction entre les différents stades énergétiques permet de bien comprendre les transformations de la ressource énergétique primaire jusqu'à sa consommation. Elle induit cependant d'être vigilant, il est toujours indispensable de préciser le type d'énergie dont il est question lors d'évaluations et de comparaisons des consommations énergétiques.

Une autre distinction est possible entre les consommations d'énergie directes et indirectes. L'énergie directe, ou « *énergie d'exploitation* » est consommée dans la phase d'usage, tandis que l'énergie indirecte, aussi appelée « *énergie grise* » ou « *énergie intrinsèque* » est l'énergie consommée en amont de la chaîne de production de biens et de services. Le périmètre de cette chaîne de production est variable et relève de normes propres à l'analyse du cycle de vie des produits et des services (ACV). La Société suisse des Ingénieurs et des Architectes (SIA) donne la définition suivante : « *L'énergie grise, (...) c'est l'énergie cachée. L'énergie qui est là, mais qu'on ne peut pas voir. L'énergie grise, c'est la somme de toutes les énergies nécessaires à la conception, la production, le transport, l'utilisation et le recyclage d'un produit ou d'un matériau.* » (SIA, 2009). Ce concept a été développé à l'origine dans le domaine du bâtiment. Les constructions neuves étant aujourd'hui très économes en énergie d'exploitation, l'énergie grise qui paraissait proportionnellement négligeable devient maintenant très importante (AREN & ICEB, 2012) (Figure 1-4).

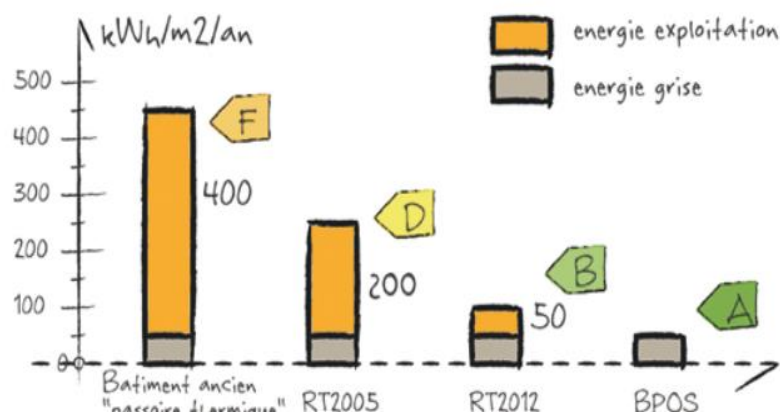
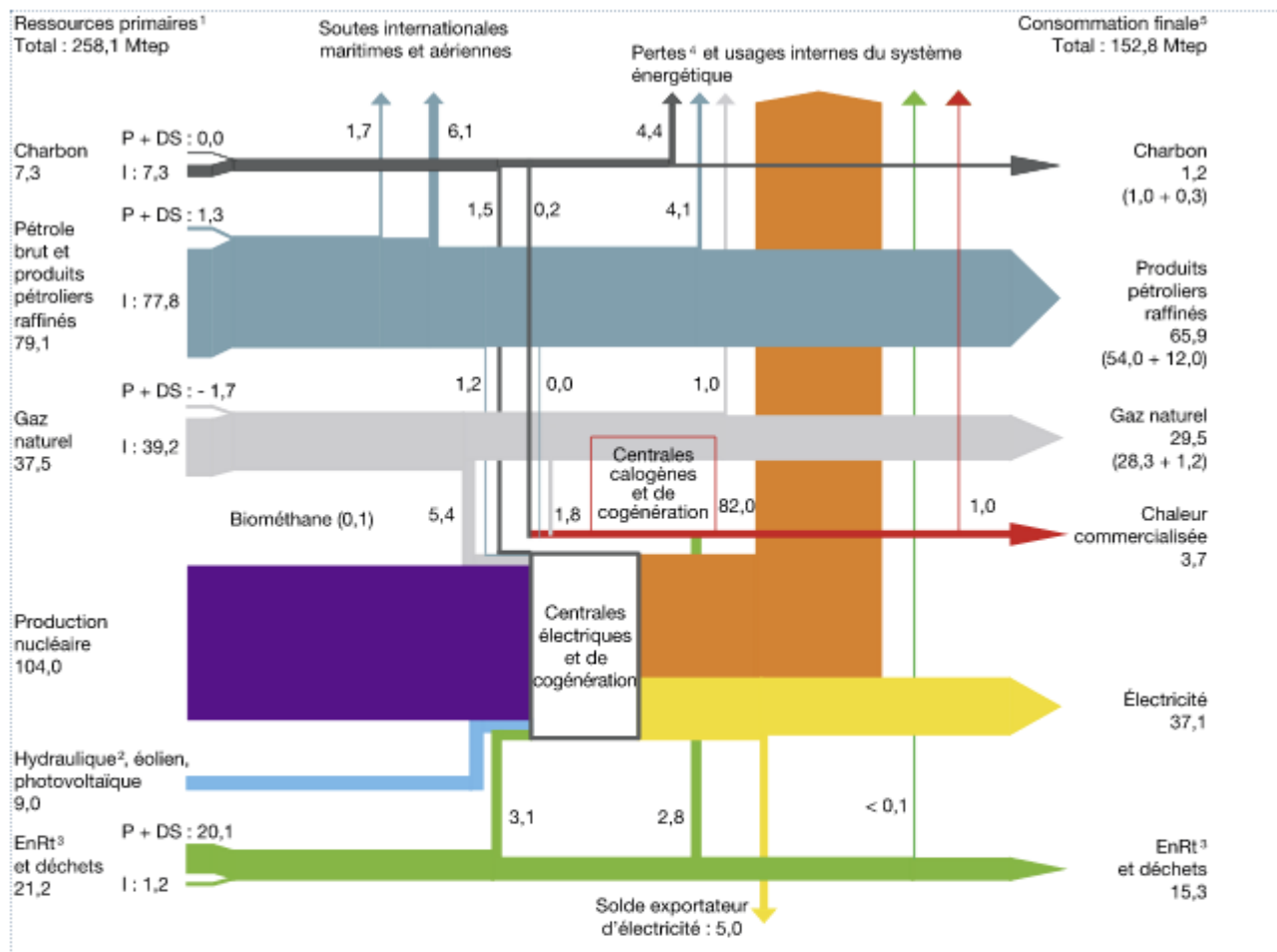


Figure 1-4 : Évolution de la proportion entre énergie grise et énergie d'exploitation du bâtiment (d'après l'ICEB, 2012).

L'unité officielle de l'énergie (du système international des unités (SI)) est le joule. Dans la pratique, l'énergie est fréquemment mesurée en utilisant d'autres unités avec notamment la tonne d'équivalent pétrole (tep). Chaque combustible dispose en effet d'un pouvoir calorifique spécifique, qui correspond à la quantité d'énergie dégagée lorsque l'on brûle une tonne de ce combustible (Sarlos et al., 2003). La tep représente la quantité d'énergie contenue dans une tonne de pétrole brut « moyen ». Ses multiples, tels que la méga tonne d'équivalent pétrole (Mtep), sont souvent utilisés pour quantifier l'énergie primaire. Concernant l'électricité, le kilowatt heure (et ses multiples) est souvent utilisé, notamment dans les industries électriques françaises et pour les consommations résidentielles des particuliers. Il correspond à la quantité d'énergie consommée par un appareil de puissance 1 000 watts qui est utilisé pendant une heure. Des tableaux d'équivalence permettent de comparer les différentes unités sans difficulté, mais il faut cependant être prudent dans l'analyse de données énergétiques, les taux de conversion pouvant varier en fonction des organismes producteurs (Curran, 1973, cité par Mérenne-Schoumaker, 2007).

L'unité temporelle usuelle de l'analyse des consommations énergétiques est l'année, mais cette unité peut ne pas être indiquée. On observe ainsi dans les bilans énergétiques, qui sont des modes représentations classiques, des consommations en Mtep alors qu'il s'agit en réalité de Mtep/an (Figure 1-5).



P : production nationale d'énergie primaire. DS : déstockage. I : solde importateur.

¹ Pour obtenir la consommation primaire, il faut déduire des ressources primaires le solde exportateur d'électricité ainsi que les soutes maritimes et aériennes internationales.

² Y compris énergies marines, hors accumulation par pompage.

³ Énergies renouvelables thermiques (bois, solaire thermique, biocarburants, pompes à chaleur, etc.).

⁴ L'importance des pertes dans le domaine de l'électricité tient au fait que la production nucléaire est comptabilisée pour la chaleur produite par la réaction, chaleur dont les deux tiers sont perdus lors de la conversion en énergie électrique.

⁵ Usages non énergétiques inclus.

Source : calculs SDES

Figure 1-5 : Bilan énergétique de la France en 2019 (d'après le SDES - Ministère de la Transition Écologique, 2020b).

Certaines consommations énergétiques comme les besoins en chauffage des ménages sont dépendantes de facteurs météorologiques, rendant les comparaisons délicates. Pour pallier ces variations, les consommations énergétiques peuvent être corrigées des variations climatiques : elles correspondent alors à la consommation qui aurait été observée si les températures hivernales (qui influent sur les besoins de chauffage) avaient été égales à la moyenne de celles constatées sur une période de référence. La consommation non corrigée est qualifiée de réelle (SDES - Ministère de la Transition Écologique, 2020b).

1.1.3.2 Le rôle de l'énergie dans le développement des villes

Le développement des villes a nécessité la maîtrise croissante de la production et de la distribution d'énergie en ville. Ainsi, la maîtrise de l'énergie est un facteur clé du développement de l'espèce humaine (Sarlos et al.,

2003). La découverte de nouvelles sources d'énergie a permis d'améliorer les conditions de vie et fait émerger de nouvelles formes de société (Figure 1-6).

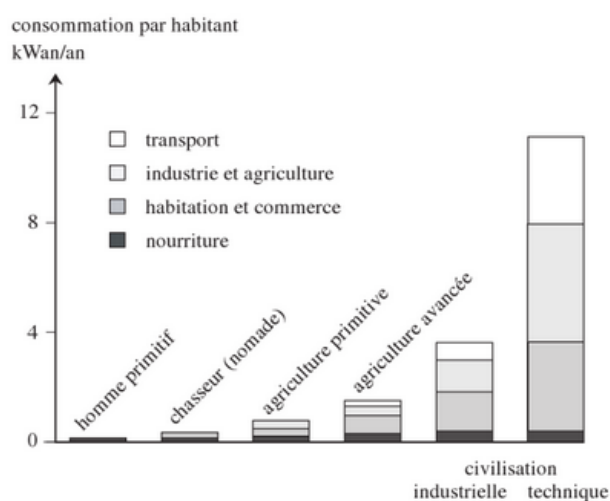


Figure 1-6 : Consommation désagrégée d'énergie en fonction du type de société (d'après Sarlos et al., 2003).

Le feu a été la première énergie thermique maîtrisée environ 400 000 ans avant notre ère. Les humains peuvent alors se chauffer, s'éclairer, faire cuire de la nourriture et se protéger. Au Néolithique, les premières sociétés agricoles apparaissent avec la domestication des animaux. La traction animale devient une nouvelle source d'énergie. Jusqu'au 19^e siècle, si on fait abstraction de la force humaine, l'énergie mondiale consommée par l'humanité provient à plus de 95 % du bois (ADEME, 2015). La civilisation industrielle naît avec l'invention du couple charbon-vapeur à la fin du 18^e siècle : c'est le début de la révolution industrielle. L'énergie devient disponible en grande quantité et permet de faire fonctionner des machines-outils, de se chauffer, mais surtout de se déplacer plus vite grâce aux locomotives à vapeur. Le tramway et le train permettent d'accroître la vitesse de déplacement ainsi que le nombre de passagers et donc de réduire les coûts : c'est le début de la déconcentration des activités et des hommes. Pour Newman et Kenworthy, la ville entre dans son deuxième âge et de ville piétonne, elle passe à ville des transports collectifs (motorisés) (Newman & Kenworthy, 1996). En 1869, la dynamo est inventée, puis en 1885 le moteur à explosion : c'est le début de la civilisation technique. En 1896, la radioactivité naturelle est découverte par le physicien Henri Becquerel et les premières centrales nucléaires voient le jour dans les années 1950. L'électricité, puis le gaz et le pétrole vont ainsi radicalement changer les modes de vie des pays développés. La généralisation de l'automobile marque l'entrée dans le troisième âge de la ville : la ville automobile (Newman & Kenworthy, 1996). Que ce soit dans les transports ou dans les autres secteurs d'activités, la consommation d'énergie ne cesse de croître et se base essentiellement sur des ressources fossiles (Figure 1-7).

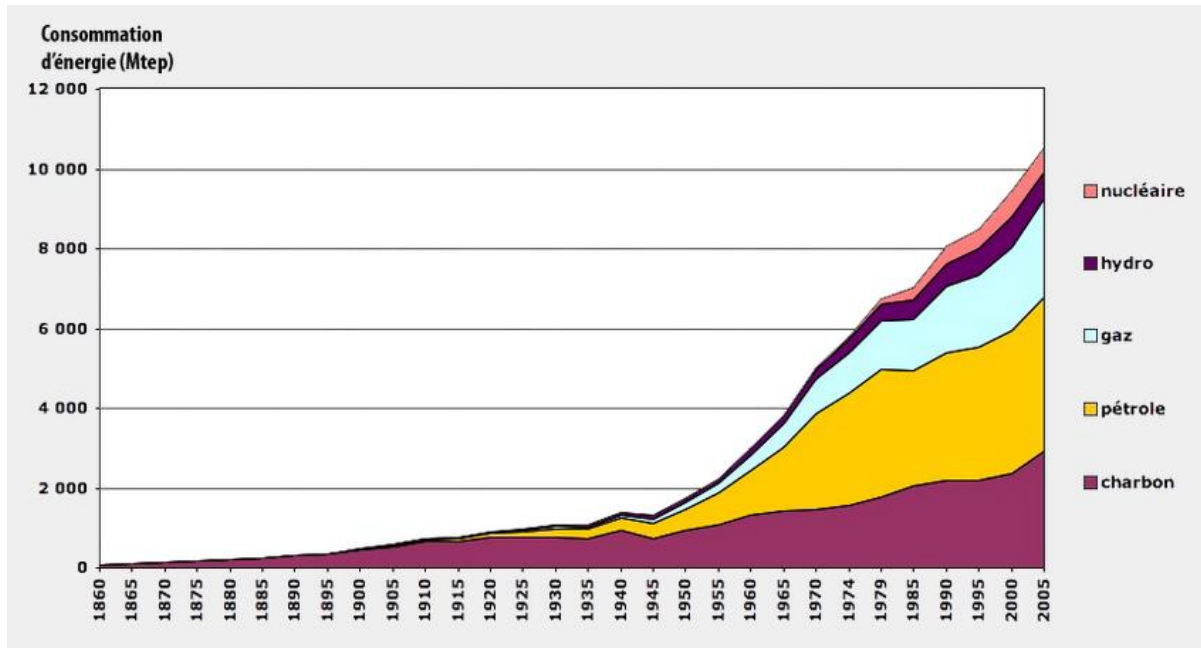


Figure 1-7 : Évolution de la consommation mondiale d'énergie (hors biomasse) depuis 1860 (d'après Shilling & Al. (1977), IEA (1997), Observatoire de l'Énergie (1997), cités dans Jancovici, 2001).

Si ce système énergétique basé sur les énergies fossiles structure depuis un siècle l'organisation et le fonctionnement des villes, il connaît aujourd'hui ses limites. Une remise en cause de nos modes de vie, de nos déplacements et de notre façon de consommer est nécessaire, et pose la question de l'adaptabilité des formes urbaines actuelles à ces nouveaux enjeux (voir partie 1.2).

1.2 Forme urbaine et transition énergétique : un nouvel objectif à intégrer

Les formes urbaines actuelles ne semblent plus répondre aux besoins actuels des sociétés et génèrent de nombreux impacts négatifs. Un changement de paradigme apparaît également : l'énergie, véritable levier de développement pendant le 20^e siècle devient progressivement une contrainte. Les formes urbaines doivent ainsi s'adapter à un nouvel objectif qui est celui de la transition énergétique.

1.2.1 Contexte et enjeux de la transition énergétique

1.2.1.1 Le contexte : une crise énergétique mondiale

Depuis la révolution industrielle, la consommation d'énergie ne cesse de croître. Entre 1973 et 2012, elle a presque doublé dans le monde (+ 92 %) (BP, 2020), et cette dynamique ne semble pas ralentir. La commission européenne, dans son rapport « *World energy, technology and climate policy outlook 2030: WETO* », indique que si les tendances actuelles de la consommation d'énergie et les changements structurels de l'économie mondiale se poursuivent, la consommation mondiale d'énergie va encore augmenter d'ici à 2030.

Les sociétés actuelles dépendent majoritairement d'énergies fossiles. Au total, le pétrole, le gaz et le charbon ont compté pour 84,3 % du mix énergétique mondial en 2019. Cette dépendance entraîne des contraintes importantes au regard de la disponibilité et de la répartition de ces ressources. Les pays du Moyen-Orient détiennent actuellement 48 % des réserves de pétrole mondiales et quelques autres pays (Venezuela, Canada, Russie et États-Unis) près de 40 %. Concernant le gaz naturel, 70 % des réserves sont localisées dans la CEI (Communauté des États indépendants) et dans les pays du Moyen-Orient. Il existe ainsi une forte dichotomie entre les pays producteurs et consommateurs : l'Europe consomme à elle seule 15 % de la production de gaz naturel et de pétrole mondiale.

Si ces ressources fossiles sont concentrées spatialement, elles sont également épuisables. Il existe différentes modélisations des pics énergétiques⁸ (« *peak-oil* » dans le cas du pétrole), qui dépendent de facteurs politiques, économiques et surtout techniques. En 2010, l'agence internationale de l'énergie (IAE) estimait ce *peak-oil* atteint. Actuellement, la société BP estime à 50 ans le nombre d'années de production que les réserves prouvées de gaz et de pétrole pourraient satisfaire au rythme actuel (BP, 2020). Bien que les réserves connues soient régulièrement repoussées et les débats sur leurs échéances nombreux, leur exploitation est de plus en

⁸ Fin de l'augmentation des quantités produites

plus coûteuse et les réserves facilement accessibles s'épuisent (Copinschi, 2010). Le taux de retour énergétique (TRE), ou EROEI ou EROI en anglais, « *Energy Returned On Energy Invested* » est le ratio entre l'énergie utilisable et celle consommée pour l'obtenir. Plus le ratio de l'énergie produite sur l'énergie investie est grand, meilleur est le rendement énergétique (un taux de 100:1 est meilleur que 3:1). Le TRE de la production mondiale de pétrole et de gaz est ainsi passé d'environ 26:1 en 1992 à 18:1 en 2006 (Gagnon et al., 2009). Aux États-Unis, le TRE associé à l'énergie découverte par l'industrie pétrolière et gazière est passé de 1229:1 en 1919 à 1:5 en 2007 (Figure 1-8).

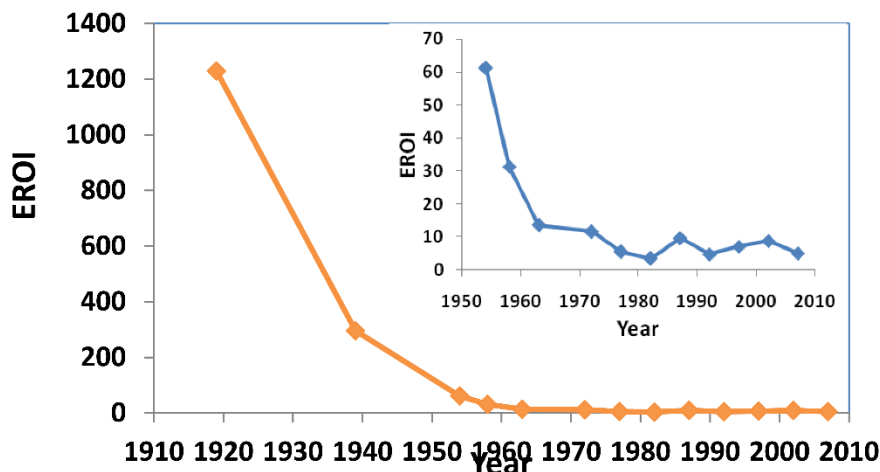


Figure 1-8 : TRE pour les découvertes de l'industrie pétrolière et gazière américaine. L'encart présente les mêmes données sur une échelle différente (d'après Guilford et al., 2011).

Face à cette raréfaction des ressources bon marché ou facile à extraire à faible coût environnemental, la sécurisation de l'approvisionnement est devenue une priorité pour de nombreux pays et engendre une augmentation des tensions dans les régions productrices. En France, si le taux d'indépendance énergétique est officiellement établi autour de 50 % (SDES - Ministère de la Transition Écologique, 2021), la dépendance au pétrole reste forte notamment pour les transports. Le nucléaire fournit actuellement 40 % de la consommation d'énergie primaire du pays, mais le problème de la raréfaction de la ressource en uranium vient également se poser, ainsi que des questions de stockage des déchets nucléaires.

Face à cette situation insoutenable, il apparaît nécessaire de revoir le modèle énergétique actuel, qui nous entraîne dans une impasse évidente du point de vue des ressources, mais également d'un point de vue environnemental.

1.2.1.2 Un enjeu majeur : le changement climatique

Le changement climatique est une autre préoccupation majeure nécessitant de questionner le modèle énergétique actuel. Les conclusions scientifiques font désormais consensus sur le rôle des activités humaines dans le changement climatique : les émissions anthropiques de GES modifient l'équilibre climatique (IPCC, 2020). Si ces émissions sont naturellement présentes sur terre, elles dépassent aujourd'hui les capacités d'absorption des réservoirs naturels terrestres et océaniques (Figure 1-9).

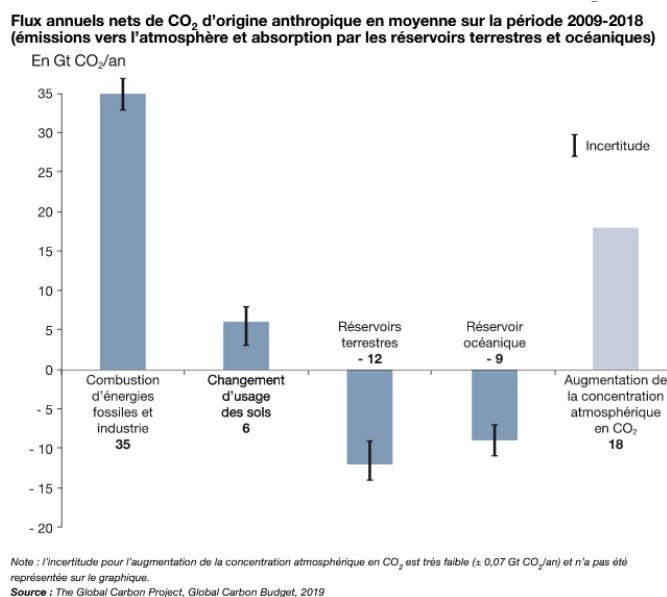


Figure 1-9 : Déséquilibre entre les émissions et la capacité de stockage du CO₂ (d'après le SDES - Ministère de la Transition Écologique, 2020d).

Les conséquences de cette rupture d'équilibre se perçoivent à l'échelle mondiale. En 2013, le rapport du Groupe d'expert intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) confirme que les changements observés sont sans précédent : « *Le réchauffement du système climatique est sans équivoque et, depuis les années 1950, beaucoup de changements observés sont sans précédents depuis des décennies voire des millénaires. L'atmosphère et l'océan se sont réchauffés, la couverture de neige et de glace a diminué, le niveau des mers s'est élevé et les concentrations des gaz à effet de serre ont augmenté* » (GIEC, 2013). Ce rapport, et les derniers rapports du GIEC (GIEC, 2020, 2021) et les chiffres clés du climat France, Europe et Monde (SDES - Ministère de la Transition Écologique, 2020d) dégagent les éléments majeurs suivants :

- La température moyenne mondiale a augmenté de 0,85°C entre 1880 et 2012 et ces années constituent probablement la période de 30 ans la plus chaude qu'ait connue l'hémisphère Nord depuis 1 400 ans (Figure 1-10). La France ne fait pas figure d'exception : l'évolution des températures moyennes annuelles métropolitaine montre que les températures moyennes de 1990 à 2009 sont toujours supérieures à la moyenne de la période 1961-1990.

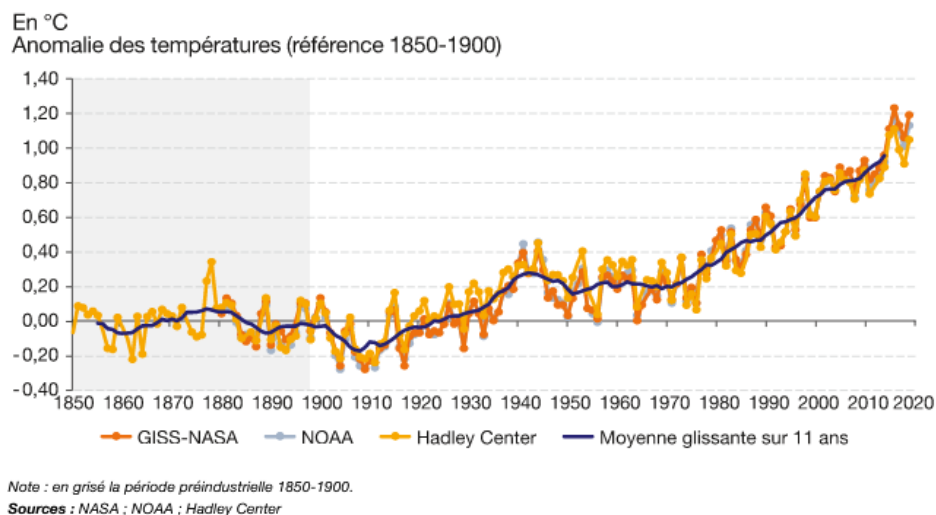


Figure 1-10 : Évolution de la température moyenne annuelle mondiale de 1850 à 2019 (d'après le SDES - Ministère de la Transition Écologique, 2020d).

- La cryosphère diminue de plus en plus, avec une accélération depuis les années 2000. Entre 2002 et 2019, la masse de la calotte glaciaire du Groenland s'est réduite en moyenne de 268 ± 11 gigatonnes par an (Gt/an).
- Le rythme d'élévation du niveau moyen des mers est supérieur au rythme moyen des deux derniers millénaires : entre 1901 et 2010, il s'est élevé de 19 cm à l'échelle du globe. Près d'un tiers de cette élévation est due à la dilatation causée par l'augmentation de la température de l'eau.
- À l'horizon 2100, le niveau moyen des mers et des océans devrait s'élever en moyenne de 43 cm selon le scénario le plus optimiste du GIEC, et de 84 cm selon le scénario le plus pessimiste par rapport à l'époque allant de 1850 à 1900. L'augmentation de la température à la surface du globe sera quant à elle probablement supérieure à 1,5 °C (selon un scénario optimiste).
- L'inertie du changement climatique est considérable : la plupart des caractéristiques du changement climatique persisteront pendant de nombreux siècles même si les émissions de CO₂ sont arrêtées aujourd'hui.
- Les impacts du changement climatique sont nombreux et touchent de nombreux domaines tels que la biodiversité, la santé des populations humaines, les infrastructures et les systèmes alimentaires (Figure 1-11).

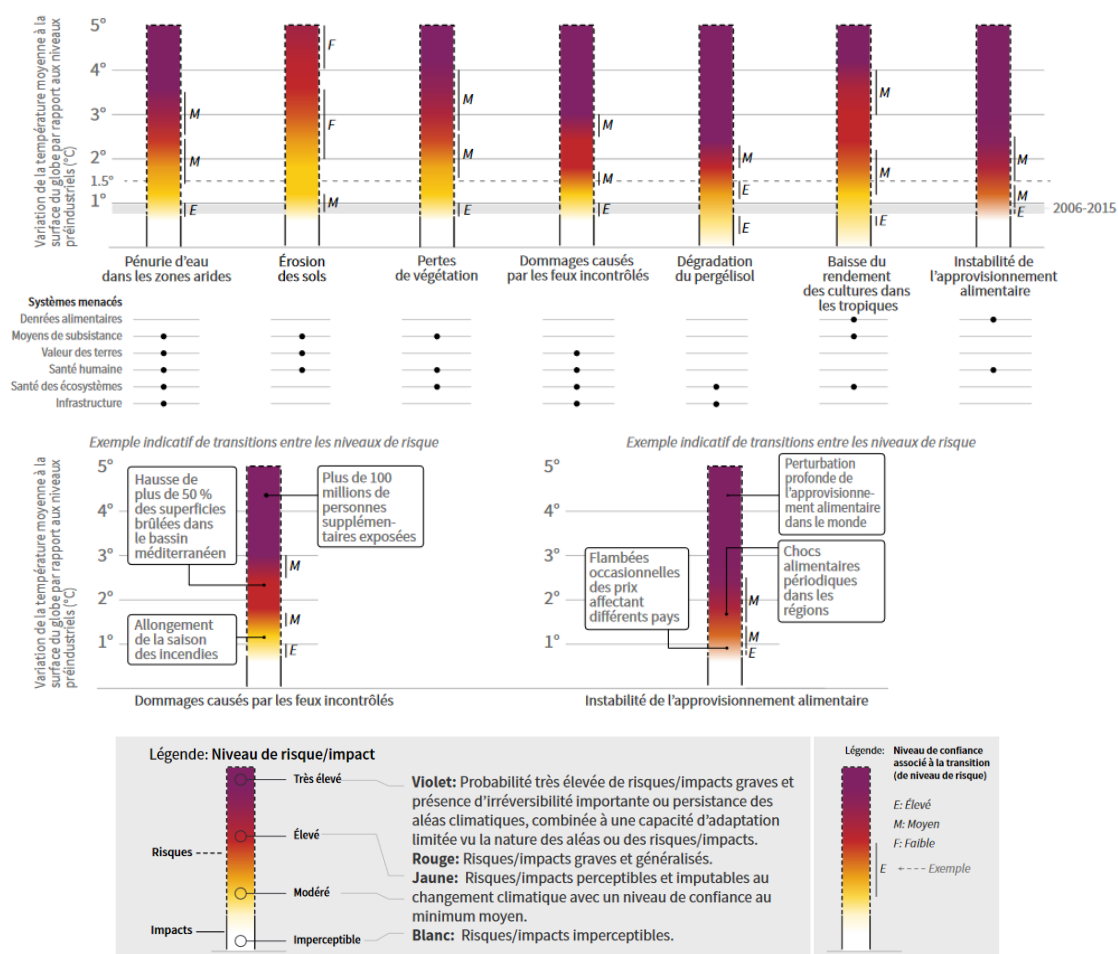


Figure 1-11 : Risques pour les populations humaines et les écosystèmes posés par les effets du changement climatique sur les processus terrestres (d'après le GIEC, 2019).

Si l'enjeu climatique est devenu l'argument majeur pour diminuer les consommations d'énergies fossiles, d'autres enjeux, plus immédiats, existent également. D'un point de vue économique et social, la fluctuation des prix des énergies fossiles entraîne d'importantes disparités, entre pays, mais également en leur sein. La précarité énergétique est ainsi un enjeu important : en France, plus de 3,8 millions de ménages (soit 14 % des ménages au niveau national) consacrent plus de 10 % de leurs revenus aux dépenses d'énergie dans le logement, auxquelles s'ajoutent celles liées aux déplacements (Devalière et al., 2011). Et ces dépenses ne cessent d'augmenter, notamment avec l'augmentation du prix du carburant. Des tensions sociales apparaissent dans les pays consommateurs : en France, le mouvement des « gilets jaunes » est ainsi né d'appels à manifester contre l'augmentation du prix des carburants automobiles. Des enjeux géopolitiques existent également. La forte concentration des ressources est à l'origine de nombreux conflits locaux et internationaux impliquant pays producteurs et pays consommateurs d'énergie fossile.

1.2.2 Une nouvelle donne énergétique

1.2.2.1 Sobriété, efficacité et énergies renouvelables : trois leviers pour un fonctionnement énergétique durable

Les réponses au problème de la surconsommation d'énergie et à ses conséquences s'inscrivent dans le cadre général du développement durable. Dans le rapport fondateur de G.H. Brundtland (Commission mondiale sur l'environnement et le développement, ONU, 1987) on lit que « *le développement durable est le développement qui satisfait les besoins de la génération actuelle sans priver les générations futures de satisfaire leurs propres besoins* ». Partant de cette base, l'ICLEI (*International Council for Local Environmental Initiatives*) a rapidement proposé une définition plus pratique et plus applicable, en définissant le développement durable comme celui « *qui procure des services économiques, sociaux et environnementaux fondamentaux à tous les habitants d'une commune sans compromettre la viabilité des systèmes naturels, immobiliers et sociaux dont dépend la fourniture des services* ». Les trois éléments de bases, interdépendants, sont ainsi la croissance économique, l'inclusion sociale et la protection de l'environnement. En juin 2012, le sommet de Rio +20 définit un ensemble d'objectifs de développement durable (ODD) au sein desquels la transition écologique est mise en avant. Cette notion traduit « *la volonté de mise en œuvre simultanée de plusieurs objectifs fondés sur la réduction des émissions de gaz à effets de serre, la promotion des énergies renouvelables, l'incitation à l'efficacité et à la sobriété énergétique, tout en interrogeant nos besoins* » (Scarwell et al., 2015). En Europe la réduction des GES est un processus déjà engagé depuis le protocole de Kyoto (1997). En 2003, la France a introduit l'objectif de « *facteur 4* » dans la stratégie nationale de développement durable (division par quatre des émissions d'ici 2050), objectif qui est inscrit en 2005 dans la loi de programmation et d'orientation sur la politique de l'énergie (loi POPE). La notion de transition énergétique, vue comme une étape de la transition écologique, n'apparaît vraiment qu'en septembre 2012, lors de la première « *Conférence environnementale* » française.

Tout comme le concept de développement durable, ce terme suscite de nombreuses divergences d'interprétations (Duruiseau, 2016). Née dans le monde germanophone dans les années 1980, la transition énergétique (Krause et al., 1980) désigne de manière générale « *le passage qui va nous amener d'un modèle basé aujourd'hui à 80 % sur les énergies fossiles vers un nouveau modèle énergétique, dans lequel les énergies non carbonées seront dominantes* » (Rojey, 2008). D'autres dénominations sont utilisées, comme la « *transition bas carbone* », la « *transition vers le facteur 4* » ou encore la « *transition postcarbone* ». Cette transition repose sur le triptyque « *sobriété, efficacité, renouvelables* », proposé par la démarche négaWatt (Figure 1-12).

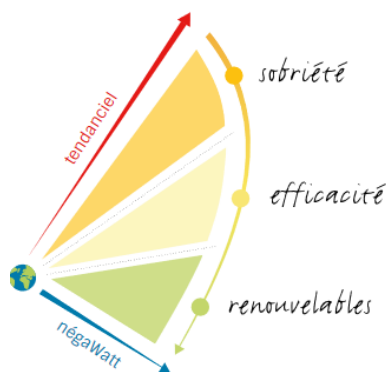


Figure 1-12 : La démarche négaWatt.

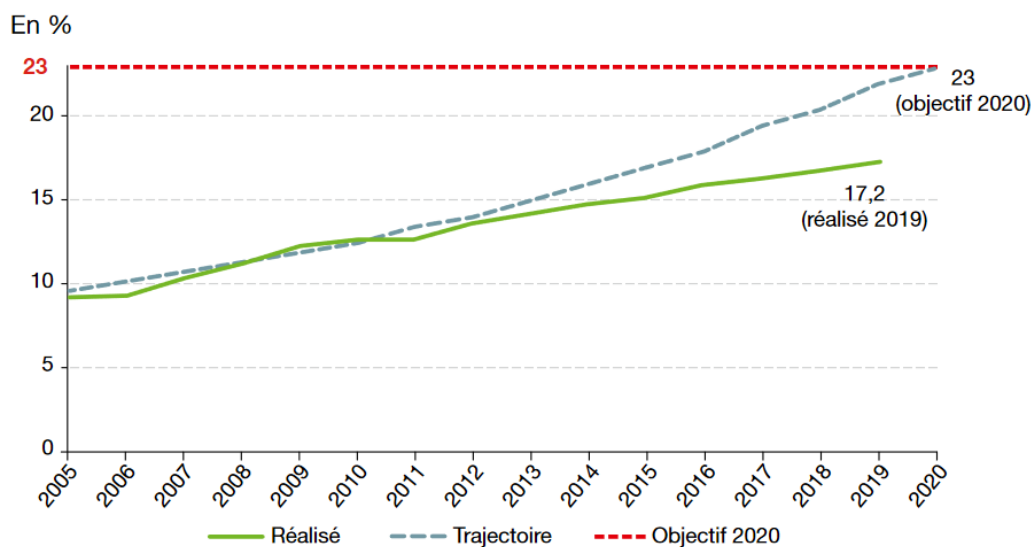
La sobriété énergétique vise à supprimer les gaspillages énergétiques, en priorisant les besoins essentiels dans les usages individuels et collectifs de l'énergie. Elle interroge ainsi directement l'organisation et le fonctionnement de nos sociétés, construites sur un modèle d'abondance d'énergie. Être plus sobre, c'est réduire les dépenses énergétiques grâce à des transformations sociétales et à un changement de comportement de la part des utilisateurs. L'association négaWatt propose trois champs d'action relevant de la sobriété énergétique, listés par Villalba & Semal (2018) : « 1) la sobriété dimensionnelle, qui consiste à éviter le surdimensionnement des équipements, et à éviter ainsi une inutile surconsommation d'énergie ; 2) la sobriété d'usage, qui renvoie à la durée d'utilisation ou d'exploitation des équipements, en encourageant la production de produits durables plutôt que l'obsolescence programmée ou la tyrannie de la mode ; 3) la sobriété conviviale, qui renvoie aux économies d'énergies permises par une meilleure organisation du territoire et par la mutualisation des équipements (lave-linge partagé, covoiturage, etc.) ». S'il est globalement admis qu'il est nécessaire de réduire nos consommations énergétiques, la notion de sobriété ne fait pas l'unanimité : elle apparaît pour certains comme une forme de régression sociale imposée, en rupture avec le progrès et les innovations technologiques. La sociologue Zélem (2016) compare ainsi la sobriété à une « écologisation contrainte des modes de vie ». Pour elle, la sobriété énergétique se heurte aujourd'hui à l'inertie des modes de vie, et peut produire des situations « non souhaitées et contre performantes ». La subjectivité de la notion de besoin accentue sa difficile acceptation, aucune définition officielle délimitant ce qui est utile de ce qui est superflu.

Deuxième volet de la démarche négaWatt, l'efficacité énergétique vise à réduire la quantité d'énergie nécessaire pour couvrir un besoin donné. Elle cherche ainsi à maximiser le rendement et à limiter les pertes d'énergie. Sa mise en œuvre passe par le développement de solutions techniques et technologiques. Dans le secteur du bâtiment par exemple, ses solutions peuvent être passives (amélioration de l'isolation, des menuiseries, des équipements, etc.) ou actives (thermostat et compteurs intelligents, détecteurs de présence, etc.).

Enfin les énergies renouvelables (EnR) constituent le troisième volet de la transition énergétique. Étant disponibles sur l'ensemble du territoire, sans notion de « réserves » et peu carbonées, elles doivent progressivement se substituer aux énergies fossiles et nucléaire. En France, la loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte (LTECV) promulguée en août 2015 a fixé des objectifs ambitieux en matière de développement des énergies renouvelables (Ministère de la Transition écologique, 2021) :

- Augmenter la part des énergies renouvelables à 23 % de la consommation finale brute d'énergie en 2020 et à 32 % de cette consommation en 2030 ;
- Atteindre 40 % de la production d'électricité d'origine renouvelable en 2030 ;
- Atteindre 15 % de la consommation finale de carburant d'origine renouvelable en 2030.

Si leur développement connaît déjà une forte dynamique de croissance, des efforts restent à faire pour atteindre ses objectifs. En 2019, elles ne représentent que 11,7 % de la consommation d'énergie primaire et 17,2 % de la consommation finale brute d'énergie en France (Figure 1-13).



Note : la trajectoire est issue du plan national d'action en faveur des énergies renouvelables (PNA), prévu par la directive 2009/28/CE et remis à la Commission européenne à l'été 2010.

Source : calculs SDES

Figure 1-13 : Part des énergies renouvelables dans la consommation finale brute d'énergie (d'après le SDES - Ministère de la Transition Écologique, 2020c).

Malgré des progrès dans les techniques de stockage, le caractère intermittent des énergies renouvelables reste une barrière à leur déploiement. Elles représentent cependant plus de la moitié des investissements mondiaux dans la production d'électricité (*Nouvelle édition de l'Observatoire Mondial des Marchés de l'Énergie (WEMO)*, 2020). En France, des investissements de neuf milliards d'euros ont été réalisés en 2019. Ces évolutions ont notamment permis de réduire la taille des systèmes de production d'énergie. Dunsky (2004) prend l'exemple des systèmes de production d'électricité : « la taille des unités de production d'électricité décroît systématiquement depuis quelque temps. D'ailleurs, cette miniaturisation continue s'accompagnera vraisemblablement d'une décentralisation de la production ainsi que d'une diversification technologique et énergétique sans précédent. ». Cette miniaturisation suivie d'une décentralisation modifie profondément le système énergétique actuel et plus largement le statut même des villes.

1.2.2.2 De consommatrice à productrice : un changement de statut pour la ville

Les villes consomment aujourd'hui près de 70 % de l'énergie mondiale. Pour les alimenter, des systèmes

d'approvisionnements énergétiques ont été mis en place dès leur création. L'histoire de leur développement est marquée par différents régimes énergétiques. Pour Durand et al. (2015), il existe deux modèles énergétiques contemporains. Le premier correspond au régime thermo-industriel, le second au régime postcarbone.

Le régime énergétique thermo-industriel est né au cours du 19^e siècle au cours des Révolutions Industrielles. Les énergies de flux eau et vent, ainsi que la traction animale sont abandonnées au profit des énergies de stocks, facilement transportables. Les progrès technologiques, la découverte d'importants gisements d'hydrocarbures, puis l'invention et la rapide diffusion de l'électricité expliquent ce changement (Duruiseau, 2016). Cette première transition énergétique conduit à passer du système établi depuis l'apparition des villes de *l'energy from space* à celui de *l'énergie for space* (Brücher, 2009). L'énergie n'est plus produite localement (*from space*), mais importée pour la consommation (*for space*). Une véritable distinction se crée entre le lieu de production et le lieu de consommation et les grands réseaux techniques vont se développer pour connecter les deux (Dupuy, 1991). Ces réseaux sont construits sur un schéma identique : réticulaire, unique, organisé en monopole et visant un service universel (Coutard, 2010). L'approvisionnement est uniforme, son efficacité ne dépend pas des caractéristiques locales, mais des capacités des sociétés à accéder aux gisements d'énergies fossiles (Deshaies & Baudelle, 2013). Les externalités négatives de ce modèle remettent en question cette centralisation depuis les années 70, et amènent à une nouvelle transition énergétique. La miniaturisation et la décentralisation des moyens de production d'énergie depuis les années 2000 entraînent un renversement de la situation avec le retour de *l'énergie from space*, de l'énergie qui provient du territoire. Ainsi, les lieux de consommation peuvent devenir des lieux de production (Rocher, 2013). Pour Chabrol & Grasland (2014), la transition énergétique « implique de reconsidérer les rapports entre production et consommation d'énergie tout en évaluant les potentiels de production et de mise en œuvre des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique ». Une rupture d'uniformité se crée ainsi dans l'approvisionnement : l'énergie redevient une ressource spatialisée, qui dépend des caractéristiques du territoire. La forme urbaine devient ainsi un facteur de division spatiale. Ce nouveau rôle de productrice d'énergie de la ville actualise les questionnements sur les formes urbaines sobres et durables.

1.2.3 L'aménagement du territoire comme levier d'action pour la transition énergétique

Faire évoluer les formes urbaines fait partie des rôles de l'aménagement du territoire. Cette discipline se définit ainsi comme étant « l'action et la pratique (plutôt que la science, la technique ou l'art) de disposer avec ordre à travers l'espace d'un pays et dans une vision prospective, les hommes et leurs activités, les équipements et les moyens de communication qu'ils peuvent utiliser, en prenant en compte les contraintes naturelles, humaines et économiques (voire stratégiques), et cela afin que les fonctions et les relations entre les hommes s'exercent de la façon la plus commode, la plus économique et la plus harmonieuse » (Merlin, 2007). Afin de guider les aménagements, les « penseurs de la ville » ont été nombreux au cours de l'histoire, exprimant différentes visions de la ville idéale. On peut citer notamment Le Corbusier avec la charte d'Athènes en 1933 ou encore les fondateurs du « *New Urbanism* » dans les années 80. Frémond (2015) propose une revue détaillée de l'ensemble de ces visions urbaines, en

détaillant pour nombre d'entre elles leurs objectifs, leurs normes et leurs règles. Leurs projets utopiques ont été critiqués, faisant généralement table rase du passé et ne tenant pas compte du contexte local préexistant. Elles ont cependant joué un rôle important dans les réflexions sur la ville et ont notamment inspiré les fonctionnalistes. Depuis les années 80, la montée de la notion de durabilité et la prise en considération des différents impacts économiques, sociaux et environnementaux liés aux formes urbaines, ont remis en lumière l'importance du rôle l'aménagement du territoire. Il ne s'agit plus alors de détruire entièrement des villes pour les rebâtir sur un nouveau plan : la question est de savoir s'il est possible de s'orienter vers un développement des villes plus sobres en énergie, vers d'autres modes de consommation. L'importance du rôle de l'aménagement dans cette transition énergétique est aujourd'hui largement admise (Chabrol & Grasland, 2014; Desjardins, 2011) et de nombreuses préconisations apparaissent dans les différents documents d'urbanisme et de planification territoriale. Le rôle des différentes échelles est également souligné : l'aménagement ne peut se faire qu'avec une compréhension fine, à différentes échelles, des liens qui existent entre la forme physique de la ville et la forme sociale. Ainsi, pour Viala (2005), « *l'action sur la ville ne peut réussir sans une juste appréciation de ce qu'elle est* ». Certains économistes remettent parfois en cause les contributions de ces préconisations au regard notamment des émissions de gaz à effet de serre (Didier & Prud'homme, 2007). Ils s'appuient sur trois éléments majeurs : leur faible impact, leur coût et la durée nécessaire à leur réalisation. Ainsi pour Desjardins (2011), « *les possibles contributions de l'urbanisme et de l'aménagement du territoire aux enjeux énergétiques et climatiques ont un coût élevé, par les politiques foncières qu'elles exigent, les investissements massifs dans les transports en commun qu'elles impliquent, etc.* ». Cependant si les apports de l'aménagement du territoire seraient modestes dans la réduction des gaz à effets de serre comparativement aux investissements nécessaires, de nombreux auteurs soulignent leurs vertus dans les domaines social, environnemental ou économique. En contribuant à une meilleure qualité de vie urbaine ou en favorisant une bonne accessibilité par les modes de déplacement les moins énergivores, l'aménagement du territoire centré sur une connaissance fine et multi-échelle de la forme urbaine, apparaît comme un levier incontournable pour penser la ville durable.

1.3 Synthèse et objectif de recherche

La ville est une forme d'occupation du sol aux caractéristiques spécifiques. C'est une production anthropique, qui répond à des impératifs ; elle est évolutive au cours du temps et sa définition varie selon le lieu et le moment ; enfin, c'est une entité physique (forme urbaine), support de pratiques sociales et fonctionnelles (fonctionnement urbain). Les formes urbaines actuelles sont le résultat d'un long processus historique : elles résultent à la fois du phénomène d'étalement urbain (extension spatiale) mais également de transformations internes (renouvellement urbain). Ces évolutions ont été permises par la maîtrise croissante de l'énergie et notamment des énergies fossiles permettant le développement des systèmes de transports. La prédominance de l'automobile ces trente dernières années a ainsi façonné les formes urbaines et leurs fonctionnements. Il semble aujourd'hui difficile de s'en abstraire, les formes urbaines présentant une grande inertie temporelle. Inertie ne signifie cependant pas immobilité et si leur vitesse d'adaptation pose question, les formes urbaines peuvent et doivent évoluer. Les impacts négatifs générés par les formes urbaines actuelles associés à un changement de paradigme énergétique imposent en effet une évolution. L'énergie, véritable levier de développement pendant le 20^e siècle est devenu une réelle contrainte d'aménagement. Les formes urbaines doivent ainsi s'adapter à un nouvel objectif qui est la transition énergétique. Cette transition qui repose sur le triptyque « *sobriété, efficacité, renouvelables* » vise à consommer moins d'énergie, de manière plus efficace et de source renouvelable. La question qui se pose alors est de savoir de quelle manière faire évoluer les formes urbaines actuelles pour remplir ces objectifs. Autrement dit, l'objectif de recherche est le suivant : identifier les formes urbaines les plus durables du point de vue des consommations énergétiques.

Pour y parvenir, il est nécessaire d'étudier les liens existants entre la forme urbaine et les consommations énergétiques, ce qui fait l'objet du chapitre suivant.

Chapitre 2

Identifier les liens entre forme urbaine et consommations énergétiques

Le chapitre précédent définit les notions clés de la thèse qui sont la ville, la forme urbaine et l'énergie ; expose le contexte et les enjeux de la recherche ainsi que l'objectif poursuivi dans ce travail. Il est maintenant nécessaire de dégager une problématique à partir d'un état de l'art sur les liens entre la forme urbaine et les consommations énergétiques. Dans ce chapitre, nous faisons le choix d'approcher les consommations énergétiques par les pratiques des individus qui sont en effet à l'origine des consommations. Par pratique, nous entendons la manière qu'ont les individus d'exercer une activité. Pour rappel, nous nous intéressons dans cette thèse uniquement aux consommations résidentielles et à celles liées aux mobilités quotidiennes. Trois objectifs principaux sont ainsi dégagés, faisant l'objet des différentes sections de ce chapitre :

- Donner une vue d'ensemble de l'objet d'étude (les pratiques de la consommation individuelle) dont une modélisation sera proposée dans les parties suivantes.
- Identifier les principales relations qui existent entre la forme urbaine et les consommations énergétiques individuelles, à toutes ses échelles.
- Présenter les manques actuels sur la question et dégager la problématique de recherche.

2.1 Les consommations énergétiques au travers des pratiques des individus

Cette section donne une vue d'ensemble des consommations énergétiques individuelles. Dans un premier temps, les ordres de grandeur et les tendances françaises sont exposés, permettant de situer les consommations énergétiques individuelles. Puis dans un second temps, les consommations énergétiques liées aux pratiques de mobilités et celles liées aux pratiques résidentielles sont détaillées.

2.1.1 L'énergie consommée : ordre de grandeur et tendances françaises

En 2019, la consommation énergétique primaire de la France s'est élevée à 249 Mtep, dont 62 % pour la consommation finale et 38 % de pertes et transformations. Cette consommation en hausse constante depuis les années 1970, a atteint un pic en 2005 (275 Mtep) pour ensuite légèrement diminuer et se stabiliser (Figure 2-1).

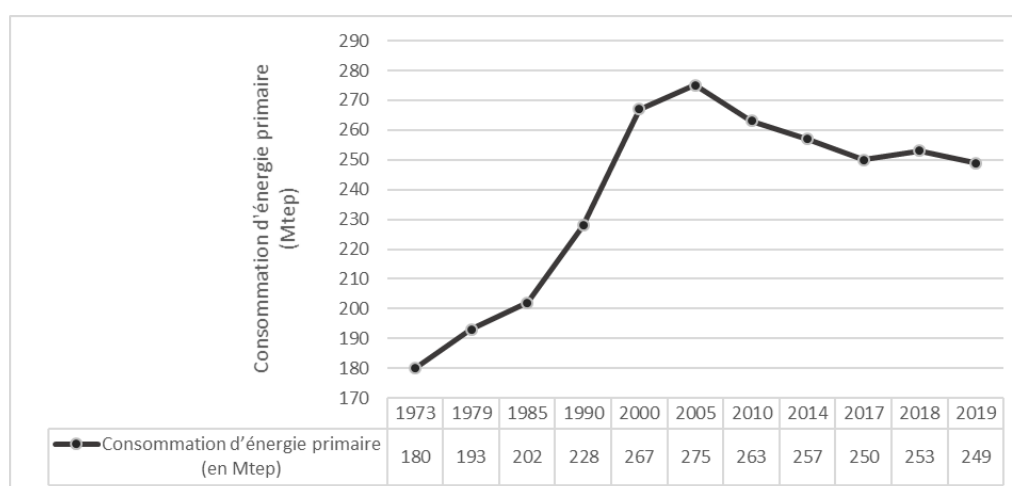
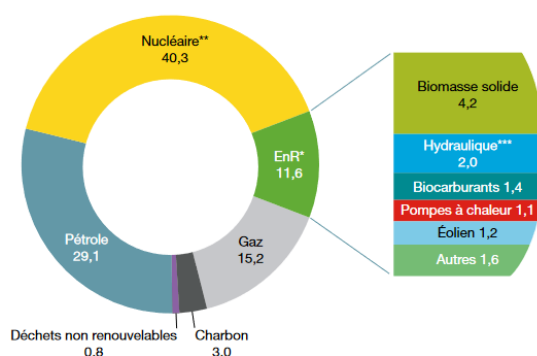


Figure 2-1 : Évolution de la consommation d'énergie primaire (corrigees des variations climatiques) en France depuis 1973 (adapté du SDES - Ministère de la Transition Écologique, 2020b).

Le bouquet énergétique primaire de la France est composé à 40 % de nucléaire, 48 % de ressources fossiles et 12 % d'EnR (Figure 2-2).



* EnR : énergies renouvelables.
 ** Correspond pour l'essentiel à la production nucléaire, déduction faite du solde exportateur d'électricité. On inclut également la production hydraulique issue des pompages réalisés par l'intermédiaire de stations de transfert d'énergie, mais cette dernière demeure marginale, comparée à la production nucléaire.
 *** Hydraulique hors pompages.
 Champ : France entière (y compris DOM).

Figure 2-2 : Répartition de la consommation d'énergie primaire en France (d'après le SDES - Ministère de la Transition Écologique, 2020b).

La consommation finale d'énergie s'élève à 139 Mtep en 2019 en France. Cette consommation se répartit en cinq secteurs d'activité au sein desquels de l'énergie est consommée de manière différente : l'agriculture, le transport, l'industrie, le tertiaire et le résidentiel. Tertiaire et résidentiel peuvent être regroupés dans un unique secteur résidentiel-tertiaire. Ces différents secteurs sont définis par l'Insee⁹ :

- Le secteur agricole englobe les cultures, l'élevage, la chasse, la pêche et la sylviculture ;
- Le secteur industriel concerne les activités économiques qui combinent des facteurs de production (installations, approvisionnements, travail, savoir) pour produire des biens matériels destinés au marché ;
- Le secteur des transports comprend tous mouvements à bord d'un mode de transport, quel qu'il soit. Il inclut le transport de marchandises et le transport de voyageurs.
- Le secteur tertiaire « recouvre un vaste champ d'activités qui s'étend du commerce à l'administration, en passant par les transports, les activités financières et immobilières, les services aux entreprises et services aux particuliers, l'éducation, la santé et l'action sociale ».
- Le secteur résidentiel se définit par rapport au secteur tertiaire : il correspond à l'ensemble des locaux à vocation de logement qui n'appartiennent pas au secteur tertiaire.

En 2019, 32 % de l'énergie finale consommée est dédiée aux transports (voyageurs et fret), 29 % au résidentiel, 17 % au tertiaire, 19 % à l'industrie et 3 % à l'agriculture (Figure 2-3). Cette consommation finale

⁹ <https://www.insee.fr/fr/metadonnees/definitions>

est en hausse depuis les années 90 avec un pic atteint en 2001. Le secteur tertiaire- résidentiel et celui des transports occupent une part de plus de plus importante depuis 1990 (respectivement +3 % et +2 %).

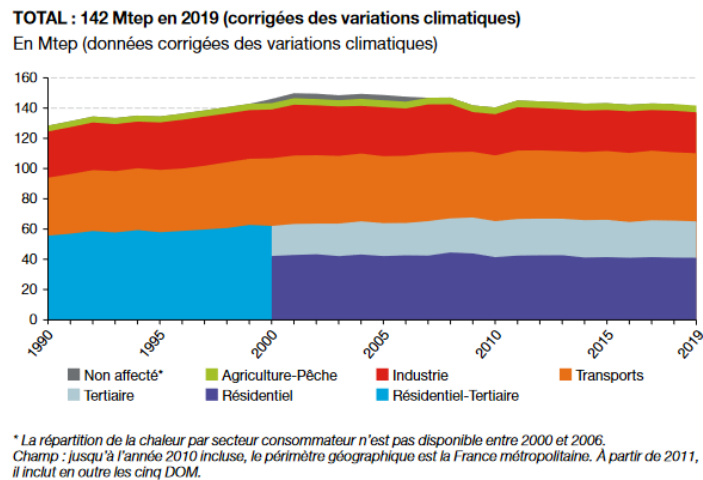


Figure 2-3 : Consommation finale énergétique par secteur (d'après le SDES - Ministère de la Transition Écologique, 2020b).

Cette énergie est majoritairement consommée dans les espaces urbains, du fait d'une forte concentration de population et d'activités. La figure suivante croise les consommations électriques finales en France en 2020 avec les espaces urbains au sens de l'Insee (définition à partir de la grille de densité 2021 – voir partie 1.1.1.2). Nous constatons ainsi que les iris qui présentent les consommations électriques les plus importantes sont majoritairement situés dans des espaces urbains (Figure 2-4).

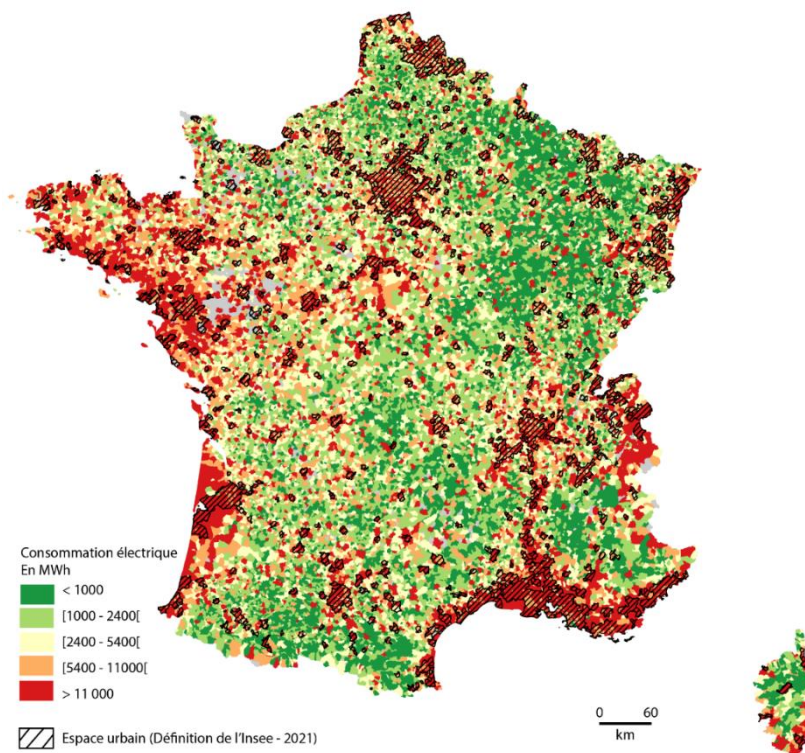


Figure 2-4 : Consommations finales électriques (tous secteurs confondus) à la maille géographique de l'IRIS en 2020 (Source des données : Ministère de la Transition écologique, 2020b).

2.1.2 Consommations énergétiques et pratiques de mobilités

2.1.2.1 Définition

La mobilité est un terme polysémique, elle peut correspondre selon la discipline aux transports, aux déplacements, ou encore aux mouvements immatériels, sociaux. La mobilité sera ici appréhendée sous un angle spatial et définie comme synonyme de « *déplacement des individus dans un espace physique* » (Munafò, 2016). Au sein de ces mobilités spatiales, on distingue classiquement quatre formes différentes : les mobilités quotidiennes, les mobilités résidentielles, les mobilités de voyage et les mobilités de migration. Nous nous focaliserons ici sur les mobilités quotidiennes, qui se caractérisent par une temporalité courte et une récurrence des déplacements s’effectuant sur un territoire restreint. Segaud et al. (2002) définissent les mobilités quotidiennes comme « *des pratiques de déplacement d’une population dans son cadre habituel* ». Ils renvoient ainsi à la périodicité de ces mobilités : elles sont répétitives, habituelles. Les motifs qui vont actionner ces déplacements sont en effet récurrents et concernent notamment le travail, l’école, les achats, les visites à la famille et aux amis ou encore les activités de loisirs. Nous retiendrons ainsi la définition suivante de la mobilité quotidienne, proposée par Francois (2019) : « *ensemble des déplacements liés aux activités habituelles des individus et réalisés au sein d’une agglomération et de son territoire d’influence* ». Sont exclues de ce fait, les mobilités occasionnelles, notamment celles du week-end.

2.1.2.2 Les consommations énergétiques liées aux mobilités quotidiennes

Le secteur du transport est le premier poste de consommation en énergie finale en France (voir partie 2.1.1). En 2019 en France, 62 % de l’énergie de traction est utilisée pour le transport de voyageurs (soit 28,4 millions de tep). Parmi le transport de voyageurs, 90 % de l’énergie est consommée par le transport individuel (25,6 millions de tep), 3,5 % par le transport collectif urbain et transport par car (1 million de tep), 3,5 % par le transport aérien (l’aviation internationale n’est pas prise en compte) et 3 % par le transport ferroviaire (0,7 million de tep). Cette consommation a augmenté de 0,2 % entre 2014 et 2019 et de 0,1 % pour le transport individuel (Figure 2-5).

	Niveau 2019 (p)	Évolutions annuelles			
		2017	2018	2019 (p)	2019 / 2014 (p)
Consommation d’énergie	28,4	1,1	-0,8	0,4	0,2
Transport individuel	25,6	1,1	-1,0	-0,1	0,1
Transport collectif urbain et transport par car	1,0	2,0	1,6	-0,4	0,5
Transport aérien	1,0	-0,5	8,9	16,3	5,0
Transport ferroviaire	0,7	0,9	-6,8	-1,0	-1,9

*Consommation d’énergie en millions de tep, évolutions en %, l’aviation internationale n’est pas prise en compte.

Figure 2-5 : Évolution des consommations d’énergie et du transport de voyageurs par mode (d’après le

SDES - Ministère de la Transition Écologique, 2020a).

Cette importante consommation dans les transports individuels s’explique par la prédominance de l’automobile mais également par la faible efficacité énergétique de ce mode de déplacements (Figure 2-6).

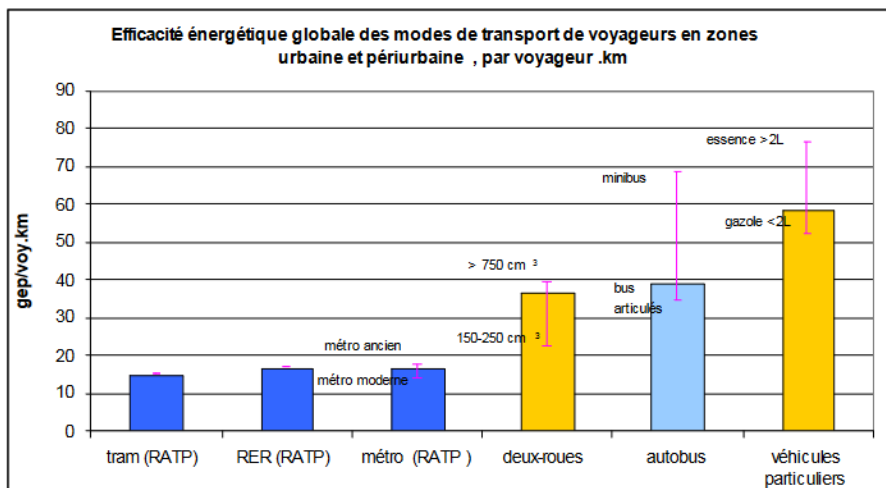


Figure 2-6 : Efficacité énergétique globale des modes de transport de voyageurs en France en zone urbaine et périurbaine (en voyageur par kilomètre) (d’après l’ADEME, 2008).

2.1.2.3 La structure des mobilités quotidiennes

Des parts modales différentes selon les espaces considérés

En France en 2018, la voiture est le mode le plus utilisé (63 % des déplacements) suivi par la marche à pied (24 %), les transports en commun (9 %) et le vélo (3 %). La part modale de l’automobile se stabilise depuis 2008, tandis que celle du vélo augmente légèrement. Ces parts modales varient en fonction de la localisation résidentielle des habitants (Figure 2-7). Nous constatons ainsi une forte hausse de l’usage de l’automobile lorsque l’on s’éloigne des communes centres de pôles. Dans ces espaces centraux, la voiture est utilisée pour près d’un déplacement sur deux, tandis qu’elle est utilisée pour près de deux déplacements sur trois dans le périurbain.

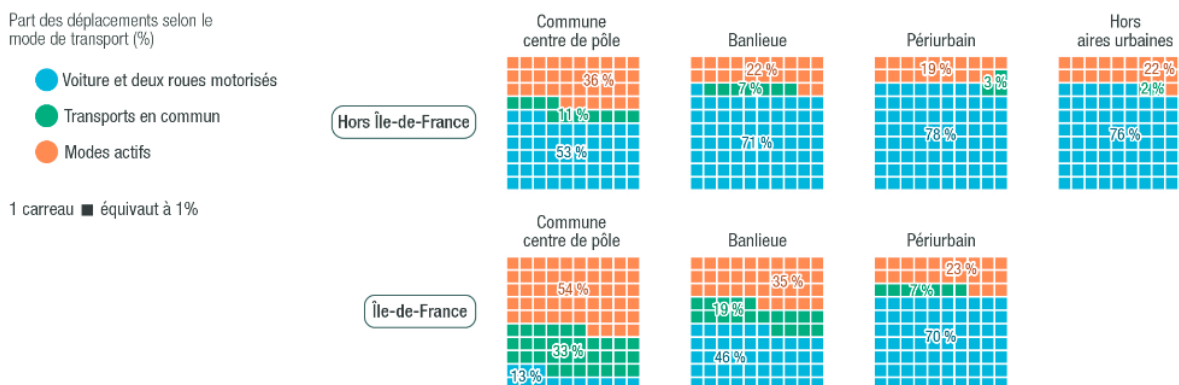


Figure 2-7 : Parts modales de déplacement selon le lieu de résidence (d’après l’Observatoire des territoires, 2019).

Le travail, principal motif de déplacement

En 2019, hors Île-de-France, le temps moyen consacré à se déplacer est de 1h19 minutes par personne et par jour (Figure 2-8). Cela correspond à une distance moyenne parcourue de 36 km par jour et à 4,4 déplacements par jour. Le travail est le motif de déplacement principal : c'est celui qui prend le plus de temps avec une durée moyenne de 35 minutes et qui induit les plus longues distances (22 km en moyenne par personne par jour).

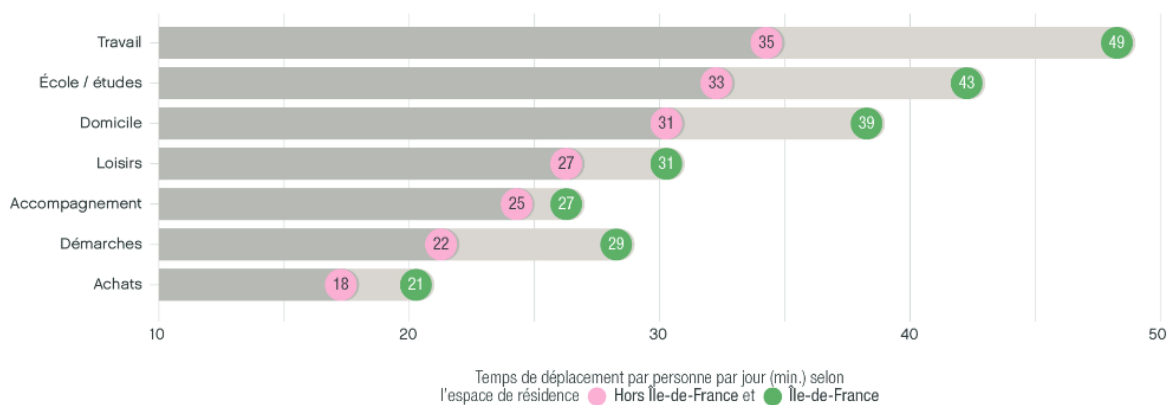


Figure 2-8 : Temps de déplacements selon le motif (d'après l'Observatoire des territoires, 2019).

Une motorisation croissante des ménages mais un parcours annuel moyen stable

En France, le parc roulant moyen de voitures particulières, en constante augmentation depuis les années 1990, comprend 32,7 millions de véhicules immatriculés en France en 2018 (Figure 2-9). La circulation des voitures particulières également en hausse sur la période observée (+ 38 % entre 1990 et 2018) atteint 429 milliards de véhicules-kilomètres en 2018. Le parcours annuel des voitures particulières stagne quant à lui, approchant les 13 200 km par an.

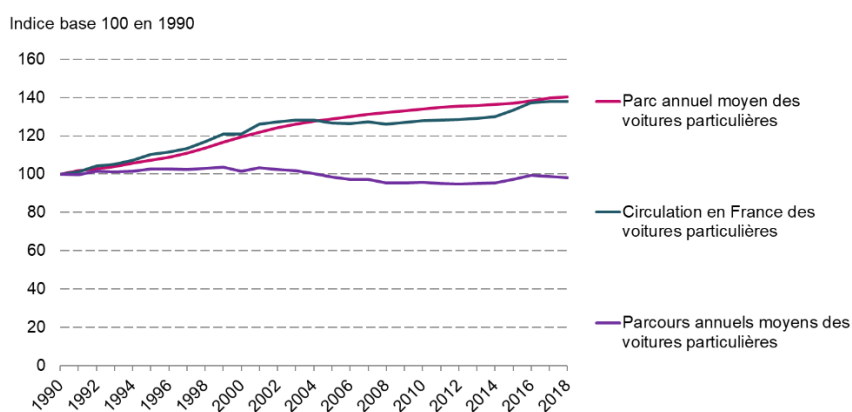


Figure 2-9 : Évolution du parc, de la circulation et du parcours annuel moyen des voitures particulières (d'après le SDES - Ministère de la Transition Écologique, 2020a).

2.1.3 Consommations énergétiques et pratiques résidentielles

2.1.3.1 Définition

Les pratiques résidentielles correspondent à la manière dont les individus vont réaliser les activités qu'il est possible de réaliser dans un logement : dormir, cuisiner, se laver, se divertir, etc. Certaines de ces activités entraînent des besoins en énergie, cuisiner par exemple entraînera l'utilisation d'un appareil de cuisson utilisant de l'électricité pour fonctionner. De manière classique, les différentes activités sont regroupées en quatre usages énergétiques principaux : le chauffage/refroidissement, la production d'eau chaude sanitaire (ECS), la cuisson et les usages spécifiques de l'électricité¹⁰.

2.1.3.2 Les consommations énergétiques liées aux pratiques résidentielles

Le secteur résidentiel est le second poste de consommation en énergie finale en France. Avec une consommation de 39,8 Mtep en 2019, il apparaît également comme le poste principal des consommations énergétiques des ménages. Si cette consommation est en baisse depuis 2016 (baisse de 5,5 %), elle reste plus importante que l'énergie consommée par les ménages pour se déplacer (Figure 2-10).

	2015		2016		2017		2018		2019	
	En Mtep	En M€ ₂₀₁₉	En Mtep	En M€ ₂₀₁₉	En Mtep	En M€ ₂₀₁₉	En Mtep	En M€ ₂₀₁₉	En Mtep	En M€ ₂₀₁₉
Logement	40,2	45 553	42,1	46 161	41,4	46 315	40,0	47 428	39,8	48 222
Transports	26,0	39 660	26,2	38 110	26,3	41 816	25,7	46 453	25,9	46 420
Total	66,2	85 212	68,3	84 271	67,6	88 131	65,7	93 882	65,7	94 641

Note : chèque énergie non déduit des dépenses d'énergie pour le logement.

Figure 2-10 : Consommation d'énergie des ménages (données non corrigées des variations climatiques) et dépense associées (d'après le SDES - Ministère de la Transition Écologique, 2020b).

L'observation du mix énergétique de la consommation finale du secteur résidentiel (Figure 2-11) montre la prédominance de l'électricité nucléaire (34 % du total), devant le gaz naturel (27 %), les énergies renouvelables (24 %) et le pétrole (11 %). Depuis quelques années, la consommation en pétrole diminue au profit des EnR.

¹⁰ L'électricité spécifique est l'électricité utilisée par des équipements qui ne peuvent pas fonctionner avec d'autres sources d'énergie.

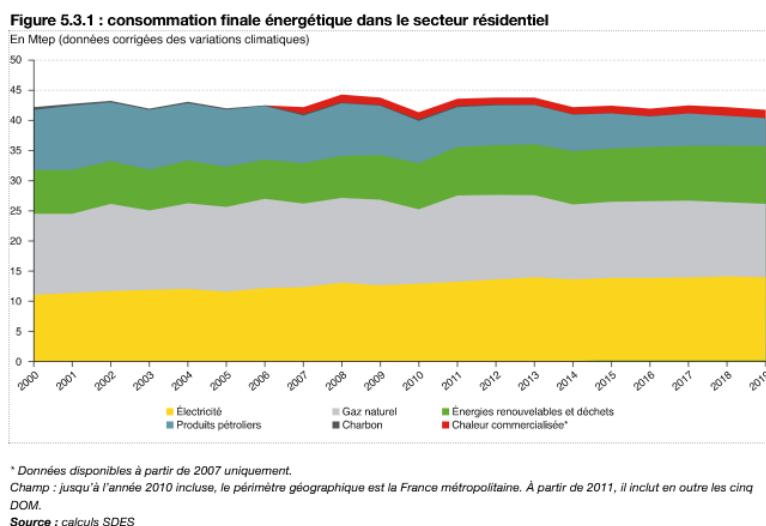


Figure 2-11 : Consommation finale énergétique dans le secteur résidentiel (d'après le SDES - Ministère de la Transition Écologique, 2020b).

En 2019, le chauffage représente un peu plus des deux tiers de la consommation du résidentiel en France, devant l'électricité spécifique (17 %), l'eau chaude sanitaire (10 %) et la cuisson (5 %) (Figure 2-12). La climatisation représente actuellement une part infime de la consommation finale du secteur résidentiel (0,3 %), mais ce chiffre pourrait s'accroître avec l'augmentation des températures estivales.

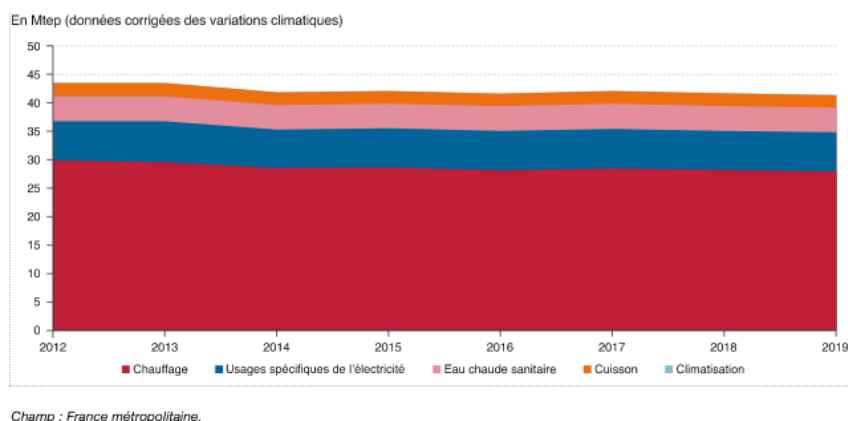


Figure 2-12 : Consommation finale énergétique dans le secteur résidentiel par usage (d'après le SDES - Ministère de la Transition Écologique, 2020b).

Au sein des consommations d'électricité spécifique, il est possible de distinguer des sous-usages comme la ventilation, l'éclairage, le multimédia et informatique, le petit électroménager (ou électrodomestique), etc. Parmi ces différents usages, le froid alimentaire (réfrigérateur et congélateur) présente la consommation d'énergie électrique la plus importante (26 % du total), suivie par le petit électroménager (19 %) et l'éclairage (12 %) (ADEME, 2019). Depuis les années 1990, la multiplication du nombre d'appareils, leur utilisation plus fréquente et plus intensive ainsi que leur plus grande taille ou capacité entraînent une augmentation des consommations énergétiques électriques résidentielles. Aujourd'hui en France, chaque foyer possède en moyenne près d'une centaine d'appareils électriques ou électroniques (ADEME, 2019). Jusqu'à présent, les progrès d'efficacité énergétique des appareils restaient masqués par ce déploiement d'équipements. Depuis quelques années, les réglementations mises en place par l'Union Européenne pour améliorer l'efficacité

énergétique des appareils ont fini par inverser la tendance de consommation observée depuis quarante ans. Malgré cela, les consommations françaises en électricité spécifique restent élevées en comparaison avec d'autres pays européens. De plus, il est important de noter que ces consommations ne tiennent pas compte des consommations liées aux stockages de données des appareils connectés à Internet, ni des consommations liées à leur fabrication.

2.1.3.3 La structure du parc résidentiel

Un accroissement du parc résidentiel

En 2020, le secteur résidentiel français compte 37 millions de logements. Ce parc a connu un fort accroissement depuis 1982, avec 12,4 millions de logements supplémentaires (+ 54 %). Le nombre de logements croit ainsi plus vite que la population. Sur 100 logements, 82 sont des résidences principales, dix des résidences secondaires ou logements occasionnels et huit sont vacants. Ces deux dernières catégories augmentent plus rapidement que la moyenne du parc et cette hausse tend à s'accélérer depuis quelques années (Figure 2-13).

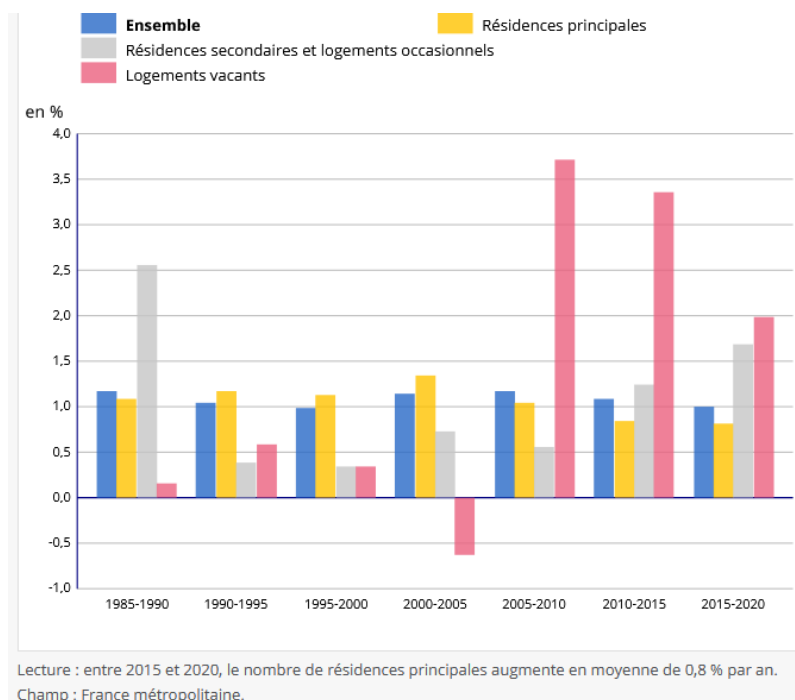


Figure 2-13 : Évolution annuelle moyenne du nombre de logements par catégorie depuis 1985 (d'après le SDES - Ministère de la Transition Écologique, 2020a).

Une majorité de maisons individuelles et des logements de plus en plus grands

Actuellement, l’habitat individuel¹¹ représente 55 % des logements, comme en 1982. Ces logements présentent une surface moyenne par personne plus importante que les logements collectifs (45m²/personne contre 32,5 m²/personne). Globalement, la surface moyenne d’habitation tend à augmenter depuis 1984 : elle est passée de 82 m² à 91 m² en 2013 (Figure 2-14). Cette augmentation est particulièrement importante pour les maisons individuelles (+17 % d’augmentation contre seulement 3 % pour les logements collectifs).

	1984	1988	1992	1996	2001	2006	2013
Par logement							
Surface moyenne (en m²)							
Individuel	82,0	84,8	86,4	88,1	89,6	91,2	90,9
Collectif	96,4	100,0	102,5	105,4	108,1	111,1	112,2
Nombre moyen de pièces							
Individuel	65,1	66,0	66,1	65,8	65,2	65,6	63,0
Collectif	3,8	3,9	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0
Nombre moyen de personnes							
Individuel	4,4	4,6	4,7	4,8	4,8	4,8	4,9
Collectif	3,0	3,1	3,0	3,0	3,0	2,9	2,9
Proportion de maisons individuelles (en %)							
Individuel	2,7	2,6	2,5	2,5	2,4	2,3	2,3
Collectif	2,9	2,9	2,8	2,7	2,6	2,5	2,5
Par personne							
Surface moyenne (en m²)							
Individuel	2,4	2,3	2,2	2,2	2,1	2,0	1,9
Collectif	30,7	32,4	34,1	35,5	37,5	40,2	40,3
Nombre moyen de pièces							
Individuel	33,1	34,8	36,9	38,7	41,2	44,3	45,0
Collectif	27,3	28,7	29,7	30,3	31,3	33,5	32,5
Proportion de maisons individuelles (en %)							
Individuel	1,4	1,5	1,6	1,6	1,7	1,8	1,8
Collectif	1,5	1,6	1,7	1,8	1,8	1,9	2,0
Collectif	1,3	1,3	1,4	1,4	1,4	1,5	1,5
Proportion de maisons individuelles (en %)	54,0	55,4	55,8	56,2	56,7	56,3	56,6

Champ : France métropolitaine.
 Note : la légère diminution des surfaces mesurée par l’enquête Logement en 2013 pourrait pour partie refléter un changement dans le comportement de réponse des ménages ; ces derniers pourraient en effet avoir une connaissance plus précise que par le passé du métrage de leur logement du fait de la législation plus contraignante en matière de déclaration des surfaces dans les années 2000.

Figure 2-14 : Taille et occupation des logements depuis 1984 (d’après l’INSEE, 2017).

Un parc résidentiel vieillissant

Parmi les logements du parc résidentiel français, 66 % ont été construits avant 1974 et ne sont généralement pas ou peu isolés (Figure 2-15). Le parc de logements existants affiche un taux de renouvellement inférieur à 1 % par an. Ce faible taux traduit un problème majeur : le parc des bâtiments existants est vieillissant.

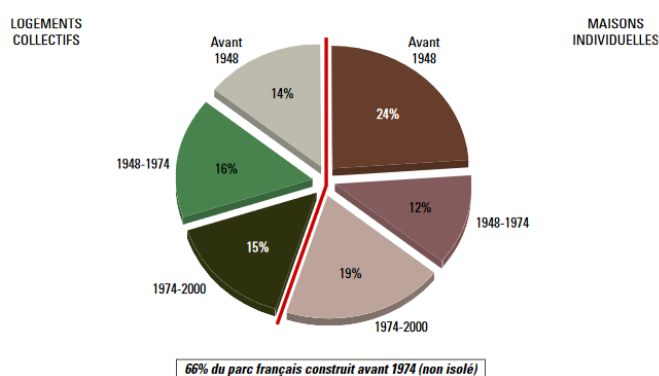


Figure 2-15 : Répartition du parc résidentiel par familles de logements et par périodes de construction (nombre de logements) (d’après PACTE, 2017).

¹¹ L’habitat individuel désigne « un bâtiment ne comportant qu’un seul logement et disposant d’une entrée particulière ». En opposition, l’habitat collectif désigne des « logements faisant partie d’un bâtiment de deux logements ou plus » d’après l’Insee (<https://www.insee.fr/fr/metadonnees/definition/c1808>).

2.2 Des liens complexes entre la forme urbaine et les consommations énergétiques

Dans cette section, nous mettons en évidence la complexité des liens existants entre la forme urbaine et les consommations énergétiques. Nous montrons tout d'abord que la forme urbaine, vue comme le support des pratiques est multi-échelle. Dans un second temps, nous montrons que la forme urbaine est un des déterminants des consommations énergétiques, mais que l'existence d'autres déterminants rend difficile l'analyse des liens entre la forme urbaine et les consommations énergétiques individuelles.

2.2.1 La forme urbaine comme support des pratiques individuelles

La forme urbaine est définie dans la partie 1.1.1 comme étant le support du fonctionnement urbain, c'est-à-dire des pratiques sociales et fonctionnelles telles que les mobilités quotidiennes et les pratiques résidentielles. Si cette distinction majeure entre support et mouvements est faite, la forme urbaine reste malgré tout un concept polysémique. Ce terme est utilisé dans de nombreuses disciplines : géographie, urbanisme, architecture, histoire, sociologie, etc. Ainsi, d'après Levy (2005) « *La forme urbaine n'est jamais une donnée a priori, elle est toujours un objet d'étude construit à partir d'une hypothèse de définition, d'une représentation, d'un point de vue sur la forme* ». Il illustre une distinction majeure qui apparaît généralement dans les définitions de la forme urbaine : les échelles d'analyses considérées. Ainsi la notion de forme urbaine est définie dans la suite du travail de thèse comme le support multi-échelle des pratiques individuelles impactant la consommation d'énergie, décrit par ses caractéristiques morphologiques et fonctionnelles. Nous distinguerons ainsi trois échelles de la forme urbaine (Figure 2-16) :

- (1) La forme urbaine peut être appréhendée à l'échelle de l'agglomération ou à la région urbaine : c'est l'échelle d'analyse la plus large. Elle correspond à l'ossature de la ville, à son enveloppe et à son agencement, sa configuration générale. Elle s'appuie sur le plan des réseaux et les masses bâties les plus importantes. Le terme de structure urbaine sera privilégié à cette échelle.
- (2) La forme urbaine peut être appréhendée à une échelle plus fine, celle d'un quartier ou d'un « *morceau de ville* ». Cette forme correspond à l'arrangement spatial des composantes physiques de la ville : le réseau de voies de circulation, les espaces bâtis et les espaces non bâtis. Elle est également caractérisée par ses fonctions (résidentielles, commerciales, etc.) et sa position au sein de la structure urbaine. L'imbrication de ces différents éléments permet une caractérisation et une différenciation fine des lieux. Le terme de tissu urbain sera privilégié à cette échelle.
- (3) À ces deux échelles d'analyse classiques en aménagement du territoire, nous ajouterons une échelle supplémentaire, généralement réservée aux architectes ou aux urbanistes, mais nécessaire dans une approche énergétique basée sur les pratiques résidentielles : celle du bâtiment ou du groupe de

bâtiment (îlot¹²). Cette forme est caractérisée par les caractéristiques morphologiques du bâtiment (volumétrie, compacité, etc.) mais également par ses rapports avec le parcellaire, le réseau viaire et les bâtiments environnants (implantation dans la parcelle, rapport à la rue, etc.). Le terme d'architecture bâtie sera utilisé à cette échelle.

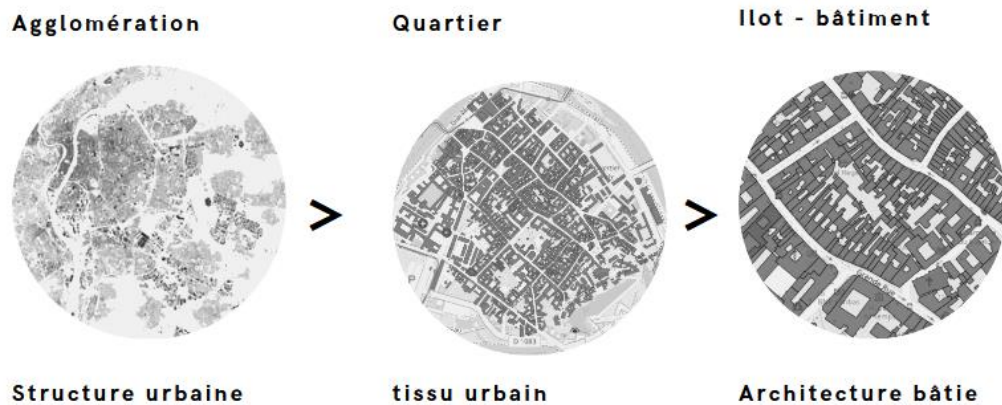


Figure 2-16 : L'emboîtement des trois échelles de la forme urbaine.

2.2.2 La forme urbaine comme déterminant des consommations énergétiques

2.2.2.1 Les déterminants des consommations énergétiques liées aux mobilités quotidiennes

Trois facteurs principaux existent pour expliquer la configuration des mobilités quotidiennes.

Le premier facteur mis en avant est techniciste. La qualité des systèmes de transport et des infrastructures explique en partie les pratiques de déplacements des individus. Cette approche se base sur les caractéristiques dites objectives des modes de déplacements, qui sont identiques pour tous les individus les utilisant (Courel & Deguire, 2020). Le système automobile (Dupuy, 1999) serait ainsi plus efficace que celui des autres modes. Cette idée d'efficacité est partagée par de nombreux auteurs et très utilisée en économie des transports (Brisbois, 2010; Munafò, 2016; Orfeuïl, 2000). Dans les modèles micro-économiques, les individus, au comportement rationnel, vont ainsi faire des choix pour se déplacer permettant de satisfaire leurs besoins de manière optimale, c'est-à-dire avec un coût de transports le plus faible possible (Ben-Akiva & Lerman, 1985;

¹² Un îlot urbain est « une portion de terrain qui accueille des constructions et qui est délimité par des voies de circulation » d'après Géoconfluences (<http://geoconfluences.ens-lyon.fr/glossaire/ilot-urbain-coeur-dilot>).

De Vos et al., 2016). Le coût est alors considéré sous différentes formes, résultat de la combinaison de plusieurs variables telles que le temps de parcours, l'accessibilité, la fréquence, la fiabilité, la ponctualité, la sécurité, le confort, la liberté, le coût monétaire ou encore le caractère écologique (Beimborn et al., 2003; Eboli & Mazzulla, 2008; Héran, 2001; Redman et al., 2013).

Le second facteur mis en avant pour expliquer les pratiques de mobilité relève d'aspects sociodémographiques. Chaque individu donne une importance différente à ces variables de coût : un individu actif pourra accorder par exemple plus d'importance au temps de parcours, tandis qu'un individu inactif pourra favoriser le confort ou le coût monétaire. Dans ce contexte, si les aspects techniques participent à définir l'efficacité d'un mode de transport, celle-ci reste subjective et individuelle. Il est montré et admis que les caractéristiques individuelles jouent un rôle majeur dans la manière dont les individus se déplacent (Courel & Deguire, 2020). Des variables comme l'âge, le genre, le revenu, la formation et surtout la composition des ménages influencent les pratiques de mobilités quotidiennes (Baccaïni, 1996; Benlahrech et al., 2001; Boarnet & Sarmiento, 1998; Handy et al., 2005; Oakil et al., 2014; Polk, 2004; Simma & Axhausen, 2001; Turner & Grieco, 2000). S'il est évident que ces caractéristiques sociodémographiques pèsent sur les pratiques de mobilités, elles ne sont pas suffisantes pour certains auteurs. Ainsi, pour Brisbois (2010), « *si des situations sociodémographiques particulières rassemblent des individus aux préférences similaires, il est peu probable que tous les individus aux préférences similaires appartiennent aux mêmes groupes sociodémographiques.* ». Selon lui, elles sont à compléter par des déterminants symboliques et des préférences individuelles. Des aspects comme le profil psychologique individuel (Anable, 2005), le vécu d'un individu (Flamm, 2004) ou encore la reproduction des comportements parentaux (Johansson, 2005) participeraient ainsi aux processus de décision. Pronello & Gaborieau (2018) proposent une synthèse des principales variables psychosociales expliquant le comportement des individus pour se déplacer.

Enfin, les caractéristiques du territoire participent à déterminer les pratiques de mobilités quotidiennes. Cette approche par la forme urbaine, à toutes ses échelles, a fait l'objet de très nombreuses études (voir partie 2.3.1). C'est sous cet angle que se positionne cette recherche, bien que n'excluant pas les autres déterminants de la mobilité.

2.2.2.2 Les déterminants des consommations énergétiques relatives au secteur résidentiel

Les consommations résidentielles relèvent de cinq facteurs principaux (Ratti et al., 2005) : (1) les conditions météorologiques et le climat, (2) le contexte urbain, (3) les caractéristiques du bâtiment, (4) la performance des systèmes et (5) l'occupation (Figure 2-17). Baker & Steemers (2000) identifient plusieurs niveaux de variation de ces facteurs : la conception du bâtiment peut faire varier la consommation d'énergie jusqu'à 2,5 fois sa valeur, tandis que l'efficacité des systèmes et le comportement des occupants de respectivement deux fois sa valeur. Les effets du contexte urbain ne sont pas quantifiés.



Figure 2-17 : Les déterminants de la consommation énergétique résidentielle (d'après Baker & Steemers,

2000, cités par Ratti et al., 2005).

Le premier facteur relève des conditions météorologiques et du climat (« *climate* ») : les températures, l'ensoleillement ou encore le vent ont un impact direct sur les besoins énergétiques des bâtiments. Des différences significatives sont ainsi observées en France selon l'altitude et la continentalité (Labeeuw et al., 2011). La performance des systèmes utilisés dans le logement et le type d'énergie associé impactent également la consommation résidentielle. Cette approche techniciste est depuis longtemps au centre des politiques et des approches visant à réduire la consommation d'énergie des bâtiments. Un système de chauffage ancien peut ainsi consommer jusqu'à deux fois plus qu'un système de chauffage récent. Les innovations technologiques telles que les appareils à haut rendement énergétique ou les systèmes d'automatisation et de contrôle des bâtiments (domotique) permettent également de réduire les consommations énergétiques, même si leurs effets restent mitigés aujourd'hui (Pothitou et al., 2016). L'occupation du bâtiment influence également les consommations d'énergie au travers de différentes interactions (Vorger, 2014). La présence d'habitants est source d'apports internes, c'est-à-dire de dégagements de chaleur, humidité et CO₂ liés au métabolisme. La présence conditionne également différentes actions impactant la consommation telles que l'ouverture/fermeture des fenêtres et des systèmes d'occultations solaires, l'utilisation de l'éclairage artificiel et des appareils électriques, la gestion de la température de consigne, l'utilisation d'eau chaude, etc. Gill et al. (2010), dans une étude comparant les consommations énergétiques de différents ménages dans un même type de logement, estiment que le comportement des occupants explique respectivement 51 %, 37 % et 11 % de la variabilité des consommations de chaleur, d'électricité et d'eau. Tout comme pour les mobilités quotidiennes, les déterminants mis en avant pour expliquer les comportements au lieu de résidence relèvent principalement d'aspects sociodémographiques. Des variables comme l'âge (Andersen, 2009; Guerra Santin et al., 2009; Guerra-Santin & Itard, 2010; Oreszczyn et al., 2006; Van Raaij & Verhallen, 1983; Yamasaki & Tominaga, 1997), la composition du ménage (Van Raaij & Verhallen, 1983; Xu et al., 2009), la taille du ménage (Conner & Lucas, 1990; Guerra-Santin & Itard, 2010), le genre (Andersen, 2009; Karjalainen, 2007), ou encore les revenus (Hunt & Gidman, 1982; Sardanou, 2008) influencent les consommations énergétiques résidentielles. L'influence des facteurs sociodémographiques sur les besoins en chauffage est résumée dans le tableau suivant (Tableau 2-1).

Principaux facteurs sociodémographiques	Caractérisation de l'influence sur les besoins en chauffage
Âge des occupants	Les personnes âgées semblent préférer des températures plus élevées que la moyenne de la population.
Genre des occupants	Les femmes préféreraient une température intérieure plus élevée.
Taille du ménage	La taille du ménage influencerait le nombre de baisses de température : elles seraient plus faibles pour un nombre plus élevé d'occupants (périodes d'occupation du logement plus importante).
Composition du ménage	Les familles comprenant des enfants en bas âge ont tendance à préférer des températures de consigne plus élevées que la moyenne.
Revenus du ménage	Les ménages aux revenus moins élevés ont tendance à utiliser moins d'énergie pour se chauffer en hiver.

Tableau 2-1 : L'influence des facteurs sociodémographiques sur les besoins en chauffage.

Enfin, le contexte urbain et les caractéristiques des bâtiments participent à déterminer les consommations énergétiques des bâtiments résidentiels. Cette approche par la forme urbaine a fait l'objet de très nombreuses études (voir partie 2.3.2). C'est sous cet angle que se positionne cette recherche, bien que n'excluant pas les autres déterminants de la consommation énergétique résidentielle.

2.3 Formes urbaines et consommation d'énergie : une absence de consensus

Dans cette section, nous mettons en évidence l'absence de consensus sur la relation entre la forme urbaine et les consommations d'énergie. En étudiant les différentes analyses empiriques existantes, nous montrons que les résultats restent ambigus.

L'objectif est double :

- Faire un état de la connaissance actuelle par secteur et par échelle d'analyse, puis montrer leurs limites pour conclure sur l'intérêt d'une approche combinée bâtiments – transports.
- Identifier au travers de cet état de l'art les différentes mesures des formes urbaines aux différentes échelles pour construire une grille de lecture des formes urbaines qui permettra de les qualifier et de les différencier.

Cette section est composée de trois sous-parties. Les deux premières résument les principaux résultats de recherche identifiés selon les deux secteurs de consommations individuelles : les mobilités quotidiennes et les pratiques résidentielles. Au sein de ces secteurs, les différentes échelles d'analyses sont mobilisées. La sous-partie suivante porte sur les difficultés et les limites rencontrées qui entretiennent l'ambiguïté persistante des résultats.

2.3.1 Mobilités quotidiennes et forme urbaine

Les liens entre mobilités quotidiennes et formes urbaines ont été étudiés dans de nombreux travaux. La littérature est ancienne et particulièrement riche sur le sujet, mais les résultats sont parfois contradictoires (Levinson & Kumar, 1997; Schwanen et al., 2004). Plusieurs revues de littérature sur le sujet existent déjà (Ewing & Cervero, 2010, 2001; Handy et al., 2006; Silva et al., 2017a; Stead & Marshall, 2001). Les études se distinguent selon les échelles spatiales qui ont été considérées, selon les méthodes utilisées, selon les caractéristiques du territoire prises en compte et selon les variables de la mobilité à expliquer.

2.3.1.1 Mobilités quotidiennes et structure urbaine

Taille

La taille des villes est une variable facilement mesurable, mais qui apparaît peu dans la littérature, car elle joue un rôle indirect sur les mobilités quotidiennes (Charron, 2007). La taille des agglomérations influe en effet sur le nombre et la diversité d'emplois et de services proposés, mais également sur la qualité de desserte en transport public. Les corrélations entre la taille urbaine et la mobilité observées dans plusieurs études semblent ainsi montrer que la taille n'est pertinente que quand elle est associée à d'autres caractéristiques de la forme urbaine comme la densité (Levinson & Kumar, 1997; Schwanen et al., 2004). Malgré cela, les analyses concluent généralement que plus l'agglomération est grande, moins la possession et l'utilisation de

l'automobile sont élevées (Levinson & Kumar, 1997; Naess et al., 2017; Newman & Kenworthy, 1989).

Compacité versus étalement

Les études de Newman et Kenworthy sont la référence incontournable lorsque l'on s'intéresse aux relations entre mobilités et forme urbaine globale. En 1989, ils sont les premiers à mettre en évidence le rôle de la densité urbaine sur la consommation annuelle de carburant liée aux déplacements individuels au travers d'une comparaison de 32 grandes villes dans le monde (Newman & Kenworthy, 1989). Au-delà de la densité de population, leurs recherches mettent en avant le modèle de la ville compacte, apparu dans les années 70 aux Pays-Bas comme une alternative à l'étalement urbain (Haughton & Hunter, 1994). La ville compacte s'affirme comme une forme de développement dense, économe en espace, avec une urbanisation continue qui prend place dans les limites existantes de la ville (Bochet, 2007). Les travaux de Newman et Kenworthy ont fait l'objet de nombreuses critiques, la principale portant sur la validité de la relation entre haute densité et réduction des consommations. L'utilisation d'un unique indicateur de densité pour comparer des villes dont les niveaux de développement économique et les conditions politiques et culturelles ne sont pas équivalents, restreints fortement l'analyse (Gordon & Richardson, 1989; Naess et al., 2017; Schwanen, 2002). À densité comparable peuvent correspondre une grande diversité de structures urbaines. D'autres comparaisons internationales ont été conduites ultérieurement, étudiant le rôle de plusieurs attributs de structure urbaine et notamment de la compacité. Giuliano & Narayan (2003) ont ainsi confirmé les principales conclusions de Newman et Kenworthy. En comparant des villes des États-Unis et d'Angleterre, ils mettent en évidence le rôle de la densité, de la compacité et de la taille des agglomérations sur les fréquences et les distances de déplacement. Dans cette même lignée, on peut citer en Europe les travaux de Banister et al. (1997), ceux de Cirilli & Veneri (2009) sur 111 villes italiennes, ou encore ceux de Fusco (2004) qui compare plus de 100 grandes villes mondiales. Aujourd'hui d'une manière générale, il est ainsi admis qu'une ville plus compacte et plus dense a un effet favorable sur les consommations énergétiques liées aux mobilités. Cette conclusion reste cependant à traiter avec prudence, pour plusieurs raisons : (1) l'acceptabilité et la faisabilité de la compacité est tout d'abord remis en cause ; (2) la compacité ne semble favorable qu'aux déplacements domicile-travail ; (3) les problèmes de congestions engendrés par une trop forte compacité génèrent une forte pollution et des consommations plus élevées.

Polycentrisme versus monocentrisme

Le second grand débat sur la structure urbaine porte sur le caractère monocentrique ou polycentrique d'une agglomération. Le modèle monocentrique traditionnel de la ville repose sur l'hypothèse que tous les emplois sont situés au centre, les habitants se répartissant autour de ce centre (Glaeser & Kahn, 2001). Les évolutions du siècle dernier ont eu pour conséquence l'apparition d'un nouveau modèle, celui de la ville polycentrique, « *réunion* » de plusieurs villes et donc composée de plusieurs centres. Certains auteurs affirment que le modèle de la ville polycentrique optimise les déplacements. Ils se basent sur une hypothèse de réorganisation des localisations conjointes des ménages et des activités (P Gordon & Wong, 1985). Autrement dit, ils soutiennent que les ménages sont prêts à déménager ou à changer d'emploi pour minimiser leur temps de déplacement. La création de nouveaux centres entraînerait ainsi des distances et des temps de parcours plus

faibles. Plusieurs études empiriques confirment ce point de vue, avec notamment celle de Peter Gordon et al. (1989). Schwanen et al. (2001, 2003) proposent une revue de la littérature détaillée sur le sujet. À l'inverse, d'autres auteurs affirment que le polycentrisme est impuissant à réorganiser favorablement la mobilité. Pour eux, l'hypothèse de relocalisation des actifs à proximité de leur pôle d'emplois n'est pas valide. Ils soutiennent que la déconcentration des localisations en périphérie des villes entraîne un excès de mobilité en nombre et en distance de déplacement, en créant de plus en plus de flux radiaux et de navetage inversé (Aguilera & Mignot, 2003). La mauvaise desserte en transports en commun de ces nouveaux pôles induit également un usage accru de l'automobile. Les travaux les plus connus soutenant cette option sont probablement ceux menés par Schwanen et al. (2001, 2004). Dans leur étude de 2004 comparant plusieurs villes des Pays-Bas, ils montrent que dans la majorité des structures polycentriques, les distances et les durées des trajets en automobile sont nettement plus longues que dans les structures monocentriques. Aux États-Unis, les travaux de Cervero & Wu (1998) montrent que la décentralisation de l'emploi dans la ville de San Francisco n'a pas été associée à une réduction des distances ou des durées moyennes des déplacements. Dans son étude comparant 34 villes européennes, Le Néchet (2011) montre également que l'efficacité énergétique des structures polycentriques est moindre. La relation entre centralité et mobilités quotidiennes apparaît très complexe, notamment du fait de la multiplicité des structures polycentriques (Aguilera et al., 2004). Ainsi, le nombre de pôles et leurs caractéristiques semblent avoir d'importantes conséquences sur les mobilités (Charron, 2007).

2.3.1.2 Mobilités quotidiennes et tissu urbain

La littérature est particulièrement abondante à cette échelle. De nombreuses études caractérisent les tissus urbains par leur éloignement au centre. Ces travaux utilisent généralement un découpage spatial des villes peu précis, de type centre / périphérie et mesurent l'éloignement au centre *via* une accessibilité ou un ratio emplois/résidence. On peut notamment citer les travaux de Levinson (1998) sur Washington, ceux de Schwanen et al. (2001) en Hollande, de Vandersmissen et al. (2003) sur la ville de Québec ou encore ceux de Pouyanne (2004) sur Bordeaux. Globalement, ces travaux montrent une relation positive entre l'éloignement au centre et les distances parcourues en voiture. Ainsi, plus on s'éloigne du centre, plus l'usage de la voiture apparaît important (en temps, distance et fréquence de recours).

Cervero & Kockelman (1997) analysent cette relation plus en détail. Ils introduisent le concept des dimensions (3Ds) qui sont :

- La densité (« *density* »), qui correspond à la variable d'intérêt par unité de surface. La variable d'intérêt peut être les habitants, les ménages, les emplois, les logements, etc.
- La diversité fonctionnelle (« *diversity* »), qui mesure le degré de mixité des usages du sol (habitations, commerces, emplois, ...). Des indices d'entropie sont généralement utilisés, ainsi que des ratios population/emplois ou logements/emplois.
- Le design (« *design* ») qui inclut les caractéristiques des rues, la forme et le nombre des intersections, l'organisation du stationnement, la taille des îlots, la présence d'aménagements pour les modes doux (trottoirs, passages piétons, végétation, éclairage, voies cyclables, etc.)

En 2010, trois nouvelles dimensions s'ajoutent aux existantes (Ewing & Cervero, 2010) :

- L'accessibilité aux destinations (« *destination accessibility* ») qui mesure la facilité d'accès à différents lieux. Ces lieux peuvent se décliner par motifs de déplacements : travail, loisirs, achats, etc. Des temps d'accès sont souvent utilisés par modes, ainsi que la distance au centre.
- La distance aux transports collectifs (« *distance to transit* ») qui mesure la facilité d'accès au réseau de transport collectif. Elle correspond généralement à une distance d'accès moyenne ou à une densité d'arrêts de transports collectifs.
- La gestion de la demande en transport (« *demand management* ») qui correspond à l'ensemble des actions et des méthodes des politiques urbaines qui permettent de réduire les déplacements en voiture individuelle. Cette dimension englobe notamment la question du stationnement automobile.

Les impacts de ces différentes dimensions sur les pratiques de mobilités quotidiennes ont été étudiés plus précisément dans de très nombreuses études. Des méta-analyses (Ewing & Cervero, 2010, 2001; Saelens & Handy, 2008; Stead & Marshall, 2001; Stevens, 2017) sont ainsi proposées pour synthétiser les résultats obtenus sur la question, et les points de consensus suivants apparaissent :

- La fréquence de déplacement est influencée majoritairement par les caractéristiques sociodémographiques des individus.
- La possession automobile est également très dépendante de ces caractéristiques sociodémographiques, mais elle dépend également de la densité et de l'accessibilité aux transports collectifs et aux axes routiers majeurs. L'accès au stationnement apparaît aussi comme un facteur favorisant la possession automobile.
- La longueur des déplacements est fortement corrélée à l'accessibilité aux destinations et notamment à la distance au centre. Les mesures de design et de diversité apparaissent également comme importantes.
- L'utilisation des modes alternatifs à l'automobile est principalement liée au design, à la diversité, à l'accessibilité aux destinations et aux transports collectifs.

2.3.2 Consommation résidentielle et forme urbaine

La littérature sur les liens entre forme urbaine et consommation résidentielle est plus récente. À l'échelle de la ville, Steadman (1977) a été parmi les premiers à théoriser les implications de la forme urbaine sur les consommations résidentielles. Il montre ainsi que la densité concentrée n'est pas la meilleure option : une répartition des densités le long des axes de transports est une meilleure solution. Elle permet par exemple des gains solaires passifs, un éclairage et une ventilation naturelle (Steadman, 1977). Certains auteurs soulignent également les avantages d'une « *concentration décentralisée* » (Holden & Norland, 2005), d'autres émettent la possibilité que la relation entre densité et efficacité énergétique n'est pas causale (Lariviere & Lafrance, 1999). Cependant la grande majorité des études s'accordent sur le couple « *densité – efficacité énergétique* » (Maïzia, 2007; Martilli, 2014).

Les premiers travaux ayant une approche désagrégée des bâtiments remontent aux années 60. Gropius (1965), un architecte et urbaniste allemand est l'un des premiers à avoir exploré la question d'une disposition rationnelle des bâtiments garantissant un éclairage et une ventilation naturels. Il soutient que les immeubles de grande hauteur (plus de 10 étages) sont préférables aux immeubles de quelques étages car ils permettent une densité de population élevée tout en préservant l'accès à la lumière et à l'air grâce aux espaces libres. En Angleterre, les travaux du « *Center for Land Use and Built Form Studies* » de Cambridge, menés notamment par Leslie Martin et Lionel March font figure de référence. Ils posent la question suivante : « *What building forms make the best use of land ?* ». Pour répondre à ce questionnement, Martin & March (1972) ont examiné les performances de trois formes simplifiées ou archétypales : les « *pavillons* » (ou tours) indépendants, les « *rues* » parallèles et les « *cours* » tournées vers l'intérieur (Figure 2-18).

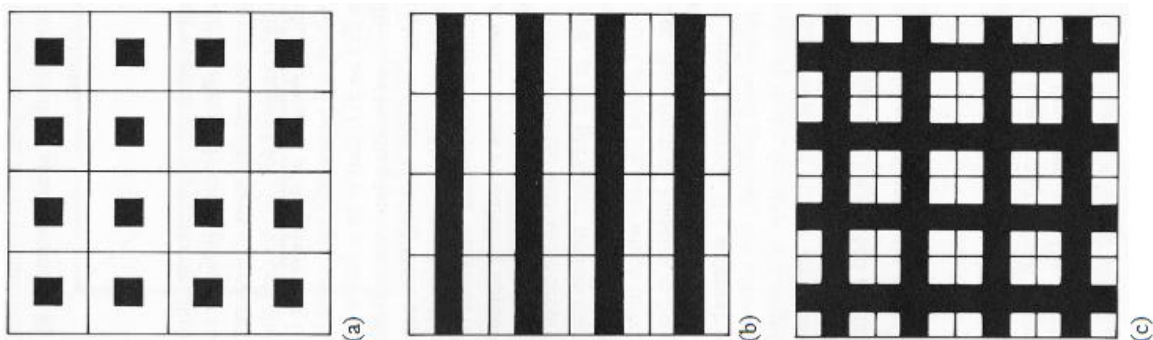


Figure 2-18 : Trois archétypes différents : (a) « pavillons », (b) « rues », et (c) « cours » considérés par Martin et March dans leur travail sur l'utilisation du sol par les bâtiments (d'après Martin et March, 1972).

Le recours à des archétypes permet de limiter la complexité des quartiers réels et d'explorer et comparer l'impact de la forme urbaine seule. Le choix et la définition de ces archétypes sont ainsi devenus très populaires dans les études et ont été largement adoptés par la suite. Steemers et al. (1997) se sont intéressés à la relation entre la forme des bâtiments, les caractéristiques environnementales (rayonnement solaire, circulation de l'air et de la pollution) et les conséquences sur les consommations énergétiques. En utilisant les formes archétypales de Martin et March, ils ont montré que le type « *cours intérieures* » offre une meilleure réponse énergétique aux conditions climatiques de Londres. Ratti et ses collègues (Ratti et al., 2003) confirment également que ces formes génériques, simples et reproductibles, permettent une analyse comparative plus systématique de la forme urbaine. Ils soulignent cependant que les formes proposées par Martin et March sont trop simples et en réalité inexistantes. Avec l'aide des nouvelles techniques informatiques, ils proposent une réévaluation des conclusions de Martin et March avec trois archétypes plus réalistes (Figure 2-19).

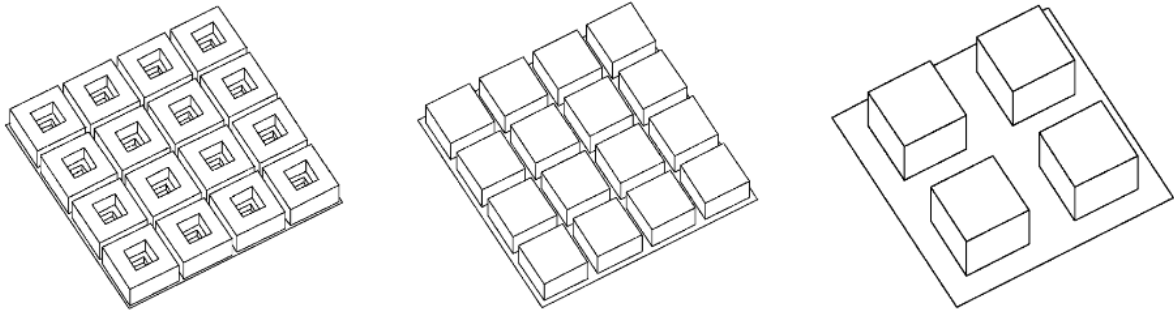


Figure 2-19 : Représentation axonométrique (67:5m * 67:5 m) d'un quartier traditionnel arabe (gauche : cour sur trois étages) et de deux structures pavillonnaires (centre : micro-pavillon, trois étages ; droite : pavillon, six étages) (d'après Ratti et al., 2003).

Ils se basent également sur la méthode « *éclairage thermique* » (LT), développée par Baker et Steemers (1995, 1996, 2000) qui consiste à différencier les zones passives et actives à l'intérieur du bâtiment. Les zones passives sont celles qui sont proches de l'enveloppe du bâtiment : elles peuvent potentiellement bénéficier de la lumière du jour, de la ventilation naturelle et des gains solaires utiles en hiver, mais aussi des pertes de chaleur à travers l'enveloppe et des gains solaires en été. Les zones actives, éloignées de l'enveloppe, nécessitent une utilisation « *active* » de l'énergie, par exemple un éclairage artificiel ou une ventilation mécanique (Figure 2-20).

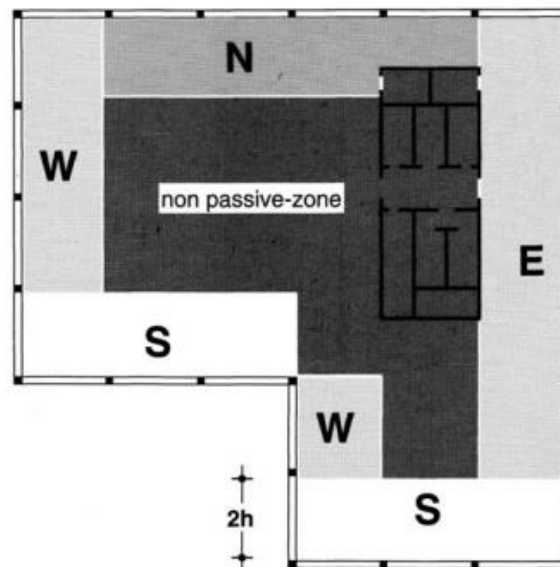


Figure 2-20 : Les zones passives et les zones actives sur un plan (d'après Baker & Steemers, 2000).

Ratti et al. étudient ainsi quatre paramètres de la forme : (1) le ratio surface sur volume qui donne une indication sur la compacité des bâtiments, (2) la densité d'ombre qui correspond au nombre moyen d'heures d'ombre pour un jour et une latitude donnée, (3) le facteur d'éclairage naturel direct dans les rues, (4) et le ratio surfaces passives / surfaces actives qui dépend de la profondeur de plan. Leurs études mettent en évidence deux points majeurs. Tout d'abord, la spécification de la zone climatique dans laquelle se déroule toute recherche environnementale sur la forme urbaine est fondamentale pour l'analyse des résultats. Ensuite, la configuration en « cour » répond mieux aux variables environnementales calculées que les types de

pavillons dans le contexte spécifique des climats chauds et arides. En effet, la combinaison d'une grande surface bâtie et d'une masse thermique élevée, l'accès à la lumière naturelle via la cour et la faible profondeur de plan, et des espaces étroits favorisant l'ombrage des rues, créé un contexte dans lequel des stratégies à faible consommation d'énergie sont possibles grâce à la limitation des charges de climatisation.

Arantes et al. (2013, 2016), proposent six formes urbaines archétypales ayant la même densité de logements (Figure 2-21).

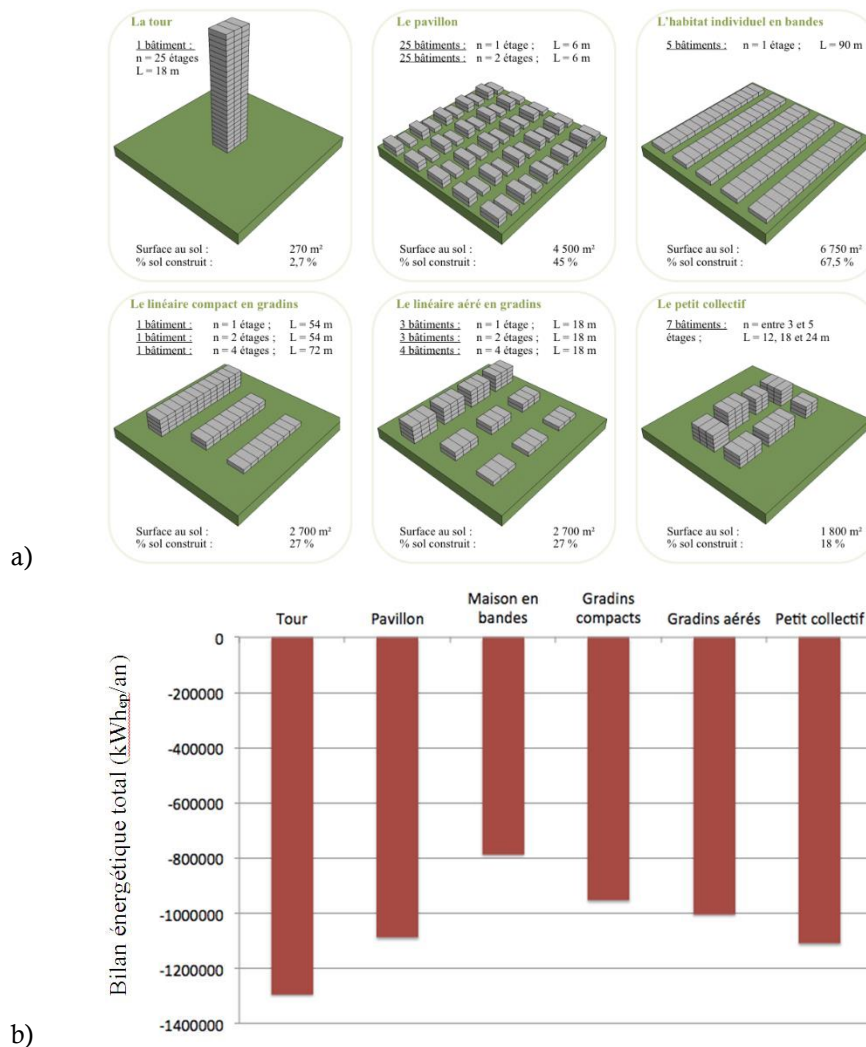


Figure 2-21 : les six formes urbaines archétypales étudiées (a) et leur bilan énergétique annuel (b) (d'après Arantes et al., 2016).

La comparaison de ces archétypes leur permet d'arriver à la conclusion suivante : à densité équivalente et en prenant en compte les capacités potentielles de production énergétique décentralisée, la maison en bande présente la configuration la moins énergivore, tandis que la tour est l'habitat le plus énergivore.

D'autres études se concentrent sur l'analyse de bâtiments ou de quartiers existants. On peut citer en France les travaux de Maïza et ses collègues (Maïzia, 2010; Maïzia et al., 2009) qui étudient 18 îlots « types » de la région Ile de France. Leurs conclusions montrent l'importance de la compacité (rapport entre le volume d'un ensemble urbain avec sa surface d'enveloppe en contact avec l'extérieur). Il montre ainsi l'existence d'une

relation linéaire entre la compacité et les besoins en chauffage du bâtiment : plus un bâtiment est compact, plus les pertes d'énergie sont faibles et plus ses besoins en chauffage sont réduits. Ainsi les consommations de chauffage sont les plus élevées dans les îlots de type individuel dispersé. Les résultats montrent également que les consommations de chauffage sont en moyenne quatre fois plus élevées que celles requises pour le refroidissement. Les travaux de Salat & Nowacki (2010) s'intéressent également à des quartiers existants, en comparant six villes européennes, chinoises et japonaises. Ils étudient l'influence de quatre critères : la densité, le nombre d'étages des bâtiments, le dessin des rues et leurs connectivités. Leurs résultats indiquent que pour les consommations d'éclairage et de chauffage, les tissus européens traditionnels denses et continus sont jusqu'à quatre fois moins énergivores que les nouveaux quartiers de « tours » asiatiques.

Outre la compacité, d'autres indicateurs de forme sont mis en avant. À Londres, Steadman et al. (2014) montrent que pour un climat tempéré océanique, plus la profondeur de plan d'un îlot est élevée, plus les consommations sont importantes. Toujours à Londres, Steemers (2003), dans une étude sur un quartier s'intéresse à l'impact de la configuration des bâtiments avoisinants. Lorsque l'angle d'obstruction augmente (c'est-à-dire lorsque les masques solaires sont plus présents), les consommations d'éclairage et de chauffage augmentent pour compenser la perte d'apports solaires. Eicker et al. (2015), dans une étude d'optimisation d'un nouvel îlot à Munich quantifie les effets de la compacité et des effets d'ombrage urbain. Ainsi la perte de compacité des bâtiments augmente la demande d'énergie pour le chauffage de 10 à 20 %, tandis que l'ombrage entraîne une hausse de 10 %.

Rode et al. (2014) étudient différents quartiers de quatre villes (Londres, Paris, Berlin et Istanbul). Ils confirment l'hypothèse que les différents types de morphologies urbaines ont des demandes en énergies différentes et qu'une augmentation de la densité permet une meilleure efficacité énergétique. La hauteur moyenne des bâtiments apparaît également comme un bon indicateur de l'efficacité énergétique, tout comme la compacité. Si l'on regarde les différentes topologies de morphologies urbaines, les îlots urbains compacts présentent une meilleure efficacité. Enfin, ils montrent que le ratio entre la moins bonne et la meilleure performance des exemples de morphologies urbaines est supérieur d'un facteur six.

Finalement, d'après la revue de la littérature présentée ici, il est possible de retenir les points de consensus suivants (Anderson et al., 2015; Ko, 2013; Mitchell, 2005; Pacheco et al., 2012; Rickwood et al., 2008; Sanaieian et al., 2014) :

- La spécification de la zone climatique est essentielle pour la lecture des résultats. Les résultats ne sont pas uniformes, ils dépendent des conditions climatiques ;
- Les îlots urbains compacts avec cours intérieures (traditionnels des centres-villes européens) et les maisons en bandes présentent les meilleures performances énergétiques, tandis que les îlots de type « tour » présentent la moins bonne performance énergétique ;
- La compacité, la mitoyenneté et le rapport zone passive sur zone active (profondeur de plan) sont les facteurs de forme caractérisant les bâtiments les plus importants au regard de l'énergie consommée.
- L'angle d'obstruction (impactant l'ombrage) est un facteur impactant également la consommation

mais il dépend de la densité et du design du tissu urbain dans lequel s’insère le bâtiment.

2.3.3 Une conclusion est-elle possible ?

De manière générale, les analyses empiriques sur les liens entre la forme urbaine et les consommations énergétiques individuelles (pratiques de mobilités et résidentielles) montrent que l’association existe. Il est cependant difficile de tirer des généralités sur cette question tant les résultats sont souvent contradictoires.

2.3.3.1 Le paradoxe énergétique urbain

« *Le paradoxe énergétique urbain* » est une terminologie proposée par Arantes et al. (2011) et reprise notamment par Bonhomme (2013). Aussi appelé « *paradoxe des surfaces* », il met en lumière la dualité d’un développement dense et compact : les implications énergétiques d’une densification compacte sont partagées entre les avantages liés à la réduction des surfaces déperditives et les inconvénients liés à la réduction des apports passifs (lumière et ventilation naturelles). Le tableau suivant résume les principaux atouts et inconvénients du couple densité/compacité (Tableau 2-2).

Postes de consommations énergétiques individuels	Les avantages d’une forte densité et compacité	Les inconvénients d’une forte densité et compacité
Chauffage	Réduction des surfaces déperditives.	Augmentation des effets d’ombrage qui réduisent les apports solaires passifs.
Climatisation	Réduction des surfaces déperditives	Augmentation du phénomène d’îlot de chaleur urbain
Éclairage et ventilation	Augmentation des effets d’ombrage qui réduisent les apports solaires passifs	Peu de surfaces disponibles pour les systèmes de rafraîchissement naturels (végétation, ...)
		Augmentation des effets d’ombrage qui réduisent les apports solaires passifs
		Espacement entre les bâtiments qui ne permet pas la circulation du vent et ne favorise pas la ventilation naturelle
Transport	Réduction du nombre et des distances de déplacements domicile-travail	Des mobilités occasionnelles plus longues (pour accéder aux espaces verts par exemple)
	Utilisation plus importante des modes doux et des TC	Des problèmes de congestions et une forte pollution
	Taux de possession automobile plus faible	

Tableau 2-2 : Le paradoxe énergétique urbain (adapté de Bonhomme, 2013).

2.3.3.2 Des difficultés conceptuelles et méthodologiques

Plusieurs difficultés majeures, à la fois conceptuelles et méthodologiques expliquent la difficulté d'établir une conclusion définitive sur les liens entre forme urbaine et consommations énergétiques individuelles.

Des définitions, des mesures et des méthodes différentes selon les études

La première difficulté concerne les définitions et les mesures. Silva et al. (2017b) soulignent ainsi, en parlant des attributs de la forme urbaine, que « *bien qu'ils puissent être invoqués avec des significations différentes (par exemple, la compacité a un sens différent selon l'échelle d'analyse), il peut également arriver que des attributs urbains qui apparaissent souvent ensemble soient pris comme synonymes (par exemple, accessibilité et connectivité)* ». La définition de certains attributs de la forme reste ainsi ambiguë et rend plus difficile la lecture et la comparaison des résultats. Silva et al. (2017b) soulignent également la diversité des indicateurs caractérisant les attributs de la forme urbaine. La compacité peut ainsi correspondre au ratio de la surface du bâtiment par rapport au volume (utilisé par exemple par Ratti et al. (2005)) mais peut également correspondre au ratio de la surface du bâtiment par rapport au volume à la puissance 2/3 utilisé par Bourdic et al. (2012). Ainsi, « *il existe de nombreuses façons de mesurer une propriété urbaine, et un seul attribut urbain peut nécessiter plus d'un indicateur pour être correctement décrit* » (Silva et al., 2017b). La figure de synthèse des attributs, de leurs indicateurs et des métriques proposés par ces auteurs illustre bien la grande diversité existante pour décrire la forme urbaine (Figure 2-22).

Partie 1 – La forme urbaine face à la transition énergétique

Focus Area	Factor	Indicator	Relevance Scale	Metric	Sources
Built environment	Density	Intensity of the built environment	Bl, N, and C	Population/households/jobs per land area	P. W. G. Newman and Kenworthy (1989), Frank and Pivo (1994), and Porter et al. (2013)
		Floor space index	S, Bl, N, and C	Gross floor area/total ground area	Pont and Haupt (2005)
		Ground space index	S, Bl, N, and C	Building coverage area/total ground area	Pont and Haupt, (2005)
	Diversity	Building height indicator	All	Number of floors	Pont and Haupt, (2005)
		Subdivision indicator	S, Bl, N, and C	Number of parcels/total ground area (square meter)	Bourdic, Salat, and Nowacki (2012)
		Housing size Dissimilarity index	S, Bl, N, and C N and C	Number of bedrooms $\{(\sum_j^k \sum_l^8 (X_l/B_l))/K\}$, where K = number of developed hectare grid cells in tract and $X_l = 1$ if land-use category of neighboring hectare grid cell differs from hectare grid cell j (0 otherwise)	Wilson (2013) Cervero and Kockelman (1997)
	Green areas	Entropy	N and C	$\{-\sum_k \{P_k \ln(P_k)\}/\ln(j)\}/K$, where P_k = proportion of land-use category j within a radius of the developed area surrounding grid cell k , j = number of land-use categories, and K = number of actively developed hectares in tract	Cervero and Kockelman (1997)
		Structural diversity	N and C	$I = \frac{1}{cat} \sum_{i=1}^{cat} \left[1 - \frac{N_{entitites_{cat_i}}}{N_{entitites_{total}}} \right]^2$	Bourdic, Salat, and Nowacki (2012)
		Mixed-use index	Bl, N, and C	Residential gross floor area/gross floor area	van den Hoek (2008)
	Compactness	Spatial distribution index	N and C	$I_{sd} = \frac{Q}{Q-1} \left[1 - \sum_{district=1}^Q \left(\frac{A_i}{S_i} \right)^2 \right]$, where Q districts exist in the city, each with an overall area of S_i (square meter) and A_i of green areas (square meter)	Bourdic, Salat, and Nowacki (2012)
		Ratio of green space	Bl, N, and C	Percentage of green space area in the total area of the parcel	Ko and Radke (2014)
		Green area geometry	Bl, N, and C	Perimeter/area	Vaz Monteiro et al. (2016)
	Shading	Surface-to-volume ratio	Bu, Bl, N, and C	$C = S/V$	Ratti, Baker, and Steemers (2005)
		Size factor (SF)	Bu, Bl, N, and C	$SF = V^{1/3}$	Bourdic, Salat, and Nowacki (2012)
		Form factor (FF)	Bu, Bl, N, and C	$FF = S/V^{2/3}$	Bourdic, Salat, and Nowacki (2012)
Passivity	UHA	Bu and S	$\tan(UHA) = H/W$	Baker, Hoch, and Steemers (1992)	
	OSV	Bu and S	$\cos(OSV) = H/W$	Ratti, Baker, and Steemers (2005)	
	Sky view factor	Bl, N, and C	Proportion of unobstructed sky at a given location	Coseo and Larsen, (2014)	
Orientation	Passive/nonpassive ratio	All	Passive areas/nonpassive areas	Ratti, Baker, and Steemers (2005)	
	Plan depth	All	Volume/exposed wall area	Evans, Liddiard, and Steadman (2017)	
	Orientation	Bu and S	Degrees, radians	—	
Urban networks	Connectivity	Intensity of network intersections	N and C	Number of intersections per area unit; average distance between intersections	Bourdic, Salat, and Nowacki (2012)
		Cyclomatic number	N and C	Number of primary loops in a network: $\mu = L - N + 1$, where L is the number of links, corresponding to the different sections of streets between every intersection, and N is the number of nodes, corresponding in road networks to intersections	Bourdic, Salat, and Nowacki (2012) and Chen, Claramunt, and Ray (2014)
	Accessibility	Connectivity β Index	N and C S, Bl, N, and C	Percentage of T-intersections $\beta = e/n$ ($0 \leq \beta \leq (n-1)/2$), where β is the average number of edges (e) per node (n) in a given street network	Baran, Rodriguez, and Khattak (2008) Chen, Claramunt, and Ray (2014)
		α Index	N and C	Alpha index (α) is defined as the proportion between the actual and maximal number of circuits in a fully connecting planar network $\alpha = 2\mu/(n-1)(n-2) = (e-n+q)/(2n-5q)$ ($0 \leq \alpha \leq 1$)	Chen, Claramunt, and Ray (2014)
		Active accessibility	Bl, N, and C	$A_{act,i} = \sum_j g(W_j)f(c_j)$, where W_j is the activity to reach in zone j and c_j is the generalized cost of reaching zone j from zone i	Papa and Coppola (2012)
	Centrality	Passive accessibility	Bl, N, and C	$A_{pas,i} = \sum_j g(W_j)f(c_j)$, where W_j are the potential "consumers" of the activity to be reached in zone i and c_j is the generalized cost of reaching zone i from reach in zone j	Papa and Coppola (2012)
		DivAct	Bl, N, and C	$DivAct = \frac{\sum_y (Act_y * f_y)}{\sum_y f_y}$, where y is the activity type, Act_y represents the existence or not of the activity type y inside accessibility boundaries ($Act_y(0; 1)$) and f_y the potential use frequency of the activity type	C. Silva (2013)
		Reach	S, Bl, N, and C	$Reach[j] = \sum_{i \in G-d(i,j) \leq d} W[j]$, where $d(i, j)$ is the shortest path distance between nodes and in G , and $W[j]$ is the weight of a destination node j	Sevtsuk and Mekonnen (2012)
	Proximity to PT	Proximity Jobs-housing dispersal index	Bl, N, and C N and C	Linear distance (meter) from a tract to CBD Ratio of the average distance of jobs from the CBD (jobs dispersal) to the average distance of workers' households from the CBD (housing dispersal)	Ewing and Cervero (2010) Brotchie et al. (1996)
		Distance to PT	Bl, N, and C	Average shortest path from residences or work to nearest PT station or stop	Ewing and Cervero (2010)
Design		PT route density	Bl, N, and C	Length of PT routes per land area	Ewing and Cervero (2010)
	Pedestrian provisions	S, Bl, N, and C	Proportion of blocks with sidewalks, sidewalk width	Cervero and Kockelman (1997)	
	Provision of trees	S, Bl, N, and C	Proportion of blocks with planting strips and trees	Cervero and Kockelman (1997)	
	Shading effect of vegetation	Bu, S, Bl, and N	Sum of tree heights with different orientations	Ko and Radke (2014)	
Proximity to Design	Cycling provisions	S, Bl, N, and C	Proportion of blocks with cycling lanes, bicycle lanes per developed acre	Cervero and Kockelman (1997)	
	Parking lots provisions	S, Bl, N, and C	Proportion of nonresidential parcels with off-street parking, on-street and side parking	Cervero and Kockelman (1997)	

Note. CBD = central business district; PT = public transport; UHA = Urban Horizon Angle; OSV = Obstruction sky view. Key: Bu – Building, S – Street, Bl – Block; N – Neighborhood, C – City Legend: Bu – Building, S – Street, Bl – Block; N – Neighborhood, C – City; DivAct = diversity of activity.

Figure 2-22 : Indicateurs et métriques de la forme urbaine influençant la demande d'énergie dans les villes (d'après Silva et al., 2017b).

Outre les attributs de la forme urbaine, la définition des « quartiers types » varie considérablement d'une étude à une autre (Stead & Marshall, 2001). Il apparaît que les attributs utilisés pour les définir sont subjectifs, et

qu'un même type peut rendre compte de différentes variables intégrées. À l'inverse, des variables similaires peuvent aboutir à des désignations différentes pour un même espace. L'application de différentes méthodes de recherche rend également difficile la comparaison des résultats de différentes études (Schwanen et al., 2004). La diversité des modèles énergétiques résidentiels (voir partie 3.3.2.1) conduit à des évaluations différentes : certains considèrent le bâtiment comme une zone thermique unique tandis que d'autres considèrent plusieurs zones, etc. Du côté des mobilités, Troy (1992) remet en question la méthode de calcul des distances de déplacement. Pour lui, les études qui s'appuient sur des longueurs de déplacements calculées à partir de distances entre les centroïdes de zones sont approximatives : tout d'abord, elles ne tiennent pas compte des réseaux et selon la taille des zones, la distance réelle de déplacement peut être très différente. Stead & Marshall (2001) ont également insisté sur la difficulté de prise en compte des réseaux dans les différentes méthodes.

Des territoires avec des spécificités locales

La deuxième difficulté majeure concerne les territoires étudiés et leurs spécificités. De nombreux travaux étudiant le rôle de la forme urbaine sur les consommations énergétiques individuelles ont recours à des territoires d'études « réels » plutôt qu'à des archétypes, notamment concernant les impacts sur les mobilités quotidiennes. Chacun de ces territoires présente des attributs uniques que ce soit du point de la forme urbaine ou des caractéristiques sociodémographiques. La disponibilité et la variabilité des données disponibles pour chaque territoire sont également soulignées par Stead & Marshall (2001). Ces spécificités locales posent tout d'abord la question de la comparabilité des résultats mais également de leur généralisation.

Un croisement des facteurs impactant la consommation énergétique

Les facteurs qui impactent la consommation d'énergie individuelle sont nombreux et touchent à différents domaines (voir partie 2.1). La difficulté d'isoler le facteur « forme urbaine » des autres facteurs impactant les consommations d'énergie est une des limites de nombreuses études. Le rôle majeur des caractéristiques sociodémographiques est ainsi mis en avant, tout comme le climat ou encore la performance des systèmes. Giuliano & Narayan (2003) ont conclu leur étude en soulignant que s'il était possible d'être certain que la variable de densité ne capture pas d'une manière ou d'une autre les caractéristiques de la population liées au revenu, alors seulement on pourrait tirer une conclusion sur le rôle de la densité. De la même manière, Silva et al. (2017b) ont conclu sur le fait que, malgré de nombreuses études sur la question, tous les facteurs influençant ne sont pas abordés simultanément. La complexité des attributs au sein même du facteur « forme urbaine » est également mise en avant. Pour Silva et al. (2017b), « l'environnement urbain est le résultat d'un ensemble d'attributs entrelacés, dont la compréhension est souvent peu claire ». Schwanen et al. (2004) ont insisté sur la mise en avant de certains attributs de la forme métropolitaine comme le monocentrisme et le polycentrisme au détriment d'autres, potentiellement aussi importants. Pour Ewing (1996) qui s'est intéressé aux déplacements piétons, les attributs de la forme peuvent sembler insignifiants lorsqu'ils sont testés individuellement, mais très significatifs lorsqu'ils sont combinés dans une mesure globale. Stead & Marshall (2001) ont insisté sur les conséquences de cette complexité : il n'est pas possible malgré de fortes corrélations entre certaines variables de conclure sur l'existence d'une relation de cause à effet. La corrélation peut

identifier un lien entre les variables, mais ce lien peut être une réponse à une autre variable, non prise en compte. Les auteurs donnent l'exemple de la corrélation entre la consommation énergétique des transports et la densité de population : si cette corrélation est forte, elle n'implique pas un lien direct entre les deux variables. Le taux de possession automobile ou les revenus pourraient être des variables intermédiaires. Le maintien constant de toutes les autres variables est un préalable nécessaire à l'identification formelle des liens entre la forme urbaine et les consommations individuelles. En 1997, Banister et al. (1997) soulignaient déjà cette limite : « *Même si des relations statistiques solides et cohérentes ont été établies pour chaque ville, cela n'implique pas une causalité. [...] L'étape suivante consiste à établir un cadre théorique et pratique plus clair dans lequel cette causalité peut être établie. Ce n'est qu'alors que nous pourrions conclure de manière substantielle que l'objectif d'une ville durable peut ou ne peut pas être atteint par des politiques d'aménagement du territoire* ».

Un croisement des échelles d'analyses

Oliveira et Silva (2013) ont souligné que la principale limite des recherches portant sur le lien entre énergie et forme urbaine provient du manque d'intégration des différentes disciplines concernées. Ils concluent leur travail ainsi : « *La recherche en énergie adopte des visions sectorielles du problème et n'est pas capable de prendre en compte efficacement la dimension spatiale des villes et leurs différentes échelles* » (Oliveira & Silva, 2013). La revue de littérature effectuée dans la partie précédente traduit bien cette difficulté : il existe très peu d'études combinant le secteur des transports et celui du bâtiment. Batty (2008) a d'ailleurs remarqué qu'il n'y a quasiment aucune étude permettant d'établir un lien entre la forme d'un bâtiment et sa situation dans la ville. Les évaluations des consommations prennent en effet place à des échelles différentes : à l'échelle de la ville et des quartiers pour les mobilités quotidiennes, à l'échelle des quartiers et des bâtiments pour les consommations résidentielles. Le lien entre les différentes échelles semble ainsi difficile à trouver (Figure 2-23).

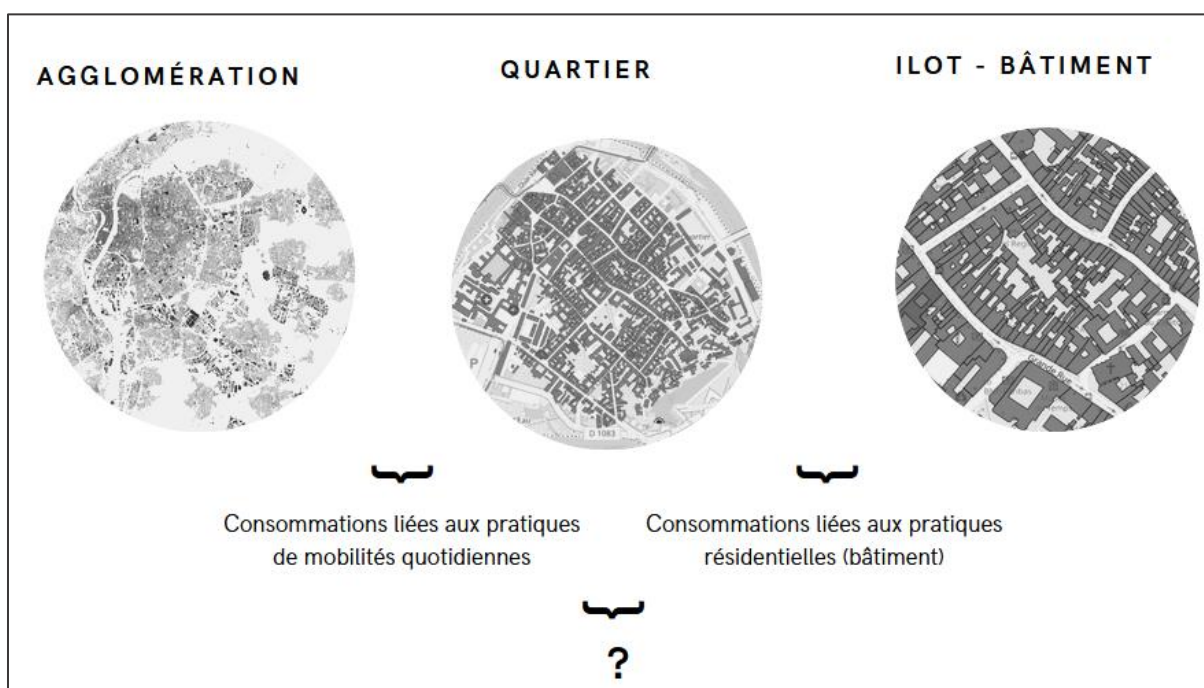


Figure 2-23 : La problématique du croisement des échelles spatiales mobilisées.

2.4 Synthèse du chapitre 2

Dans ce chapitre, nous avons tout d’abord vu l’importance des consommations énergétiques individuelles. Environ 50 % de l’énergie finale consommée en France est utilisée directement par les individus, c’est à dire dans les bâtiments pour les besoins de chauffage, d’éclairage ou encore d’électricité spécifique (29 %) et dans les transports pour se déplacer quotidiennement (20 %). Les pratiques des individus apparaissent ainsi comme un champ d’action majeur permettant de réduire significativement la consommation globale d’énergie.

Nous avons également vu que la forme urbaine est le support multi-échelle de ces pratiques individuelles : elles prennent place à l’échelle du bâtiment, du quartier et de l’agglomération. À ces échelles respectivement, les termes d’architecture bâtie, de tissu urbain et de structure urbaine sont utilisés pour désigner la forme urbaine. En tant que support, la forme urbaine est un des déterminants des pratiques de mobilités et des pratiques résidentielles. Elle impacte ainsi directement les consommations d’énergie associées. Si ce constat est largement admis, la revue de littérature effectuée ci-dessus montre une absence de consensus sur la nature des liens entre forme urbaine et consommations énergétiques. La figure suivante propose une synthèse de cette riche littérature (Figure 2-24).

	Consommations bâtiments	Consommations transports
Structure urbaine		
↑ Taille	NC	↑
↑ Compacité / Etalement	NC	↑↓
↑ Nombre de centre	NC	↑↓
Tissu urbain		
↑ Densité	↑↓	↑↓
↑ Diversité	NC	↓
Op Design	↑↓	↓
↑ Distance au centre	NC	↑
Architecture bâtie		
↑ Compacité	↑↓	NC
↑ Profondeur de plan	↑↓	NC
↑ Mitoyenneté	↓	NC

Op : Optimisation NC : non concerné ↑ Augmentation ↓ Diminution

Figure 2-24 : Les impacts des principaux attributs de la forme urbaine sur les consommations énergétiques individuelles (adapté de Bonhomme, 2013 et Silva et al., 2017).

Il apparaît ainsi que le paradoxe énergétique urbain ne s’applique pas uniquement à la densité. Le nombre de centres des structures urbaines par exemple peut entraîner à la fois une augmentation et une diminution de la consommation énergétique liées aux mobilités. Plusieurs difficultés ont été identifiées expliquant l’ambiguïté persistante des résultats :

- Les définitions, les mesures et les méthodes utilisées diffèrent selon les études, ce qui pose le problème de la comparabilité des résultats ;
- Les territoires étudiés présentent également des spécificités locales, ce qui pose encore une fois la question de la comparabilité des résultats mais aussi celle de leur généralisation ;
- Les consommations énergétiques sont le résultat d'un croisement de nombreux facteurs. Isoler l'effet d'un unique facteur, la forme urbaine, semble difficile ;
- Enfin, la recherche sur cette question reste sectorielle et ne prend pas efficacement en compte la dimension spatiale des villes et leurs différentes échelles.

Ainsi, il apparaît pertinent de proposer de nouvelles approches pour questionner ces interactions et apporter un éclairage neuf sur cette question.

Chapitre 3

Méthodologie d'évaluation des liens entre la forme urbaine et les consommations énergétiques individuelles

Le chapitre précédent présente la littérature existante sur les liens entre la forme urbaine et les consommations énergétiques individuelles. Cette revue de la littérature met en évidence une absence de consensus sur la nature de ces liens et l'existence d'un « *paradoxe énergétique urbain* ». Ainsi, l'objectif de ce chapitre est de proposer une démarche de recherche qui permette de dépasser les limites identifiées et d'explicitier la méthodologie associée. La première partie de ce chapitre reprend les principaux points de la revue de la littérature afin de dégager une problématique et de proposer une démarche de recherche qui permet d'aller au-delà des connaissances actuelles. La seconde partie de ce chapitre explicite la méthodologie de génération de villes archétypales. Enfin la dernière partie de ce chapitre positionne et présente les modèles utilisés pour simuler les mobilités quotidiennes et les usages énergétiques résidentiels.

3.1 Problématique et démarche de recherche

Cette première section introduit dans un premier temps la problématique de ce travail et les hypothèses de recherches proposées pour y répondre. Dans un second temps l'approche modélisatrice multi-échelle désagrégée proposée pour évaluer les liens entre la forme urbaine et les consommations énergétiques individuelles est présentée.

3.1.1 Problématique et hypothèses de recherche

La revue de la littérature nous a montré l'importance des liens entre la forme urbaine et les consommations énergétiques individuelles. L'analyse des différentes études sur le sujet montre cependant que cette relation est complexe et que les résultats restent ambigus. Quatre difficultés principales ont été identifiées :

- Les définitions, les mesures et les méthodes utilisées sont différentes selon les études ;
- Les territoires étudiés présentent des spécificités locales ;
- Les consommations énergétiques sont le résultat d'un croisement de nombreux facteurs et isoler l'effet d'un unique facteur, la forme urbaine, semble difficile ;
- Enfin, la recherche sur cette question reste sectorielle et ne prend pas en compte efficacement la dimension spatiale des villes et leurs différentes échelles.

Ainsi, au regard de ces difficultés, une problématique de recherche a été définie : comment évaluer l'impact de la forme urbaine (à toutes ses échelles) sur les consommations énergétiques des individus en incluant à la fois le secteur des transports et celui du bâtiment, en isolant le facteur forme et en s'affranchissant des spécificités territoriales ?

Pour répondre à cette problématique, nous posons l'hypothèse principale suivante : la localisation résidentielle des individus dans une ville modifie leurs pratiques de consommations énergétiques. Cette hypothèse implique en réalité diverses sous-hypothèses, pouvant se décliner en fonction des échelles considérées (Figure 3-1). À l'échelle croisée du bâtiment et du quartier, nous posons les deux sous-hypothèses suivantes :

- Deux individus identiques résidant dans un même tissu, auront des pratiques et des consommations résidentielles différentes selon la forme architecturale bâtie (sous-hypothèse 1a) ;
- Deux individus identiques résidant dans une même forme architecturale bâtie auront des pratiques et des consommations résidentielles différentes selon le tissu urbain (sous-hypothèse 1b).

À l'échelle croisée du quartier et de l'agglomération nous posons également deux sous-hypothèses :

- Deux individus identiques résidant dans un même tissu, auront des pratiques et des consommations liées aux mobilités quotidiennes différentes selon la structure urbaine (sous-hypothèse 1c) ;

- deux individus identiques résidant dans une même structure urbaine auront des pratiques et des consommations liées aux mobilités quotidiennes différentes selon le tissu urbain (sous-hypothèse 1d).

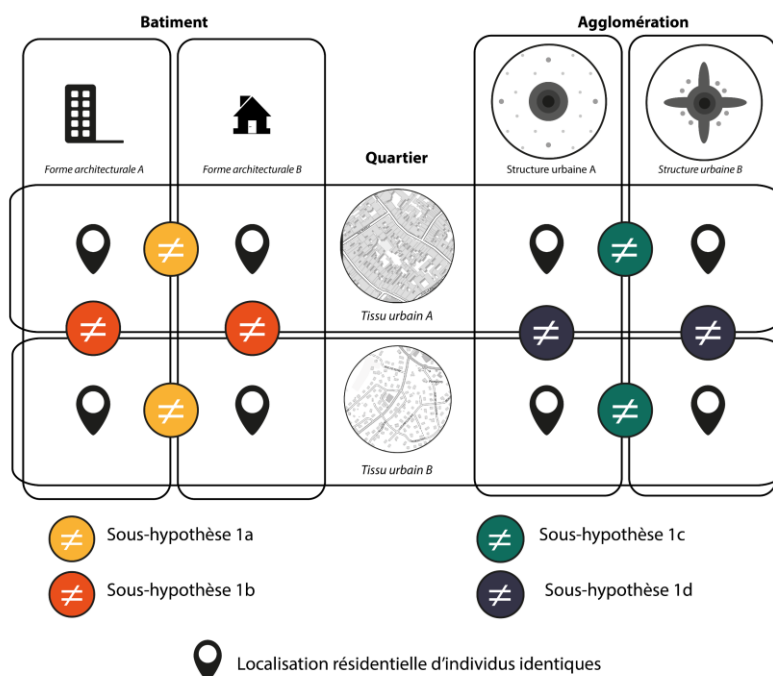


Figure 3-1 : Déclinage de l'hypothèse principale de recherche selon les échelles considérées.

En lien avec cette première hypothèse principale, nous posons une seconde hypothèse. Selon la localisation résidentielle des individus, il peut exister des effets de compensations entre les consommations liées aux pratiques de mobilités quotidiennes et les consommations résidentielles. Autrement dit, la consommation énergétique résidentielle élevée d'un individu peut être compensée par une consommation énergétique liée aux mobilités quotidiennes faible.

3.1.2 Une approche modélisatrice multi-échelle pour évaluer les effets de la forme urbaine sur les consommations énergétiques individuelles

3.1.2.1 Évaluation et modélisation : deux notions clés

Évaluation

L'évaluation est définie par le conseil scientifique de l'évaluation comme une démarche « *qui essaye d'appréhender d'un point de vue principalement externe les effets et/ou les valeurs d'une action considérée* » (Conseil Scientifique de l'Evaluation, 1996). Concernant spécifiquement les politiques publiques, l'évaluation est définie par le décret 98-1048 du 18 novembre 1998 comme étant l'action de « *rechercher si les moyens juridiques, administratifs ou financiers mis en œuvre permettent de produire les effets attendus de cette politique et d'atteindre les objectifs qui lui sont fixés* ». Cette démarche se différencie de l'Audit ou du contrôle, qui ont pour objectif de

vérifier la mise en conformité d'un système en se référant à un ensemble de normes. En aménagement du territoire, dont une des aspirations principales consiste à fabriquer et à renouveler l'urbain, les évaluations urbaines constituent une manne importante de connaissances. Ainsi, « *l'évaluation des opérations d'aménagement, relevant du champ des projets territoriaux de développement durable, constitue une condition essentielle, permettant de mieux conjuguer le sens et les finalités des politiques et actions entreprises et d'en mesurer les impacts sur le territoire dans un objectif de développement durable.* » (ADEME, 2017). Les méthodes d'évaluations croisent des approches quantitatives et qualitatives, en fonction des objectifs et de l'objet. Les évaluations quantitatives recourent généralement à des indicateurs de performances afin de comparer les résultats obtenus aux objectifs initiaux. D'autres distinctions existent, et il est courant de distinguer plusieurs types d'évaluation en fonction du moment auquel elles sont menées : elles peuvent *ex-ante*, c'est-à-dire réalisées avant la conception du projet, comme préalable à la décision. Elle peut être réalisée *ex-post*, c'est-à-dire après la réalisation du projet afin d'en mesurer les effets et d'en tirer des leçons pour les prochains projets. Enfin elle peut également être menée tout au long du projet, afin de mesurer sa progression et de préconiser des ajustements au fur et à mesure de l'avancée.

Une autre distinction est faite en fonction des dimensions de l'évaluation reflétées prioritairement : dimension cognitive, dimension normative ou dimension instrumentale (Boutaud, 2005). La dimension cognitive correspond à la formulation d'objectifs et à la mesure des effets d'une politique par rapport à ces mêmes objectifs. La dimension normative, à l'inverse de la dimension cognitive ne s'intéresse pas à la mesure des effets (plutôt quantitatifs) mais plutôt à la formulation d'une valeur (généralement qualitative). La dimension instrumentale est une dimension utilitaire : elle vise à mesurer l'utilité, l'efficacité et l'efficience des mesures appliquées. Ces trois dimensions ne sont pas exclusives et peuvent être déclinées en sous-dimensions. Enfin, une évaluation peut également se distinguer en fonction des destinataires : on distingue usuellement l'évaluation récapitulative de l'évaluation endoformative. L'évaluation récapitulative s'adresse à des preneurs de décisions désengagés de la partie opérationnelle et porte principalement sur les résultats « *concrets* » et non sur les moyens mis en œuvre pour les atteindre. Les évaluations endoformatives s'adressent aux preneurs de décision engagés dans les processus opérationnels (comme les services techniques) et s'intéressent également aux processus mis en œuvre. Ruprich-Robert & Bencivenga (2002) proposent une synthèse des différentes démarches d'évaluation en fonction du moment, des finalités et des destinataires (Tableau 3-1).

Critère de classification	Évaluation	
	Type	Définition et objectif
En fonction du moment	Évaluation a priori, ex-ante, prospective	Préalable à la décision Objectif : éclairer les choix, intéressante pour les instances délibératives chargées de suggérer ou d'arrêter les décisions publiques
	Évaluation concomitante, ongoing, in-itinere	Réalisée au fur et à mesure de l'exécution des politiques publiques Objectif : surveiller le déroulement des actions, éviter les dérives, constater les lacunes, préconiser des ajustements et des corrections
	Évaluation a posteriori, ex-post, rétrospective	Évaluation des décisions déjà prises Objectif : en tirer les enseignements pour les prochaines politiques
En fonction des finalités	Évaluation normative	Analyser ce que la politique devrait être L'attention est portée sur le problème à résoudre
	Évaluation explicative	Analyser les relations entre les mesures mises en œuvre et leurs effets
	Évaluation comparative	Repérer les changements produits par la mise en œuvre de l'action sur une population ou une situation
	Évaluation analytique	Connaître les processus à l'œuvre dans la réalisation d'une action ou la mise en œuvre d'un service
	Évaluation dynamique	Prendre appui sur les résultats de l'analyse pour modifier l'action au fur et à mesure de son déroulement et adapter l'organisation en conséquence
En fonction des destinataires	Évaluation récapitulative	Permettre à des personnes étrangères à l'application du programme de se forger une opinion sur la globalité du programme sans se référer uniquement à ceux qui la mettent en œuvre. C'est une aide à la décision stratégique.
	Évaluation endoformative	Informar les responsables du programme afin qu'ils modifient et améliorent leurs modes d'action. C'est une aide opérationnelle, un outil de gestion.

Tableau 3-1 : Récapitulatif des différents types d'évaluation (Source : François (2019) d'après Ruprich-Robert & Bencivenga (2002)).

Dans cette thèse, nous proposons une évaluation de la forme urbaine actuelle, résultats d'évolutions et de décisions déjà prises, a posteriori. L'objectif est en effet de comprendre et d'analyser les liens existants entre la forme urbaine et les consommations énergétiques : c'est un objectif analytique et explicatif. Cette compréhension est pour nous un préalable nécessaire à la mise en œuvre de la transition énergétique (voir

partie 1.2.3). Nous ne nous situons cependant pas dans une évaluation prospective et aucun scénario de développement de la forme urbaine ne sera proposé et évalué ici.

Modèle, modélisation et simulation

Le terme de modèle est utilisé dans de nombreux cas et désigne des notions diverses. Dans le langage courant un modèle est « *ce qui est donné pour servir de référence* »¹³. Il peut concerner un lieu, un objet ou une personne que l'on propose à titre d'exemple car « *possédant certaines qualités ou caractéristiques propres à en faire le type d'une catégorie* ». Il peut également désigner une « *représentation schématique d'un processus, d'une démarche raisonnée* ». Ces définitions généralistes montrent qu'il existe deux manières de concevoir la notion de modèle, divergence que l'on retrouve en géographie urbaine :

- Le modèle qui sert de référence, idéal qui est élaboré en recherche d'une solution optimale. Appliqué à l'urbain, il correspond aux modèles d'utopies urbaines, c'est-à-dire aux villes idéales au regard de différents critères (sociaux, environnementaux, ...)
- Le modèle qui « *est une représentation simplifiée d'une réalité, qui lui donne du sens et permet de mieux la comprendre* » (P. Haggett et R.J. Chorley, 1967). Appliqué à l'urbain, ce modèle est une simplification des villes telles qu'elles sont à un instant donné.

Les modèles dont nous traitons dans ce travail renvoient bien à cette seconde définition. Ils nous permettent de simplifier et d'appréhender une réalité trop complexe : la ville, sa forme et son fonctionnement. En se substituant aux méthodes expérimentales classiques, la modélisation permet aux sciences humaines de faire des expérimentations, d'analyser des phénomènes complexes et de tirer des généralités. Chaque modèle est spécifique, car construit suivant un objectif, une vision : ainsi un modèle est « *une approximation très subjective qui ne tient pas compte de toutes les observations et de toutes les mesures. Et c'est justement la raison de leur intérêt : ils masquent les détails et permettent de mieux focaliser sur les aspects fondamentaux de la réalité, du moins ceux que l'on cherche à mieux comprendre ou à simuler* » (Antoni, 2013). La modélisation constitue le travail d'élaboration du modèle. Elle se distingue de la simulation, qui n'est qu'une étape du processus de modélisation et qui correspond à l'opération d'exécution du programme sur un ordinateur permettant de simuler le phénomène souhaité. Pour exécuter ce programme, il faut donner des valeurs initiales aux variables indépendantes. Ainsi, « *le fait d'attribuer des valeurs aux variables et d'exécuter le programme constitue une simulation* » (Van Der Maren, 2014).

¹³ Larousse en ligne (<https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/mod%C3%A8le/51916>)

3.1.2.2 Les propositions

Modélisation de villes archétypales

Nous proposons tout d'abord de recourir à des villes archétypales comme terrains d'études. Ces villes doivent répondre à certains critères au regard des objectifs énoncés :

- Les villes archétypales doivent correspondre à des agglomérations françaises « *standardisées* », c'est-à-dire qu'elles doivent être représentatives des villes en France mais qu'elles ne doivent pas avoir d'attributs propres à une localisation ou à une histoire particulière. Cela permet de s'affranchir des spécificités territoriales et de tirer des conclusions générales sur les effets de la forme urbaine sur les consommations énergétiques ;
- Les villes archétypales doivent être entièrement paramétrables, afin de pouvoir isoler les effets du facteur forme urbaine des autres facteurs impactant les consommations énergétiques. À titre d'exemple, les conditions météorologiques doivent être paramétrées de manière identique dans les différentes villes archétypales ;
- Les villes archétypales doivent intégrer l'ensemble des éléments nécessaires à la modélisation des pratiques individuelles impactant la consommation énergétique. Ces éléments sont les suivants : les bâtiments, les réseaux de déplacements et les aménités fonctionnelles génératrices de déplacements ;
- Les villes archétypales doivent être relativement réalistes afin de modéliser des consommations énergétiques qui puissent être comparées à des consommations réelles ;
- Enfin, les villes archétypales doivent présenter des formes urbaines variées, et ce à toutes les échelles identifiées (agglomération, quartier et îlot) afin de pouvoir explorer les effets de la combinaison de ces formes.

Concernant ce dernier point, la synthèse de la littérature proposée dans la partie 2.4 nous permet d'identifier les différentes dimensions à faire varier : la taille, la compacité et le nombre de centres concernant les structures urbaines ; la densité, la diversité, le design et la distance au centre concernant les tissus urbains ; et la compacité, la profondeur de plan et la mitoyenneté pour les architectures bâties. Au sein de ces dimensions, certaines n'ont pas été conservées et ne seront pas étudiées ici, constituant une limite à notre travail :

- La taille tout d'abord des villes archétypales sera fixe, avec des emprises et des surfaces au sol bâties identiques. Ne pas prendre en compte cette dimension permet de ne pas multiplier le nombre de territoires d'étude à générer et de mieux comprendre le rôle des deux autres dimensions de la structure urbaine interrogées : le nombre de centres et l'étalement ;
- Le design des tissus urbains ne sera également pas pris en compte. L'intégration de cette dimension est en effet très complexe puisqu'elle nécessite une modélisation avec une résolution spatiale très fine des tissus urbains, avec par exemple la modélisation des rues avec des trottoirs, des passages piétons, des places de stationnement, etc. Ce niveau de finesse nous apparaît trop coûteux en temps et trop contraignant à l'échelle d'une agglomération.

Concernant le choix de l'emprise des villes archétypales, nous modélisons des aires urbaines de taille importante, similaires aux aires urbaines françaises de type « *grande aire d'attraction*¹⁴ », c'est-à-dire dont la population est comprise entre 200 000 et 700 000 habitants. La modélisation de villes petites ou moyennes limiterait l'analyse, ne possédant généralement qu'un centre et non plusieurs. La modélisation d'une aire urbaine très importante, comme Paris, entraînerait un fort allongement des temps de simulation, notamment pour la simulation des pratiques de mobilités quotidiennes. L'emprise spatiale des grandes aires d'attraction en France métropolitaine est comprise entre 600 et 5700 km² avec une médiane à 1600 km² : nous modéliserons des aires urbaines ayant une emprise de cette taille, soit un carré de 40 kilomètres de côté. Le terme d'agglomération est utilisé pour désigner ce territoire.

Concernant la résolution spatiale des villes archétypales, plusieurs niveaux sont choisis en fonction de la forme urbaine considérée. La résolution spatiale correspond « *à la finesse du grain avec laquelle sont représentés les éléments du contenant* » (Tannier, 2017). Ces résolutions doivent permettre de différencier les formes entre elles, mais également permettre par la suite la modélisation des consommations énergétiques individuelles. Ainsi :

- Les structures urbaines sont modélisées avec une résolution spatiale « *grossière* », qui correspond à l'enveloppe des groupes de bâtiments. Cette résolution est en effet suffisante pour identifier et différencier les structures urbaines ;
- Les tissus urbains sont modélisés avec une résolution intermédiaire, qui est la maille de 250 mètres. Un espace cellulaire est ainsi construit, qui permet d'identifier, de quantifier et de spatialiser les différents tissus au sein des structures urbaines.
- Enfin, les formes architecturales sont modélisées avec la résolution spatiale la plus fine, celle du bâtiment.

Ces trois niveaux sont imbriqués les uns dans les autres : les structures urbaines sont composées d'un ensemble de mailles de tissus urbains et ces mailles contiennent différentes architectures bâties (Figure 3-2).

¹⁴ Une aire d'attraction est « *un ensemble de communes, d'un seul tenant et sans enclave, constitué d'un pôle de population et d'emploi, et d'une couronne qui regroupe les communes dont au moins 15 % des actifs travaillent dans le pôle* », d'après l'Insee (<https://www.insee.fr/fr/metadonnees/definition/c2173>).

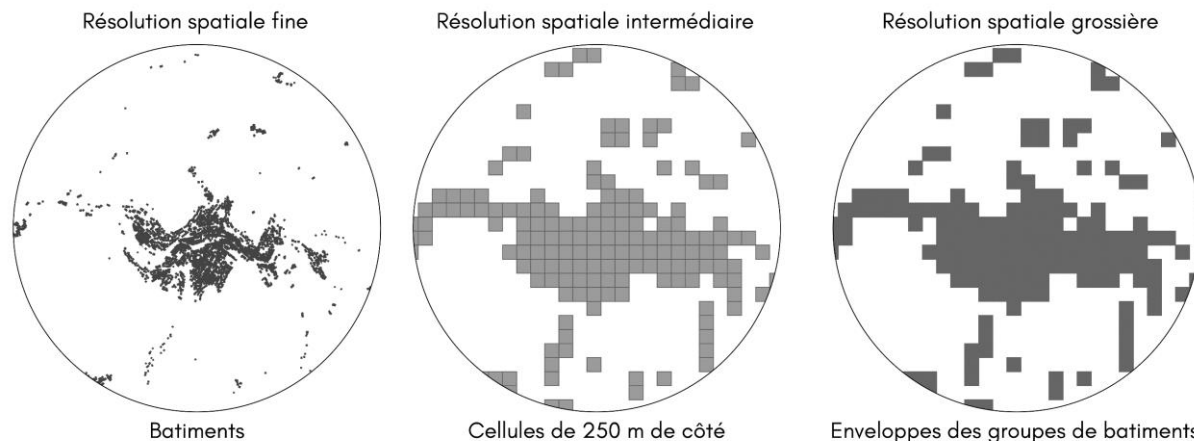


Figure 3-2 : Résolutions spatiales des villes archétypales modélisées.

Les différentes approches sollicitées et la méthodologie de génération des villes archétypales sont présentées dans la partie 3.2.

Modélisation désagrégée des pratiques impactant la consommation énergétique

La seconde proposition de cette thèse est d'avoir une approche de modélisation désagrégée des pratiques générant des consommations énergétiques. Cette approche, qui place l'individu et son lieu de vie au cœur de la modélisation, permet de combiner à la fois le secteur des transports et celui du bâtiment mais également de spatialiser l'énergie. Cependant, si l'individu est conceptuellement au cœur de la modélisation des consommations, il est important de noter que les modèles choisis pour les consommations résidentielles et pour les consommations liées aux mobilités quotidiennes n'ont pas la même résolution spatiale et pas la même échelle de simulation. Concernant les mobilités quotidiennes, les pratiques de déplacement de chaque individu sont simulées à l'échelle de l'agglomération complète, puis à partir de ces simulations les consommations énergétiques sont estimées. La résolution spatiale du modèle de mobilités quotidiennes est alors l'individu. Pour les consommations résidentielles, il est plus difficile de simuler les pratiques de chaque individu au domicile. En effet, un très grand nombre d'activités entraînant une consommation d'énergie est possible au domicile (plus de 20 activités différentes d'après Vorger (2014)). Il est classique de simuler directement les usages énergétiques plutôt que les activités individuelles (voir partie 3.3.2.1). Ainsi, les activités « *douche* » et « *vaisselle* » réalisées par plusieurs individus dans un bâtiment ne vont pas être simulées individuellement, c'est l'usage de l'eau chaude sanitaire dans ce bâtiment qui va être simulé. La résolution spatiale de la modélisation des consommations énergétiques résidentielles n'est alors pas l'individu, mais le bâtiment. Concernant l'échelle de simulation des consommations énergétiques résidentielles, le choix est fait de ne pas les réaliser à l'échelle de l'agglomération, la résolution fine entraînant des temps longs de simulation et nécessitant des capacités de calcul très importantes. De plus, dans le cadre de la modélisation des consommations énergétiques résidentielles, il n'existe pas d'interactions à l'échelle de l'agglomération, mais uniquement des interactions entre bâtiments voisins, à l'échelle de l'îlot ou du quartier. La maille de tissu urbain est ainsi choisie comme échelle de simulation.

Ces différences de résolutions et d'échelles posent la question du niveau d'agrégation spatiale choisie pour

une analyse combinée des résultats. Ce niveau est la maille de tissu urbain de 250 mètres de résolution, les bâtiments et les individus se localisant tous deux dans des mailles. Ce niveau d'agrégation permet une analyse fine des résultats mais permet également leur cartographie à l'échelle de l'agglomération. Un niveau d'agrégation plus fin, comme le bâtiment, rend difficile, voire impossible, l'analyse spatiale des résultats cette échelle. La méthodologie de modélisation des pratiques des individus est détaillée dans la partie 3.3.

3.2 La génération de villes archétypales comme territoires d'étude

Cette section présente les approches sollicitées dans le cadre de la génération de villes archétypales, puis dans un second temps la méthode proposée.

3.2.1 Les approches sollicitées

La génération de villes archétypales fait appel à plusieurs grandes approches de modélisation, présentées ici.

3.2.1.1 Une modélisation des structures urbaines par les chorèmes

Afin d'identifier et de modéliser les structures urbaines des villes archétypales, nous nous appuyons sur une démarche de modélisation chorématique.

La démarche chorématique

R. Brunet crée en 1986 un type de modélisation propre à la géographie : les chorèmes. Les chorèmes sont « des structures élémentaires de l'espace qui se représentent par des modèles graphiques » (Brunet, 1986). Ce sont des formes simples, existant en nombre limité qui permettent de traduire spatialement et graphiquement des éléments simples d'organisation de l'espace. Roger Brunet propose ainsi une table chorématique, composée de 28 éléments (Figure 3-3).

	POINT	LIGNE	AIRE	RESEAU
maillage				
	chef-lieu	limite administrative	Etat, région ...	centres, limites et polygones
quadrillage				
	tête de réseau carrefour	voies de communication	aire d desserte irrigation, drainage	réseau
attraction				
	points attirés satellites	lignes d'isotropie orbites	aire d'attraction	liaisons préférentielles
contact				
	point de passage	rupture, interface	aire en contact	base tête de pont
tropisme				
	flux directionnel	ligne de partage	surfaces de tendances	dissymétries
dynamique territoriale				
	évolutions ponctuelles	axes de propagation	aires d' extension	tissu du changement
hiérarchie				
	semis urbain	relation de dépendance limites administratives	sous-ensemble	réseau maillé

Figure 3-3 : Table chorématique d'après Brunet (1986).

Quatre formes de bases de la cartographie (le point, la ligne, l'aire et le réseau) permettent de figurer les principales « lois de l'espace » que sont :

- Le maillage qui traduit une stratégie d'appropriation et de partition du territoire ;
- Le quadrillage qui traduit la mise en relation des espaces ;
- L'attraction ou gravitation qui traduit la force des relations entre les espaces ;
- Le contact, qui traduit une interface ou une frontière ;
- Le tropisme, qui correspond à une attraction suivant une direction ;
- La dynamique territoriale, qui est le seul chorème représentant le temps ;
- Et la hiérarchie qui traduit l'importance d'un élément par rapport à d'autres.

La démarche chorématique a été adoptée par de nombreux géographes en analyse spatiale, notamment par

Cheyland et al. (1990) pour étudier l'activité agricole des espaces ruraux, par Helle (1995) pour étudier l'espace vaclusien, ou encore plus récemment par Baro (2015) pour dégager des structures urbaines récurrentes en France. Dans son travail de thèse, elle sélectionne uniquement six chorèmes, qui combinés permettent de représenter les caractères communs aux structures urbaines françaises (Figure 3-4).

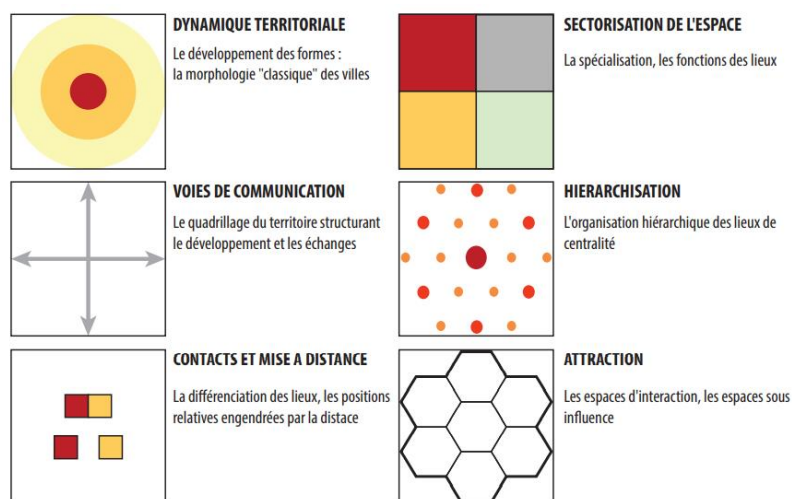


Figure 3-4 : Les chorèmes urbains de J. Baro (2015).

Cette démarche a également été la cible de vives critiques. Ainsi pour Yves Lacoste (1995), « *la chorématique est sans aucun doute un facteur de progrès des raisonnements géographiques, mais ce peut être aussi un moyen savant et séduisant de convaincre (ou de duper)* ». Les critiques majeures portent sur l'absence de localisation précise de ces modèles, la démarche chorématique étant alors perçue comme trop peu scientifique et s'éloignant de la « *réalité* » cartographique. Pour autant, l'intérêt persistant des géographes montre l'utilité des chorèmes en tant qu'« *outil de recherche et de communication* » (Brunet, 1986).

Les apports de la démarche chorématique dans une démarche modélisatrice

La démarche chorématique permet tout d'abord d'identifier ce qui est commun et ce qui est différent dans les structures urbaines françaises. Cette identification permet de rendre compte des différentes formes d'organisation des villes et de dresser des typologies de structures urbaines (Baro, 2015). Elle permet également une simplification, une interprétation et une formalisation graphique des modèles de structures urbaines (Capitaine et al., 2001). Cette approche chorématique fournit ainsi une base méthodologique qui semble pertinente pour identifier et modéliser des structures urbaines.

3.2.1.2 Une approche des tissus urbains et des architectures bâties par la morphologie urbaine

Afin d'identifier et de modéliser les tissus urbains et les architectures bâties composant les structures urbaines des villes archétypales, nous nous appuyons sur la morphologie urbaine et plus particulièrement sur la typomorphologie.

Les trois écoles de morphologie urbaine

La morphologie urbaine peut se définir comme étant l'étude de la forme urbaine dans son développement historique, à partir des éléments la constituant. La morphologie urbaine trouve son origine dans trois grandes écoles, les écoles anglaise, italienne et française.

- L'école italienne

L'école de morphologie italienne s'est développée à partir des années 1950 sur la base des travaux pionniers de l'architecte S. Muratori (1910-73). Cette école se construit en opposition au mouvement moderne à l'urbanisme fonctionnel des CIAM (Congrès International d'Architecture Moderne). Centrée sur la revalorisation des tissus urbains anciens, elle propose de réexaminer le rapport entre la ville et l'architecture et de réintégrer des dimensions spatiale et historique dans les études urbaines. Tout comme pour l'école anglaise, la dimension historique apparaît essentielle aux Italiens qui nourrissent la conviction « *que l'étude des traces concrètes de l'humanisation du territoire à travers les siècles peut être la source d'une certaine sagesse et nous renseigne plus efficacement sur la structure pratique des sociétés ainsi que les représentations qu'elles font* » (Malfroy & Caniggia, 2001). L'école italienne renoue avec la tradition de « *l'esthétique de la ville* », dominante au 19^e siècle. Aldo Rossi (1931-1997), disciple de Muratori, dans son ouvrage « *L'Architettura della città* » (L'architecture de la ville) publié en 1966 invite à considérer la ville comme une œuvre, un artefact chargé de valeurs symboliques, le lieu d'une mémoire collective. Pour lui, chaque lieu est unique et possède une identité. Gianfranco Caniggia (1933-1987) introduit la notion d'échelle : il propose une catégorisation hiérarchisée des éléments urbains, construite sur quatre niveaux d'échelles : (1) l'édifice, (2) le quartier, (3) la ville et (4) le territoire. Selon lui, chaque objet construit doit ainsi être analysé dans son cadre de référence. Enfin leur approche est également centrée sur la notion de « *type* » : l'école italienne est la fondatrice de la typo-morphologie.

- L'école française

Ces différents concepts vont progressivement se diffuser et être repris par un groupe de recherche de l'École d'architecture de Versailles à la fin des années 1960. L'architecte Jean Castex, le sociologue Jean-Charles Depaule et l'architecte-urbaniste Philippe Panerai adoptent les théories italiennes de morphologie urbaine et les enrichissent. Ainsi « *l'importance du courant italien est indéniable et tout travail sur la ville aujourd'hui ne peut faire l'économie de s'y référer* » (Mangin & Panerai, 1999). Ils privilégient cependant une approche plus opérationnelle, retenant les méthodes directement utilisables plutôt que la théorie (Trotta-Brambilla & Novarina, 2018). Mangin et Panerai parlent alors de « *projet urbain* » et établissent les étapes à accomplir pour le mener à bien. Ils proposent dans leurs études de mettre l'accent sur le parcellaire, considéré comme un élément central des typologies de bâti. Pour eux, le tissu urbain est une combinaison des relations entre le parcellaire, le réseau de voirie et le bâti. Ils mettent également en évidence les interrelations entre la structure physique de la ville et les activités s'y déroulant.

- L'école anglaise

L'école de morphologie urbaine anglaise est développée par un groupe de recherche de l'Université de

Birmingham et s'appuie sur les travaux de M.G.G Conzen (1960). Pour étudier les formes urbaines, il développe une méthode basée sur une décomposition de l'ensemble des tissus urbains en systèmes, qui sont étudiés séparément puis au regard de leurs interactions. Il différencie quatre systèmes composants les tissus : (1) le système parcellaire, (2) le système viaire, (3) le système bâti et (4) le système des espaces libres. Il porte notamment un intérêt particulier à la durée de vie et à la persistance des éléments de ces systèmes. Pour les chercheurs de cette école, quatre processus doivent être pris en compte pour comprendre les changements des formes urbaines. Le premier est « *l'accumulation* » : il désigne l'introduction de nouvelles formes dans les tissus existants au cours des périodes historiques successives, en réponse aux besoins des habitants. Le second processus est « *l'adaptation* », qui correspond à la manière dont les formes anciennes sont modifiées au cours du temps. Enfin « *la transformation* » correspond à la modification des formes urbaines préexistantes tandis que « *le remplacement* » consiste à substituer aux anciennes formes les nouvelles (transformation complète). Conzen s'appuie également sur le concept de région morphologique : elle correspond à une zone qui présente une unité dans sa forme qui la distingue des zones environnantes.

Objectifs et principes généraux de la morphologie urbaine

Chacune des écoles de morphologie urbaine poursuit un objectif. Ces différents objectifs sont décrits par Moudon (1997) :

- Un objectif descriptif et explicatif, dans le but de développer une théorie de l'édification de la ville. C'est essentiellement l'objectif des géographes, notamment de l'école anglaise.
- Un objectif prescriptif, dans le but de développer une théorie de la conception des villes. Les études se concentrent sur la manière dont les villes devraient être construites. C'est essentiellement l'objectif des architectes de l'école italienne.
- Un objectif critique, pour évaluer l'impact des théories de conception passées sur la construction des villes. L'école française s'est particulièrement illustrée dans cet objectif.

Si les objectifs ne sont pas similaires, ces différentes écoles partagent cependant une approche commune. En 1996, elles se réunissent lors du premier Séminaire Internationale de la Forme Urbaine (SIFU – ou ISUF, International Seminar on Urban Form). Cette rencontre permet de faire émerger des points de consensus sur la discipline. Moudon (1997) identifie ainsi trois principes communs sur lesquels repose l'analyse morphologique urbaine :

- La forme urbaine est définie par trois éléments physiques fondamentaux : les bâtiments et les espaces ouverts qui leur sont associés, les parcelles et les rues.
- La forme urbaine peut être comprise à différents niveaux de résolution. On en reconnaît généralement quatre, correspondant au bâtiment, à l'îlot, au quartier et à la ville.
- La forme urbaine ne peut être comprise qu'historiquement, car les éléments qui la composent se transforment et se remplacent continuellement.

Pinho & Oliveira (2009) proposent également des points communs entre les deux écoles italiennes et

anglaises. Les deux écoles voient tout d'abord la ville comme un phénomène historique, elles reconnaissent les cycles de développement et se concentrent sur les périodicités dans la création et l'adaptation des formes physiques et enfin elles se concentrent sur les formes prédominantes dans le paysage, c'est-à-dire sur le grand nombre de bâtiments ordinaires plutôt que sur la petite minorité de bâtiments dits de « *distinction architecturale* ».

Les apports de la typo-morphologie dans une démarche modélisatrice

La typo-morphologie est une méthode d'analyse, combinaison entre la morphologie urbaine et la typologie architecturale. La typologie correspond à l'analyse des caractères spécifiques des composants d'un ensemble ou d'un phénomène, afin de les décrire et d'établir une classification. Ainsi, la typo-morphologie cherche à partir d'une lecture morphologique des villes à classer les éléments urbains en types. Cette notion de « *type* » constitue la base cette méthode. Selon les auteurs, la définition et le vocabulaire utilisé peuvent varier.

L'école italienne saisit le type de façon évolutive, à travers le temps. Muratori est ainsi le premier à apporter le concept de « *type architectural* ». Pour lui, « *les bâtiments existants sont l'instanciation de types codifiés au cours du temps, dans des contextes culturels donnés, pour apporter une solution optimale à la production de structures bâties.* » (Fusco, 2018). Caniggia & Maffei (1979) étendent par la suite la définition du type à d'autres échelles que celle du bâtiment. Pour eux, le type est une entité à caractère enracinée et spécifique au processus local de développement culturel. Chez Conzen et plus généralement en géographie, un type correspond à des répétitions qu'on appelle « *séries* » et s'oppose aux exceptions : « *Le type seul est probant et se raccorde en séries [...]. Ce sont ces séries qu'il faut étudier et non l'exception [...]. De là l'idée de la géographie générale que tout fait terrestre appartient à un type dont les exemples peuvent s'expliquer partout de la même façon.* » (Meynier, 1969). Scheer (2016) parle de « *patterns* » et en identifie plusieurs sortes, selon les éléments et l'échelle considérés (Figure 3-5).

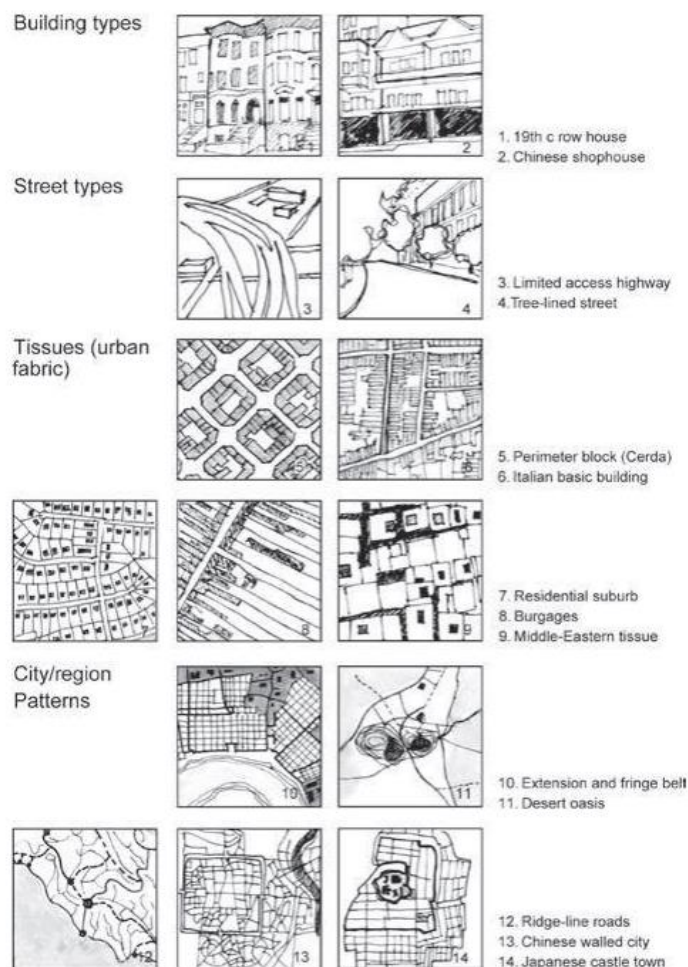


Figure 3-5 : Différents exemples de « patterns » identifiés par les morphologues urbains (d’après Scheer, 2016).

Ces différents types sont hiérarchisés et s’emboîtent : des motifs plus petits sont agrégés pour former des motifs plus grands. Pour Kropf (2014), les échelles généralement reconnues sont les suivantes : le bâtiment, la parcelle et le bloc de rues (Figure 3-6).

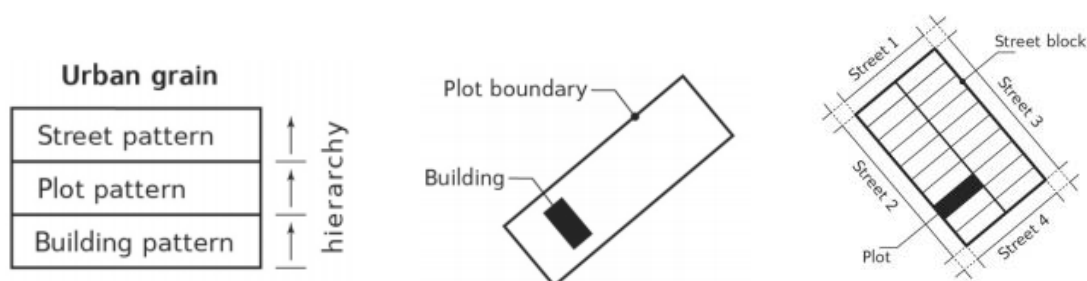


Figure 3-6 : Hiérarchie et emboîtement des échelles des patterns (d’après Kropf, 2014).

La notion d’échelle et d’emboîtement apparaît également dans l’école française. Ainsi, pour Panerai et al. (1999), l’élaboration des types consiste à « décomposer les données offertes par l’espace physique afin d’en reconstituer ses principes propres ou ceux qu’il exprime ». La décomposition en strates de l’espace permet en effet d’en saisir

les spécificités. Selon eux, plusieurs critères permettent de mettre en lumière les types : dimensionnels, fonctionnels, distributifs, constructifs et esthétiques. Le choix de ces critères varie selon la nature des éléments et l'échelle d'analyse et constitue généralement le point délicat de la typologie. De son côté, Fusco (2018) parle de « *structures typiques* », qui sont identifiables malgré la complexité des formes urbaines actuelles. Il les décline également à plusieurs niveaux d'échelle : les types architecturaux, les tissus urbains et les régions morphologiques. Ces structures sont « *caractérisées par des agencements particuliers d'éléments de forme et par des contextes de production qui leur sont spécifiques et donnant lieu à des organismes urbains dont la forme globale, complexe, peut être appréhendée en étudiant les phases historiques de croissance et de tassement* ».

La typo-morphologie consiste donc à distinguer par une décomposition et une abstraction de la forme urbaine ce qui est semblable et ce qui est différent dans les villes. Le type apparaît ainsi par comparaisons et par différences, et se saisit au travers de son développement historique. Nous retiendrons la définition suivante du type : c'est une catégorie, qui se caractérise par des éléments urbanistiques et architecturaux similaires mais également par un contexte de production spécifique. Il se décline à plusieurs niveaux d'échelles qui s'emboîtent et s'articulent. Enfin un type n'est pas une exception, il est représentatif d'un ensemble. Finalement, un type est un modèle, entendu comme « *une représentation simplifiée d'une réalité, qui lui donne du sens et permet de mieux la comprendre* » (Haggett et Chorley, 1967, cité par Antoni, 2013). Lorsque le degré de simplification est important, le terme d'archétype est généralement utilisé (Martin & March, 1972). De nombreuses typologies de tissus urbains et/ou d'architecture du bâti existent aujourd'hui. Elles fournissent une véritable base de données des formes existantes dans les villes françaises et européennes aujourd'hui, base de données que nous solliciterons ici pour identifier et quantifier les formes à modéliser.

3.2.1.3 Une approche des réseaux par leur constitution

Les réseaux de transports servent à mettre en communication les différentes parties d'un territoire. Plusieurs approches de modélisation des réseaux existent, selon le niveau d'abstraction choisi. Marshall (2005) distingue ainsi trois niveaux d'abstraction successifs dans l'analyse des réseaux de voies (Figure 3-7) :

- Le premier niveau d'abstraction correspond à la composition c'est-à-dire « *à la géométrie des rues, à leurs dessins en trois dimensions, à leurs modes d'assemblage, aux facteurs de forme reliant hauteur, largeur et longueur, à leur régularité et à leur irrégularité* » (Salat et al., 2011).
- Le second niveau correspond à la configuration : ce niveau plus abstrait, fait abstraction de la géométrie et se concentre uniquement sur la topologie du réseau, c'est-à-dire sur l'organisation des connexions des différents éléments entre eux. Les analyses utilisant la théorie des graphes (Berge, 1973) font figure de référence en matière d'analyse de la configuration des réseaux. Les réseaux deviennent des nœuds et des arcs (ou lien) et on mesure des ratios, des indices de connectivités ou de continuité qui permettent de rendre compte du service que les réseaux rendent en termes d'accessibilité. Ainsi, « *la perte d'information géographique est compensée par une meilleure compréhension de la structure des relations* » (Salat et al., 2011).
- Enfin le dernier niveau d'abstraction correspond à la constitution. C'est le niveau d'analyse

fondamental, le plus abstrait. On ne s'intéresse plus au détail des relations mais à la structure de la configuration, à son organisation hiérarchique. Ce niveau d'abstraction des réseaux nous apparaît particulièrement pertinent dans le cadre de la modélisation de villes archétypales, permettant de dresser des typologies de structures de réseaux.

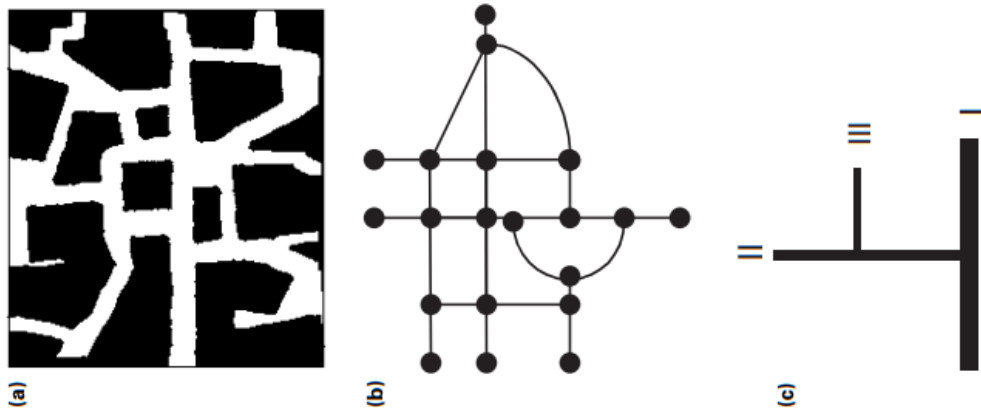


Figure 3-7 : Motifs de réseau. (a) Motif géométrique. (b) Motif topologique. (c) Motif hiérarchique (d'après Marshall, 2005).

En lien avec le niveau d'abstraction, la manière de hiérarchiser les réseaux de déplacements apparaît comme un élément essentiel de la modélisation des réseaux de transports. Cette hiérarchisation peut s'appuyer sur la forme des réseaux, leurs usages, leurs relations ou encore leurs désignations (Figure 3-8).

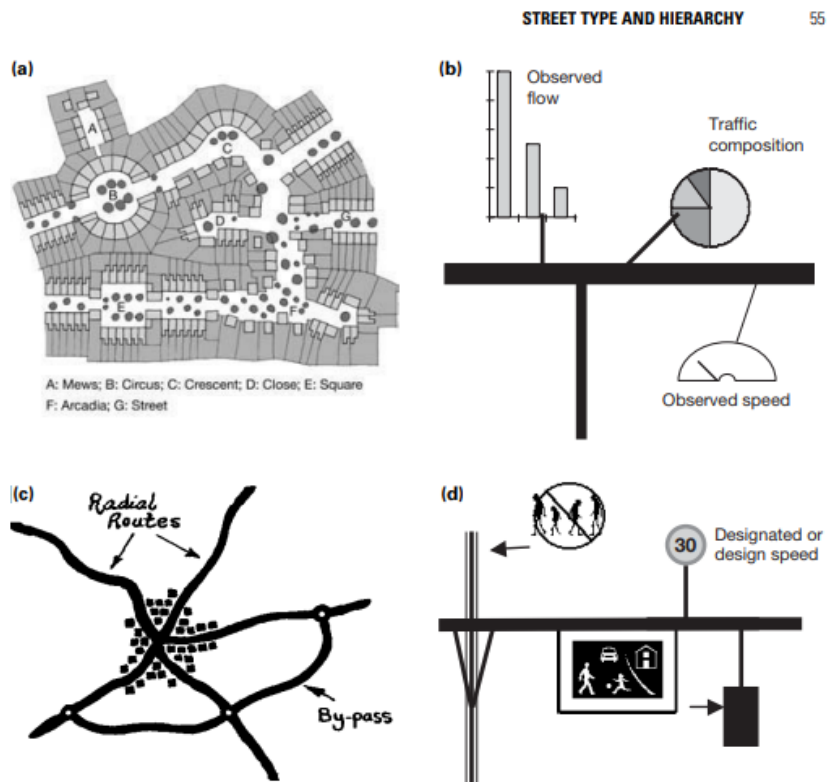


Figure 3-8 : Quatre catégories de classification. (a) Catégories définies par la forme. (b) Catégories définies

par l'usage. (c) Catégories définies par les relations. (d) Catégories définies par la désignation (d'après Marshall, 2005).

La forme fait ici référence aux caractéristiques physiques telles que la largeur de la rue ; l'usage fait référence à son utilisation et peut concerner par exemple le trafic routier ; la désignation fait référence aux thèmes de classification déterminés par une attribution ou une assignation : elle concerne les propriétés qui peuvent être appliquées abstraitement à la carte d'un réseau routier. Un exemple typique est le statut administratif des voies (une route nationale par exemple). Enfin les relations font référence à la position relative d'un tronçon par rapport à d'autres éléments urbains ou de réseau. Cette catégorisation apparaît ici adaptée dans le cadre d'une modélisation abstraite des réseaux de transports dans des villes archétypales.

3.2.2 La méthode appliquée

La génération de villes archétypales se fait en trois étapes principales. À partir de la littérature existante sur le sujet, plusieurs modèles conceptuels de villes aux différentes échelles sollicitées seront identifiés. Ces modèles font appel aux approches présentées dans la partie 3.2.1 :

- À l'échelle de l'agglomération, les théories fondatrices des modèles urbains ainsi que des modèles plus « *actualisés* » nous permettront d'identifier plusieurs modèles de structures urbaines françaises. L'approche chorématique sera alors sollicitée.
- À l'échelle du quartier et du bâtiment, les très nombreuses typologies existantes, basées sur une approche typo-morphologique, nous permettront d'identifier les tissus urbains et les architectures bâties qui viendront composer les différentes structures urbaines.
- Enfin, différents modèles de réseaux de déplacements seront identifiés, suivant une approche par leur composition.

Afin de pouvoir quantifier les modèles urbains identifiés au travers de la littérature, une analyse statistique et cartographique de villes « *réelles* » sera ensuite proposée. Plusieurs villes françaises seront tout d'abord sélectionnées. Ces villes devront être similaires en taille et en structure urbaine aux villes archétypales que l'on souhaite modéliser. La seconde étape consistera à identifier les différents tissus urbains à modéliser dans les villes réelles. Celles-ci seront tout d'abord maillées avec une résolution de 250 mètres, afin de permettre le calcul d'indicateurs morphologiques. Afin de faciliter la reproductibilité de la méthode, un nombre limité d'indicateurs sera sélectionné et des routines d'automatisation de calcul seront proposées. Nous souhaitons également travailler avec des bases de données homogènes à l'échelle de la France, travaillant sur neuf terrains d'études différents. Ainsi, des indicateurs utilisant une source unique de données seront sélectionnés. Les mailles seront classées à l'aide d'une méthode de classification automatique. La classification produite sera ensuite évaluée par comparaison avec des classifications existantes des espaces urbains étudiés. Une fois la classification validée, différentes analyses statistiques seront menées sur les villes réelles afin de définir et de quantifier les formes urbaines à modéliser. Les caractéristiques fonctionnelles des tissus urbains seront tout d'abord analysées. L'objectif est de quantifier leur mixité d'usages, c'est-à-dire de connaître le nombre

et l'organisation des différentes aménités génératrices de déplacement. Des règles d'affectation des différentes aménités par tissus urbains pourront ainsi être construites permettant de créer des aménités dans les villes théoriques. Une analyse cartographique ainsi qu'une analyse statistique permettront ensuite de définir et de quantifier l'emprise spatiale des structures urbaines à modéliser ainsi que celles des différents tissus urbains qui les composent. Enfin, une analyse cartographique permettra de définir l'organisation des réseaux de déplacement principaux. L'ensemble des éléments nécessaires étant définis, les villes archétypales seront ensuite générées puis évaluées. L'ensemble de la méthodologie appliquée pour la génération des villes archétypales est synthétisé dans la figure suivante (Figure 3-9).

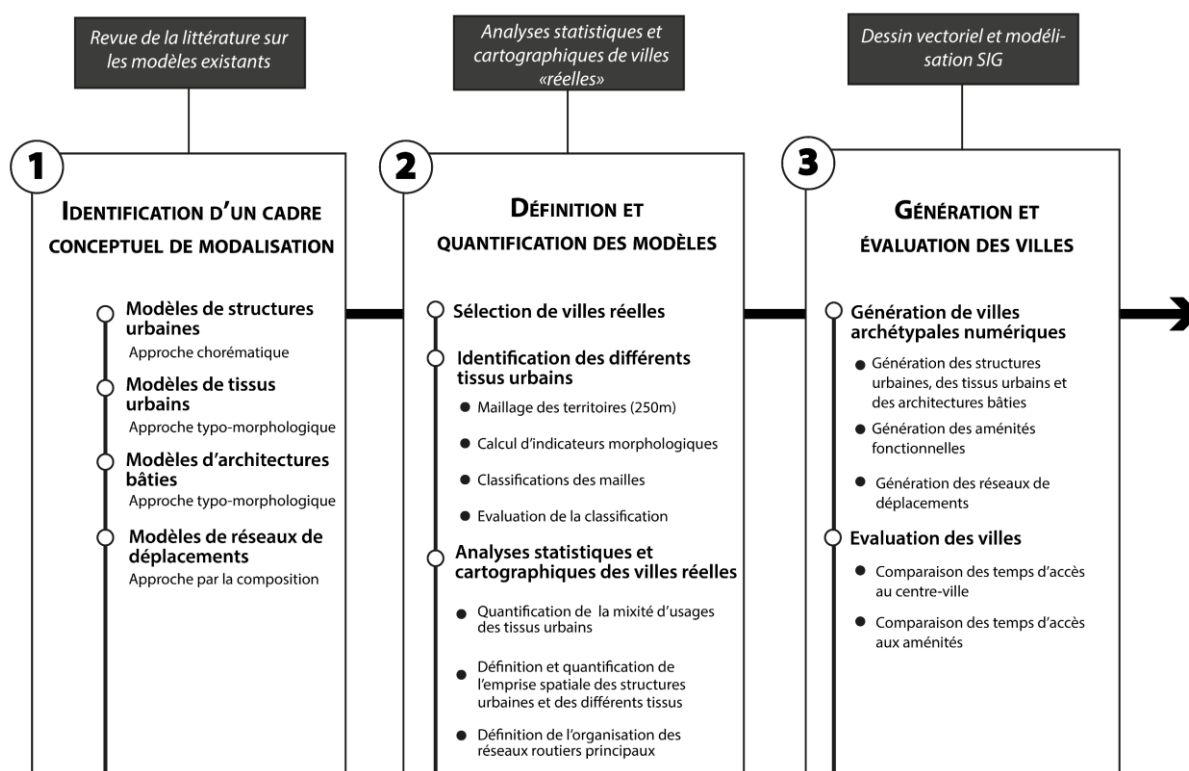


Figure 3-9 : Méthodologie de génération des villes archétypales utilisée dans cette thèse.

3.3 L'évaluation des consommations énergétiques individuelles dans les villes archétypales

Cette section présente la méthode d'évaluation des consommations énergétiques individuelles dans les villes archétypales. Elle est composée de deux parties. La première s'intéresse à la modélisation des pratiques de mobilités quotidiennes tandis que la seconde s'intéresse aux consommations énergétiques résidentielles.

3.3.1 La modélisation des consommations liées aux pratiques de mobilités quotidiennes

3.3.1.1 Typologie des modèles de déplacements

Plusieurs typologies des modèles de déplacements désagrégés existent (Bois, 2017; Brutti-Mairesse, 2013; Leurent, 2007). Une première distinction existe entre les modèles spatialisés et les modèles non spatialisés. Ces derniers sont généralement des modèles statistiques, qui font abstraction du caractère géographique : les moyens de transport sont ainsi réduits à des grandeurs physiques (comme la longueur du tracé). Ce sont généralement des modèles de régression entre un volume d'usage d'un service et des facteurs explicatifs concernant ce service (Leurent, 2007). C'est le cas par exemple d'un modèle de distances parcourues par des voitures sur le réseau autoroutier français, en fonction de la longueur du réseau, de la population sur le territoire couvert, ou encore du prix des carburants. Dans les modèles spatialisés, la dimension géographique est explicite. Ces modèles tiennent en effet compte du territoire : les activités, les réseaux, les individus sont localisés. C'est cette famille de modèle de déplacements qui nous intéresse ici, permettant de lier les déplacements quotidiens au territoire, à la forme urbaine. Deux grandes catégories de modèles spatialisés existent : les modèles dynamiques et les modèles statiques des déplacements.

Les modèles spatialisés dynamiques

Les modèles dynamiques cherchent à décrire les variations temporelles des états de trafic, ils représentent explicitement la congestion et décrivent les conditions d'écoulement dans lesquels s'effectuent les déplacements (Brutti-Mairesse, 2013). Ces modèles peuvent être agrégés, le trafic est alors traité comme un flux homogène et sans vide. Le comportement des véhicules est donc reproduit de manière collective. Ils peuvent également être désagrégés : les véhicules sont individualisés, ils existent des interactions entre les véhicules et avec le réseau. Ces modèles sont souvent utilisés dans le cadre de la gestion et de l'exploitation des réseaux. Les modèles dynamiques permettent de réaliser des simulations détaillées des conditions de circulation mais leur mise en œuvre est complexe. Ils sont ainsi difficilement applicables à l'échelle d'une agglomération, ce qui limite ici leur utilisation.

Les modèles spatialisés statiques

Les modèles spatialisés peuvent également être statiques. Ces modèles cherchent alors à quantifier le nombre de véhicules empruntant chaque tronçon du réseau, mais ils ne prennent pas en compte la dynamique d'écoulement du trafic (Bonnell, 2002). Ces modèles statiques sont utiles pour étudier les déplacements sur de larges échelles spatiales et temporelles. Ils ne permettent cependant pas d'évaluer finement les conditions de trafic dans la rue et présentent également des limites quant à la représentation des comportements, la prise en compte du trafic de marchandises, etc. (Brutti-Mairesse, 2013). Cette famille de modèles répond à nos besoins : elle nous permet de spatialiser les consommations liées aux mobilités quotidiennes à l'échelle d'une agglomération. Le paragraphe suivant détaille le fonctionnement des modèles à quatre étapes, qui définissent le cadre formel de la majeure partie des modèles statiques.

Les modèles à quatre étapes

Les modèles à quatre étapes permettent de simuler la mobilité d'individus en termes de trafic. Le modèle segmente la modélisation du trafic en plusieurs étapes, chacune correspond à un choix à faire, à un questionnement rencontré dans la simulation des déplacements (Leurent, 2007) :

- Avec quelle intensité faut-il se déplacer ?
- Quelle(s) destination(s) choisir ?
- Avec quel(s) mode(s) de transport s'y rendre ?
- Par quel itinéraire passer ?

Différentes méthodes permettent de répondre à ces questions, à ces choix. Les modèles à quatre étapes sont ainsi en réalité une « succession de modèles dont l'interaction n'est que minimale. Plus qu'un modèle, il s'agit donc d'une méthodologie associant différents modèles en les combinant pour décrire une mobilité dans son ensemble, sur un territoire donné » (Audard, 2006). La première étape correspond à une étape de « génération du trafic » (Bonnell, 2002) et consiste à estimer pour chaque zone géographique préétablie, un pouvoir d'émission et d'attraction de demande de transport. Elle permet de construire les marges de la matrice Origine-Destination. Cette étape fait appel à l'ensemble des méthodologies d'analyse des facteurs à l'origine des déplacements : modèles normatifs, modèles de régression linéaire ou multiple, modèles catégoriels, etc. C'est l'objectif qui détermine la méthode choisie. La seconde étape est dite de distribution ou de « génération de boucles de déplacements » (Ben-Akiva & Lerman, 1985) et consiste à déterminer la part de la demande de transport de chaque zone émettrice à destination d'une zone réceptrice donnée. Cette étape permet de reconstituer les matrices Origine-Destination. De nombreuses méthodes existent afin de déterminer la distribution des déplacements : les modèles des facteurs de croissance, la méthode des opportunités, les modèles gravitaires ou encore les modèles d'entropie. Le choix de la méthode dépend ici essentiellement de la disponibilité des données (Audard, 2006). La troisième étape de « choix modal » distribue la demande entre les différents moyens de transport disponibles. Cette étape permet de diviser la matrice Origine-Destination en plusieurs matrices pour chaque mode. Enfin la quatrième étape dite « d'affectation » cherche à déterminer les itinéraires empruntés par chaque déplacement. Là encore, il existe de nombreuses méthodes d'affectation du trafic qui sont synthétisées dans le tableau suivant (Tableau 3-2).

		Procédure de choix de l'itinéraire	
		Déterministe	Probabiliste
Contrainte de capacité	Non	Méthode tout-ou-rien ou plus court chemin	Procédure stochastique pure (multichemin Dial, Burrell...), prix-temps
	Oui	Méthode d'équilibre (équilibre de Wardrop, affectation par tranche)	Méthode d'équilibre avec utilité stochastique

Tableau 3-2 : Classification des modèles d'affectation (d'après Bonnel, 2002).

Une analyse détaillée des méthodes et modèles pouvant être utilisés dans les modèles à quatre étapes est produite par Bonnel (2002). Ces méthodes diffèrent principalement au regard du niveau d'agrégation. Deux grands types de modèles à quatre étapes se distinguent en effet : les modèles dits agrégés et les modèles dits désagrégés ou individu-centré. Dans l'approche agrégée, l'individu pris en compte est un individu moyen. À l'inverse dans l'approche désagrégée, l'individu est considéré isolément à travers ses propres caractéristiques. Chacune des étapes du modèle tient ainsi compte des caractéristiques des individus. Cette approche désagrégée nous intéresse ici, puisque nous souhaitons connaître les consommations énergétiques de chaque individu, pour pouvoir les spatialiser finement et les croiser avec les consommations énergétiques résidentielles. Le modèle de simulation des mobilités quotidiennes Mobisim-Soft, présenté par la suite, fait partie de la famille des modèles à quatre étapes désagrégés.

3.3.1.2 Mobisim-Soft

Le projet Soft

Ce travail de thèse a été réalisé conjointement au projet de recherche SOFT (Bonin et al., 2020) (Sobriété énergétique par les formes urbaines et le transport), financé par l'ADEME. SOFT a abordé la question de la performance énergétique d'un territoire, celui d'Est-Ensemble, sous l'angle de la sobriété, c'est-à-dire en ne cherchant pas uniquement des solutions techniques mais en questionnant les pratiques. Plusieurs scénarios de développement de ce territoire ont été construits et évalués grâce au modèle de simulation des mobilités quotidiennes Mobisim-Soft, modèle développé au laboratoire THÉMA dans la continuité du modèle Mobisim (Antoni & Vuidel, 2011). Ayant une bonne connaissance de ce modèle au travers de ce projet de recherche et celui-ci permettant de répondre à nos objectifs, ce modèle s'est donc imposé tout naturellement pour supporter notre questionnement de recherche.

Mobisim : un modèle LUTI désagrégé

Mobisim¹⁵ est une plateforme de simulation LUTI (Land-use/transport integrated) qui permet d'identifier les conséquences possibles, sur l'organisation des flux de mobilité quotidienne et résidentielle, de scénarios d'aménagement ou d'évolutions socio-économiques. Pour cela, il intègre au sein d'une même plateforme plusieurs modèles permettant de représenter des processus spatiaux, démographiques et économiques (Hirtzel, 2015) (Figure 3-10).

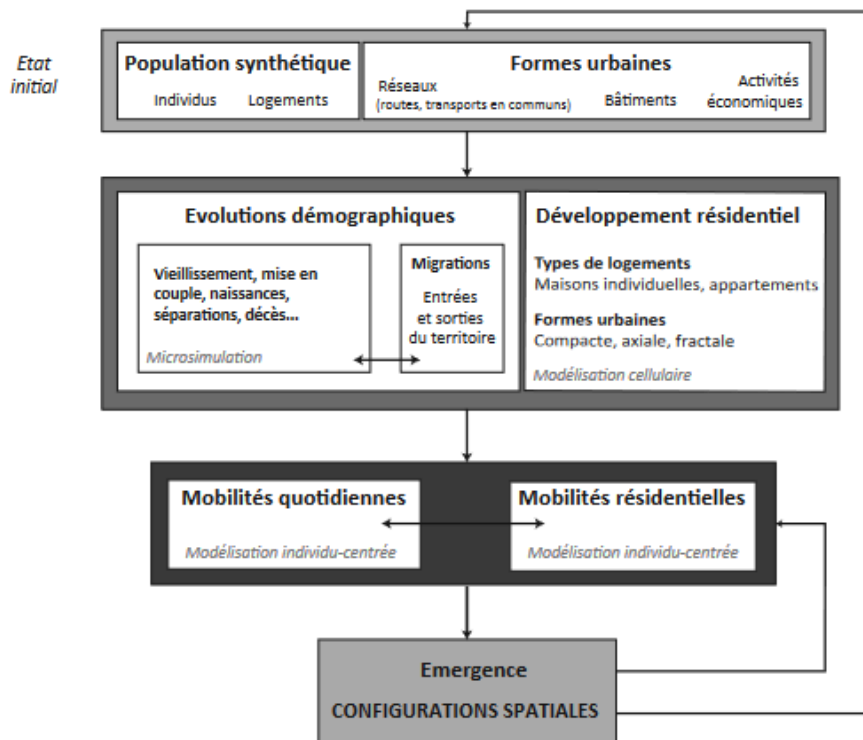


Figure 3-10 : Architecture de la plateforme Mobisim (d'après Hirtzel, 2015).

Chacun des modèles est construit selon une approche désagrégée au niveau des individus, des ménages et des logements. Quatre sous-systèmes principaux peuvent être identifiés : les évolutions démographiques, le développement résidentiel, les mobilités quotidiennes et les mobilités résidentielles. Dans ce travail, nous nous focaliserons uniquement sur les mobilités quotidiennes. L'ensemble des sous-systèmes sont traités plus précisément dans les travaux de thèse de Marc Bourgeois (2015), de Maxime Frémond (2015), de Joanne Hirtzel (2015) et dans les travaux de Tannier et al. (2016). Mobisim-Soft, variante de la plateforme Mobisim, correspond ainsi au sous-système des mobilités quotidiennes, auquel des modifications ont été apportées lors du projet Soft. Ce modèle est présenté par la suite.

¹⁵ Site web : <http://thema.univ-fcomte.fr/mobisim/>

Mobisim-Soft : un modèle de simulation des mobilités quotidiennes

Le modèle de mobilité Mobisim-Soft permet de modéliser les déplacements potentiels d'un individu sur une période donnée (une journée, une semaine, ...).

- Point de départ d'une simulation

Une simulation avec Mobisim-Soft sur une zone d'étude nécessite tout d'abord la génération d'une population synthétique d'individus sur cette zone. Une population synthétique est une « *population dont les caractéristiques individuelles des agents sont reconstruites à un niveau désagrégé N à partir des informations connues à un niveau agrégé $N+1$* » (Antoni et al., 2011). Le recours à une population synthétique dans le cas d'une modélisation désagrégée est nécessaire, aucune donnée démographique désagrégée n'existant en France, et ce en raison de la protection des données personnelles. Ainsi à partir de données agrégées, Mobisim-Soft génère une population synthétique réaliste d'individus localisés dans la zone d'étude. Chacun des individus est caractérisé par un ensemble d'attributs permettant par la suite de simuler ses déplacements quotidiens, tels que l'âge, la profession, le rôle (enfant, chef de ménage, etc.), le statut matrimonial ou encore le revenu. Cette initialisation de la population n'a lieu qu'une fois, au moment de la création d'une zone d'étude, elle ne fait pas partie de la dynamique de simulation (Hirtzel, 2015). Concernant l'environnement résidentiel de la zone d'étude, plusieurs éléments sont nécessaires pour pouvoir réaliser les simulations de déplacements : des entités spatiales de référence, des aménités et des réseaux. Les entités spatiales de référence constituent les origines et les destinations des déplacements des individus. Les bâtiments sont généralement utilisés comme entités de référence, mais il est également possible de recourir à un maillage. Ces entités doivent être caractérisées par une capacité résidentielle (nombre et/ou surface de logements, nombre d'habitants, etc.) et par un nombre d'aménités génératrices de déplacements (emplois, commerces et services notamment). Enfin, des réseaux de transport doivent connecter les différentes entités spatiales et doivent être caractérisés à minima par le ou les modes de transports utilisables, un sens de circulation et une vitesse. À ces attributs obligatoires peuvent être ajoutés la capacité du réseau, la localisation des arrêts et les horaires de passage pour les transports collectifs. Les caractéristiques de l'environnement résidentiel et la génération de la population synthétique des individus constituent le point départ d'une simulation.

- Simulation des mobilités quotidiennes

Mobisim-Soft est basé sur un modèle à quatre étapes désagrégé permettant de simuler les mobilités des individus. Il diffère cependant du schéma classique des modèles à quatre étapes puisque le trafic n'est pas affecté sur le réseau. Nous faisons en effet le choix de ne pas prendre en compte les phénomènes de congestion dans notre modélisation des consommations énergétiques. Si ce choix amène des limites à notre travail, le modèle en est grandement simplifié notamment pour une utilisation sur des villes archétypales. Cela permet en effet de simplifier la génération des réseaux dans les villes théoriques, puisqu'il n'est pas nécessaire de définir leurs capacités ni les horaires pour les transports collectifs. Le fonctionnement de Mobisim-Soft est décrit dans la figure suivante (Figure 3-11).

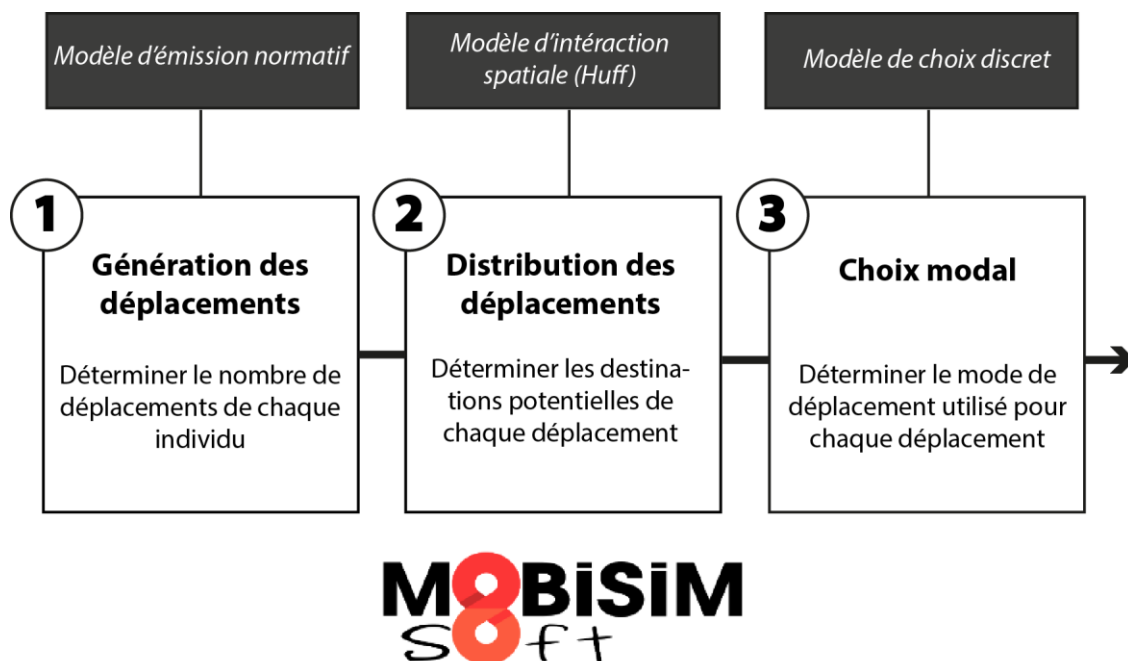


Figure 3-11 : Le fonctionnement de Mobisim-Soft.

La génération des déplacements est réalisée par un modèle d'émission normatif. Un nombre moyen de déplacements pour une journée (24 heures) est ainsi défini pour chaque individu en fonction de ses caractéristiques et en fonction du motif de déplacement. Les déplacements générés simulent une journée type, valable pour toutes les autres journées de l'année. Cette journée peut être assimilable à un mardi ou à un jeudi, jours ouvrables de l'ensemble des activités. Concernant la distribution des déplacements, nous ne sélectionnons pas une unique destination mais calculons une probabilité de fréquentation à toutes les destinations possibles par motif et par type de personne. Cette probabilité est calculée selon un modèle d'interaction spatiale qui est un modèle gravitaire basé sur le modèle de Huff. Enfin, le choix modal est déterminé à partir d'un modèle de choix discret prenant en compte les caractéristiques du déplacement et celles de l'individu. L'application du modèle et son calage sur les villes théoriques ainsi que sa validation sont présentés dans la partie 8.1.

3.3.2 La modélisation des consommations énergétiques résidentielles

Le champ de la modélisation des consommations énergétiques des bâtiments est aujourd'hui en pleine croissance et plusieurs états de l'art existent sur le sujet (Ferrando et al., 2020a; Happle et al., 2018; Reinhart & Cerezo Davila, 2016; Swan & Ugursal, 2009). Ces modèles sont couramment appelés des « *BEM* » (Building Energy Modeling) ou des « *UBEM* » (Urban Building Energy modeling), selon l'échelle d'analyse considérée. Les *BEM* s'intéressent uniquement au bâtiment, tandis que les *UBEM* prennent également en compte son environnement. Ces derniers nous intéressent ici.

3.3.2.1 Typologie des modèles d'évaluation des consommations énergétiques résidentielles

Typologie générale

Une des classifications les plus connues des modèles énergétiques résidentiels est celle de Swan & Ugursal (2009) (Figure 3-12).

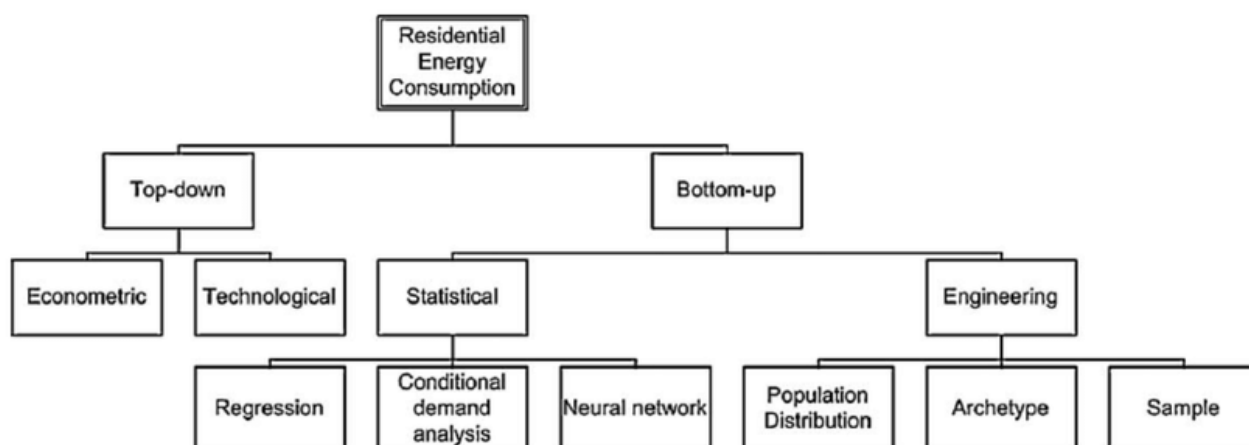


Figure 3-12 : Taxonomie des modèles d'estimation de la consommation énergétique par usage du secteur résidentiel (d'après Swan & Ugursal, 2009).

Ils proposent un premier niveau de distinction en deux groupes basé sur la façon d'accéder à l'échelle considérée dans le processus de modélisation. L'approche peut également être ascendante « *Bottom-up* », la consommation est alors établie à partir d'une agrégation de données construites à un niveau inférieur (généralement le bâtiment). Les modèles top-down sont généralement utilisés pour déterminer les effets de changements continus au long cours sur les consommations énergétiques (l'augmentation du prix de l'énergie par exemple) et permettent ainsi d'estimer les besoins d'approvisionnements. Ces modèles reposent sur des données statistiques historiques agrégées, mais il est possible de faire une seconde distinction au regard du type de données utilisées. Les modèles économétriques sont basés principalement sur des données de prix (de l'énergie notamment) et sur les revenus. Ils ne prennent pas en compte les éléments technologiques comme le taux d'équipements des ménages à l'inverse des modèles technologiques (Allibe, 2012). Dans les deux cas, ces modèles présentent l'avantage de nécessiter peu de données désagrégées en entrée et bénéficient de valeurs historiques liées à la consommation d'énergie pour le secteur résidentiel. Cependant, ils ne peuvent pas être utilisés dans le cadre de scénarios prospectifs. En effet, s'appuyant essentiellement sur des données historiques pour estimer la consommation d'énergie, ces modèles sont incapables de modéliser les changements discontinus (Swan & Ugursal, 2009). De plus ces modèles ne permettent pas de fournir de détails relatifs aux différents postes de consommation d'énergie finale, au type de logement ou encore relatifs aux individus. Au sein des modèles bottom-up, Swan et Ugursal proposent un second niveau de distinction, basé sur la théorie utilisée pour estimer les consommations. Le choix d'une théorie est lié essentiellement au

type et à la structure de données disponibles. Les modèles dits « *ingénieurs* » sont basés sur des données établies à partir de lois physiques. Ils permettent de lier la consommation d'énergie à l'environnement physique et aux performances techniques du bâtiment ainsi qu'aux technologies présentes et à leurs usages par les ménages. Ces modèles ingénieurs présentent l'avantage de pouvoir estimer pleinement la consommation d'énergie sans aucune information quant à l'historique de la consommation d'énergie. Ils présentent également une grande flexibilité et une capacité à modéliser les changements discontinus comme les évolutions technologiques. Lorsqu'ils prennent en compte les comportements, les hypothèses concernent le plus souvent des temps de présence, des températures, des éclairages ou des ouvertures de fenêtres par exemple, afin d'intégrer dans le modèle les impacts des usages sur les variations des ambiances thermiques du bâtiment. Les modèles statistiques ne s'appuient pas sur des principes physiques, mais sont basés essentiellement sur des données historiques. Ils cherchent ainsi à établir des corrélations entre les consommations énergétiques observées (à l'aide des informations fournies par les facturations énergétiques des clients) et les caractéristiques et l'environnement des ménages. Enfin, Swan et Ugursal (2009) proposent un dernier niveau de distinction, basé sur les techniques utilisées pour estimer les consommations. Le choix de la technique est essentiellement lié aux objectifs de modélisation. Concernant les modèles de type ingénieurs, la méthode des archétypes vise à classer les logements d'une zone étudiée en catégories en fonction de certains critères tels que la taille, le type de logement, l'année de construction, etc. Chaque catégorie est ainsi définie par une série d'attributs qui seront utilisés en entrée de la modélisation énergétique. L'estimation de la consommation est réalisée pour chaque archétype et peut-être ensuite étendue à la zone entière par multiplication avec le nombre de logements dans chaque archétype. Cette technique permet ainsi de réduire significativement les temps de simulation. La méthode des échantillons (« *sample* ») est également basée sur une volonté de réduire le nombre de simulations, mais ici par sélection d'une partie des données réelles. Cette technique permet ainsi de prendre en compte la diversité des logements pouvant exister sur la zone d'étude. Si l'échantillon sélectionné est suffisamment représentatif, il est alors possible d'extrapoler les valeurs estimées de consommation d'énergie à une échelle plus large. Enfin, la méthode de distribution de population utilise la répartition de la possession d'appareils électroménagers, et se sert de la notice de consommation commune à chaque appareil pour calculer la consommation d'énergie finale de chaque utilisation. L'estimation de la consommation à une échelle supérieure est obtenue par agrégation des consommations de chaque appareil. Au sein de cette typologie, seuls les modèles de types ingénieurs sont capables de simuler les impacts de la forme urbaine (bâtiments et îlots) sur les consommations énergétiques résidentielles, grâce à leur haut niveau de détail et à leurs modèles physiques. C'est sur cette famille de modèle que nous allons nous concentrer.

Typologie détaillée des modèles bottom-up de type ingénieur

Les modèles de types ingénieurs peuvent être subdivisés au regard des particularités de leur mode de fonctionnement : (1) des entrées et des sorties du modèle ; (2) des méthodes de simulation et de leur complexité et (3) des aspects techniques et pratiques liés à leur utilisation (Ferrando et al., 2020a; Jewell, 2020) (Figure 3-13).

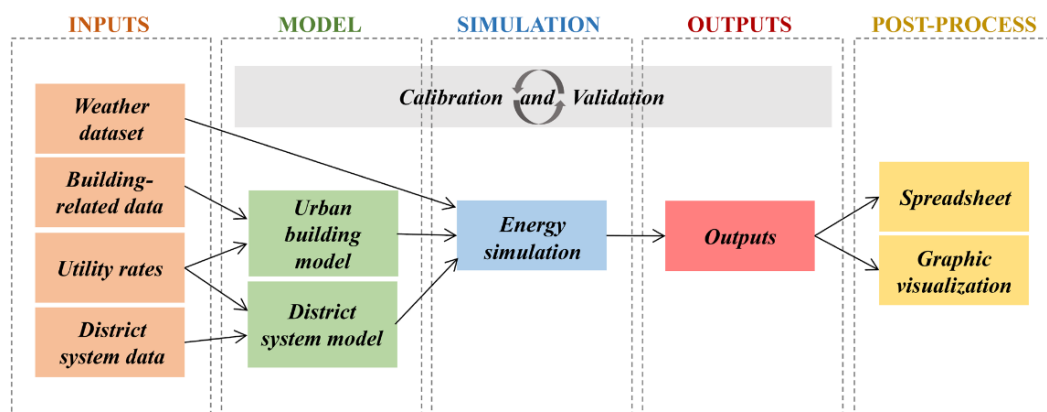


Figure 3-13 : Le fonctionnement général des modèles énergétiques bottom-up de type ingénieur (d'après Ferrando et al., 2020b).

Les entrées de données des modèles ingénieurs sont de trois types : climatiques, géométriques et non géométriques. Les données climatiques sont utilisées par la grande majorité des modèles ingénieurs et sont aujourd'hui largement accessibles avec notamment les fichiers TMY (« *typical meteorological year* ») disponibles pour de nombreuses villes au format EPW d'EnergyPlus. Les données géométriques contiennent des informations sur la forme des bâtiments et leur localisation. Ces informations sont généralement stockées dans des fichiers au format SIG (par exemple shapefile, GeoJSON, GeoPackage ou encore CityGML). Ces formats sont en effet la méthode la plus courante et la plus standard pour stocker les informations sur les bâtiments et leur environnement. De manière générale dans tous les outils de type ingénieur, les bâtiments sont simplifiés à l'extrusion de l'empreinte au sol pour la hauteur du bâtiment (Ferrando et al., 2020). Les données non géométriques correspondent aux caractéristiques thermo-physiques du bâtiment. Concernant les sorties du modèle, différents besoins énergétiques peuvent être simulés : le chauffage, la ventilation, la climatisation (CVC), l'électricité spécifique, l'éclairage ou encore l'eau chaude sanitaire pour les bâtiments résidentiels. Les simulations peuvent également être réalisées avec des pas de temps différents allant de la minute à l'année.

Concernant les méthodes de simulation, le premier critère de subdivision est le choix du modèle thermique d'enveloppe. En effet, plusieurs types de modèles existent dont trois principaux : les modèles dits « *boîte blanche* », les modèles dits « *boîtes noires* » et les modèles dits « *boîtes grises* ». Les modèles « *boîtes blanches* » sont des modèles physiques construits en utilisant des connaissances a priori sur le système et les équations du bilan thermique (Royer et al., 2014). Ces modèles sont souvent obtenus par des logiciels de simulation énergétique comme EnergyPlus (Crawley et al., 2001). Les modèles « *boîtes noires* » sont constitués d'équations différentielles et sont obtenus à l'aide de données d'entrée/sortie mesurées et de méthodes d'estimation statistiques. Ils présentent l'avantage de ne nécessiter aucune connaissance a priori, mais des données d'entrée/sortie de haute qualité sont généralement nécessaires pour obtenir des modèles précis. Enfin les modèles « *boîtes grises* » sont un intermédiaire entre les deux autres types de modèles : ils sont obtenus en utilisant les données d'entrée/sortie ainsi que des connaissances a priori sur le système. Les modèles les plus populaires parmi les boîtes grises sont les modèles RC (résistance capacité), basés sur une analogie

électrique. Ils divisent un bâtiment entier et ses surfaces en un réseau électrique fonctionnant avec des condensateurs, des résistances et des nœuds de température. Les condensateurs représentent les surfaces qui absorbent/libèrent de l'énergie et les résistances représentent les surfaces qui retardent un transfert d'énergie. Le comportement dynamique du circuit électrique permet ainsi de retranscrire l'évolution thermique du bâtiment. Un autre critère de subdivision concernant la méthode de simulation est la prise en compte d'une zone unique ou de plusieurs zones dans le bâtiment. Les modèles multizones découpent les bâtiments en plusieurs espaces possédant des caractéristiques et une occupation propres. Les différentes zones interagissent entre elles. Ces modèles très complexes sont très utilisés pour des bâtiments à usages mixtes. À l'inverse, les modèles à zone unique utilisent les caractéristiques et l'occupation globale du bâtiment. Un second critère de subdivision est la prise en compte ou non de l'environnement bâti et/ou du microclimat urbain. L'environnement bâti peut entraîner des effets d'ombrage et impacter les besoins énergétiques. Ils sont généralement pris en compte dans les modèles. Les microclimats urbains au contraire, comme les îlots de chaleurs urbains, sont rarement pris en compte, du fait de la complexité de leur modélisation (Hong et al., 2020). Enfin un dernier niveau de distinction apparaît entre les modèles de types ingénieurs et concerne les emplois du temps (présence dans les bâtiments). Ils peuvent être stochastiques ou déterministes. Les modèles stochastiques fournissent des probabilités de présence des utilisateurs dans le bâtiment (Wilke et al., 2013). Ils sont généralement basés sur des techniques de chaîne de Markov de 1^{er} ordre (Happle et al., 2018). Ils sont très utiles notamment pour le dimensionnement et l'optimisation des services d'approvisionnement en énergie car ils permettent de simuler correctement les pics de charge (Evins et al., 2016). À l'inverse des modèles stochastiques, les modèles de présence déterministes donnent un comportement entièrement reproductible et prévisible sans aucune variation. Pour un nombre important de bâtiments, ils sont suffisants en raison des effets de moyenne des modèles stochastiques (Gilani et al., 2018). Happle et al. (2018) proposent une distinction différente. Ils différencient les modèles de types ingénieurs en fonction des approches basées sur l'espace et des approches basées sur les individus. Les approches basées sur l'espace modélisent directement l'impact du comportement agrégé des occupants d'un espace : c'est une approche régie par les caractéristiques du bâtiment. L'approche basée sur les individus modélise les activités et les actions de chaque individu. C'est une approche régie par les caractéristiques des individus (comme l'âge, la CSP, ...). Si cette approche est plus complexe et plus lourde à mettre en œuvre, elle permet un plus grand réalisme. Le comportement des habitants est en effet l'une des principales raisons des écarts systématiques entre la demande énergétique calculée et celle réellement mesurée (Brøgger & Wittchen, 2018). La température de consignes de chauffage et de refroidissement, qui sont directement liées aux préférences individuelles de confort sont par exemple parmi les paramètres les plus influents des modélisations énergétiques (Mosteiro-Romero et al., 2017). Cependant, pour les études mensuelles ou annuelles, l'effet du comportement peut ne pas être significatif en raison des effets de moyenne (He et al., 2015). Concernant des aspects plus techniques, plusieurs éléments permettent de distinguer les modèles : le type de licence, l'existence d'une interface (gratuite ou payante), le type d'utilisation visée.

À partir de cette typologie, une grille de comparaison des différents outils existants est réalisée (Tableau 3-3). Nous ajoutons en complément un critère de validation et réalisation de cas d'étude. Cette grille permettra de faciliter le choix de l'outil utilisé.

Entrées du modèle	Météorologiques
	Géométriques
	Non géométriques
Méthodes de simulation et complexité des modèles	Modèle thermique d'enveloppe
	Modèle d'occupation
	Modèle de masque et de rayonnement solaire
	Modèle de microclimat urbain
Sorties du modèle	Besoins énergétiques adressés
	Pas de temps des simulations
Aspects techniques et pratiques	Licence
	Interface
	Utilisation visée
Validation du modèle	Validation
	Cas d'étude

Tableau 3-3 : Grille de comparaison des différents outils de simulation des consommations énergétiques résidentielles.

3.3.2.2 Les outils existants

L'intérêt croissant pour ce champ de recherche depuis les années 2000 a entraîné l'émergence de nombreux outils de simulation des consommations énergétiques résidentielles. Plusieurs revues détaillées des modèles existants sont proposées dans la littérature (Ali et al., 2021; Ferrando et al., 2020a; Frayssinet et al., 2018; Sola et al., 2020). Nous présentons ici les caractéristiques de plusieurs modèles utilisés en énergétique urbaine et effectuons une comparaison de ces modèles à l'aide de la grille précédemment établie.

CitySim

La plateforme CitySim (Robinson et al., 2009) est un outil de recherche open source développé à l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) en Suisse depuis 2009. Une interface graphique payante (Kaemco) est disponible. L'outil vise à réaliser des études d'aménagement à l'échelle du quartier. CitySim utilise un modèle thermique RC et permet la prise en compte d'une ou plusieurs zones dans les bâtiments. Il comprend également un modèle d'occupation (stochastique ou déterministe) ainsi qu'un modèle de rayonnement et de masque solaire qui permettent de prendre en compte l'environnement bâti. Il permet ainsi simuler cinq usages énergétiques différents dans les bâtiments à usage résidentiel uniquement : l'éclairage, l'eau chaude sanitaire (ECS), les besoins en chauffage, ventilation, climatisation (CVC) et en électricité spécifique. Le modèle a été testé sur plusieurs cas d'études (le campus de l'EPFL et le quartier de "La Jonction" à Genève notamment) et validé par Walter & Kämpf (2015).

UMI (Urban Modeling Interface)

La plateforme UMI (Reinhart et al., 2013) est un outil de recherche gratuit développé en 2013 au MIT

(Massachusetts Institute of Technology) aux États-Unis. Son objectif est d'évaluer la performance environnementale des quartiers et des villes (tous types de bâtiments) en ce qui concerne la consommation d'énergie opérationnelle et intrinsèque, la marchabilité et le potentiel d'éclairage naturel. L'outil utilise Rhinoceros (McNeel, 2013) comme interface de construction et de visualisation des résultats (Figure 3-14).

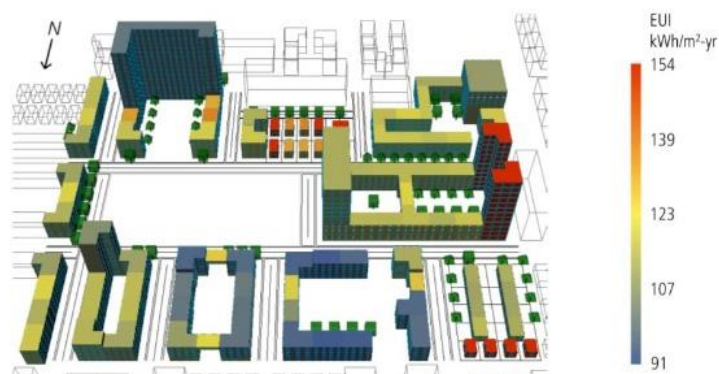


Figure 3-14 : Un exemple de résultats de l'outil UMI visualisés dans Rhinoceros (d'après Reinhart et al., 2013).

UMI est connecté à plusieurs autres outils : le modèle thermique multizone EnergyPlus, le modèle de rayonnement et de masque solaire Daysim (Reinhart, 2005), et le modèle d'îlots de chaleurs urbains Urban Weather Generator (UWG). Il dispose également d'un modèle d'occupation (déterministe) et permet ainsi de simuler quatre usages énergétiques différents dans les bâtiments : l'éclairage, les besoins en CVC, en ECS et en électricité spécifique. Le modèle a été testé sur de nombreux cas d'études (Boston, Koweït, campus du MIT par exemple) et a fait l'objet d'une validation dans l'étude de Sokol et al. (2016) .

Teaser (Tool for Energy Analysis and Simulation for Efficient Retrofit)

Teaser (Remmen et al., 2018) est un outil de recherche gratuit développé depuis 2018 par l'École supérieure polytechnique de Rhénanie-Westphalie (RWTH Aachen University). Il a pour objectif de décrire en détail l'environnement bâti à l'échelle de la ville et de caractériser les systèmes énergétiques urbains. En combinant plusieurs ensembles de données pour caractériser les bâtiments, il permet de simuler les consommations énergétiques des bâtiments résidentiels et tertiaires. Teaser utilise un modèle thermique RC simplifié, mais ne possède pas de modèle de rayonnement et de masque solaire : il ne prend ainsi pas en compte l'environnement résidentiel.

Smart-E

Smart-E (Berthou et al., 2015) est un outil propriétaire développé pour la recherche par le Centre Efficacité énergétique des Systèmes (CES) des Mines ParisTech, sans interface. Cet outil fournit des estimations très précises des consommations énergétiques résidentielles avec un modèle d'enveloppe RC multizones, un modèle d'occupation stochastique et un pas de temps à la minute. Smart-E ne prend pas en compte l'environnement urbain et le microclimat urbain. Les enquêtes emplois du temps de l'Insee sont utilisées en entrée du modèle, ainsi que les données du recensement de la population. Il n'existe pas pour le moment de connexion avec un SIG pour les données géographiques. Il permet de simuler quatre usages : le chaud, le

froid, l'électricité spécifique et l'ECS. Smart-E a été testé sur plusieurs zones (Clichy-Batignolles, Saint Denis et Paris 18^e) et le modèle thermique d'enveloppe a fait l'objet d'une validation (Berthou et al., 2014). Cet outil apparaît adapté pour l'étude de la flexibilité dans la demande thermique et électrique du bâtiment, en se concentrant sur la demande de puissance.

PowerDis-Dimosim

Powerdis-Dimosim (Perez, 2017) est un outil propriétaire développé par le Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB) et l'institut pour la transition énergétique Efficacity. Tout comme Smart-E, cet outil fournit des estimations très précises des consommations énergétiques résidentielles, avec un modèle d'enveloppe RC multizones (Dimosim), un modèle d'occupation stochastique et un pas de temps à la minute. L'environnement urbain est pris en compte au travers d'un modèle de masque. Quatre usages sont simulés pour les bâtiments résidentiels : le chaud, le froid, l'électricité spécifique et l'ECS. Une interface web est en cours de développement, l'outil étant à destination des professionnels. PowerDis-Dimosim a été testé sur plusieurs quartiers (Saclay, Toulouse Matabiau, ZAC des portes du Vercors notamment) et sa validation est en cours.

OpenIDEAS (Open Integrated District Energy Assessment by Simulation)

OpenIDEAS (Baetens et al., 2015) est un outil en open source, développé depuis 2015 par l' Université catholique de Louvain en Belgique (KU Leuven). Il se base sur des bibliothèques Modelica IDEA. Ces bibliothèques sont un environnement de modélisation énergétique qui intègrent un modèle thermique RC multizones (FastBuilding), un modèle d'occupation stochastique et un modèle de rayonnement solaire (Window & Daylighting Software WINDOW 7.0). Il adresse ainsi plusieurs besoins : le chaud, le froid, l'électricité spécifique, l'ECS et l'éclairage. Le pas de temps de simulation à la minute permet des estimations précises et notamment d'obtenir des profils de charge des bâtiments pour l'analyse des systèmes énergétiques de quartiers optimisés. Plusieurs quartiers belges ont été analysés avec ce modèle.

CityEnergyAnalyst (CEA)

CEA (Fonseca et al., 2016) est un outil open source développé depuis 2011 par l'ETH de Zurich et l'EPFL. Son objectif est d'optimiser les systèmes énergétiques des bâtiments et d'évaluer plusieurs stratégies d'efficacité énergétique à l'échelle du quartier et du district. L'outil fonctionne sur une base horaire et utilise le modèle thermique d'enveloppe de Fonseca & Schlueter (2015). Il dispose d'un modèle d'occupation stochastique ou déterministe, d'un modèle de masque et de rayonnement (DaySim). Cet outil se démarque des autres outils par sa connexion aux bases de données géométriques d'OpenStreetMap (OSM) et aux données météorologiques TMY d'EnergyPlus. Il dispose également d'une interface graphique conviviale, qui facilite grandement la gestion des données. Cet outil a été testé sur plusieurs territoires d'études en Suisse et à Singapour et a été validé. Depuis 2011, près de 40 publications ont été réalisées avec l'utilisation de CEA

¹⁶.

Le choix d'un outil

Dans notre travail, une modélisation à la minute n'apparaît pas nécessaire : ce niveau de précision est surtout utile pour l'estimation des courbes de charge. Pour l'estimation des consommations résidentielles, un pas de temps à l'heure, voir à la journée est suffisant. Concernant les modèles d'occupations, un modèle déterministe est plus approprié à notre problématique. Si ces modèles sont moins réalistes, ils n'introduisent pas d'aléatoire et permettant la comparaison des formes urbaines. En effet, quel que soit le type architectural étudié, les habitants doivent avoir le même emploi du temps afin de pouvoir isoler l'effet de la forme. Nous souhaitons également une prise en compte de l'environnement urbain (modèle de rayonnement et de masque). Pour l'ensemble de ces raisons, mais également pour son interface graphique facilitant sa prise en main, nous choisissons d'utiliser CEA dans le cadre de cette thèse. Le tableau suivant résume les différentes caractéristiques des outils présentés ici (Tableau 3-4).

¹⁶ Liste des publications principales disponible ici : <https://cityenergyanalyst.com/publications>

		CitySim	UMI	Teaser	Smart-E	Powerdis/Dimosim	CityEnergyAnalyst (CEA)	OpenIdeas
Informations générales	Début du développement	2009	2012	2018	2015	2014	2011	2012
	Laboratoires / Universités / Entreprises associées	EPFL	MIT, CCES National Science Foundation EFRI_SEED	RWTH Aachen University	CES Mines ParisTech	CSTB - Efficacity	EPFL, Singapore ETH Centre, ETH Zürich, Future Cities Laboratory	KU Leuven
	Pays concernés	Suisse	USA, Koweït	Allemagne	France	France	Suisse et Singapour	Belgique
	Site internet	https://www.epfl.ch/labs/leso/transter/software/citysim/	https://web.mit.edu/sustainableesignlab/projects/umi/index.html	http://rwth-ebc.github.io/TEASER/	https://www.ces.minesparis.psl.eu/Logiciels/Smart-E/	http://www.cstb.fr/rapport-activite/2017/enjeux/1/breves/6	https://cityenergyanalyst.com/	https://github.com/open-ideas
Entrées du modèle	Climatiques	Base de données fournie	Base de données fournie	Base de données fournie	Base de données fournie	Base de données fournie	Base de données fournie	Base de données fournie
	Géométriques	Lecture de données spatialisées CityGML	Saisie graphique dans Rhinoceros	Lecture de données spatialisées CityGML	Lecture de données spatialisées	Lecture de données spatialisées	Lecture de données spatialisées CityGML et SIG et connexion avec OSM	Base de données fournie (bibliothèques Modélica)

		CitySim	UMI	Teaser	Smart-E	Powerdis/Dimosim	CityEnergyAnalyst (CEA)	OpenIdeas
	Non géométriques	Base de données fournie	Base de données fournie	Base de données fournie (bibliothèques Modélica)	Base de données fournie	Base de données fournie	Base de données fournie	Base de données fournie (bibliothèques Modélica)
Méthodes de simulation et complexité des modèles	Modèle thermique d'enveloppe	Modèle RC (CitySim solver)	Modèle physique (EnergyPlus)	Modèle RC	Modèle RC	Modèle RC	Modèle RC	Modèle RC (fastBuilding)
	Modèle d'occupation	Déterministe ou stochastique	Déterministe	Déterministe	Stochastique	Stochastique	Déterministe ou stochastique	Stochastique (Module StROBe)
	Modèle de masque	Oui	Oui (Daysim)	Non	Valeurs constantes	Oui	Oui (Daysim)	Non ?
	Modèle de rayonnement solaire	Oui	Oui (Daysim)	Non	Non	Non	Oui (Daysim)	Oui (Window & Daylighting Software)
	Modèle de microclimat urbain	Non	Oui (UWG)	Non	Non	Non	Non	Non
Sorties du modèle	Besoins énergétiques adressés	Chaud, froid, électricité spécifique, ECS, éclairage	Chaud, froid, électricité spécifique, ECS, éclairage	Chaud, froid, électricité spécifique, ECS	Chaud, froid, électricité spécifique, ECS	Chaud, froid, électricité spécifique, ECS	Chaud, froid, électricité spécifique, ECS, éclairage	Chaud, froid, électricité spécifique, ECS, éclairage
	Pas de temps minimal des simulations	Heure	Heure	Heure	Minute	Minute	Heure	Minute

		CitySim	UMI	Teaser	Smart-E	Powerdis/Dimosim	CityEnergyAnalyst (CEA)	OpenIdeas
Aspects techniques et pratiques	Licence	Libre	Libre	MIT	Propriétaire	Propriétaire	MIT	Open source
	Interface	Oui, payante (kaemco)	Oui (Rhinceros 3D)	Non ?	Non (couplage avec Qgis envisagé)	Oui, web service (en développement)	Oui	Non
	Utilisation visée	Recherche	Recherche et professionnels	Recherche	Recherche	Professionnels	Recherche et professionnels	Recherche et professionnels
Validation du modèle	Validation	Oui	Oui		Oui	En cours	Oui	Oui
	Cas d'étude	Campus de l'EPFL, Quartier "La Jonction" de Genève,	Boston, Lisbonne, Koweït	Campus de recherche en Allemagne, Bad Godesberg (Bonn)	Clichy-Batignolles, Saint Denis, Paris 18e	Saclay, Toulouse Matabiau, ZAC des portes du Vercors	Campus universitaire ETH à Zurich, Tanjong Pagar à Singapour	3 quartiers belges, un quartier zéro-énergie belge

Tableau 3-4 : Comparaison des différents outils de simulation des consommations énergétiques résidentielles.

3.3.2.3 City Energy Analyst (CEA)

City Energy Analyst est un cadre de calcul open source pour l'analyse et l'optimisation des systèmes énergétiques des quartiers. Il est développé à l'ETH Zurich et à l'EPFL depuis 2016 et présente de nombreux avantages développés dans la partie précédente. L'architecture et le fonctionnement de CEA sont décrits en détail dans l'article de Fonseca et al. (2016) ainsi que dans la documentation officielle du logiciel¹⁷. Nous repreneons uniquement les points essentiels à une bonne compréhension ici.

Architecture de la plateforme

Pour fonctionner, CEA s'appuie sur deux grands types de bases de données, qui interagissent entre-elles : les bases de données « *par défaut* » et les bases de données « *d'entrées* ». Les bases de données par défaut sont fournies directement et stockent les données par défaut requises dans CEA. Elles relient une typologie de bâtiments à des données historiques sur les matériaux de construction, les systèmes de chauffage et de refroidissement, les propriétés thermiques, etc. Ces données sont en effet parfois difficiles à obtenir, notamment sur des zones importantes. Les bases de données d'entrée sont celles qui doivent obligatoirement être fournies par l'utilisateur. Ces dernières sont subdivisées en bases de données primaires et secondaires. Les bases de données primaires doivent obligatoirement être fournies par l'utilisateur, tandis que les secondaires peuvent être créées directement dans CEA à partir des bases de données par défaut incluses dans CEA.

- Les bases de données par défaut

Trois types de bases par défaut existent :

- Les bases de données spécifiques aux scénarios (base « *archetypes* ») : elles stockent les propriétés des bâtiments et des infrastructures qui dépendent de l'emplacement du scénario. Deux bases spécifiques existent actuellement et concernent des cas d'études singapouriens et suisses. La base suisse est ici particulièrement intéressante, construite à partir d'enquêtes sur près de 10 000 bâtiments en Suisse et, à ce titre, particulièrement adaptée au contexte suisse-européen et notamment français ;
- La base de données systèmes (base « *assemblies* ») : cette base de données stocke des informations sur les systèmes de chauffage/refroidissement, les systèmes de production d'eau chaude ou encore de ventilation dans les bâtiments ;
- La base de données des composants (base « *components* ») : cette base de données stocke des informations sur les matières premières énergétiques et leur conversion. Cette base n'est pas détaillée

¹⁷ Disponible sur le site de CEA : <https://cityenergyanalyst.com/>

ici.

Les bases spécifiques aux scénarios (suisse ou singapouriens) sont composées de deux éléments majeurs :

- L'architecture des bâtiments (base « *construction-standard* »). Cette base stocke des informations relatives aux propriétés de constructions. Six standards de constructions sont ainsi proposés en fonction de l'année de construction, chacun possédant des propriétés différentes (type de construction, le type de fenêtre ou encore le type de sol, etc.) (Tableau 3-5). Cette base de données est utile pour retrouver les propriétés des bâtiments en fonction de leur standard de construction.

Standard	Description	Année de début	Année de fin
STANDARD1	Pierre et mortier des années 1000 à 1920	1000	1920
STANDARD2	Béton et mortier des années 1920 à 1970	1921	1970
STANDARD3	Béton et mortier des années 1970 à 1980	1971	1980
STANDARD4	Béton et mortier des années 1980 à 2000	1981	2000
STANDARD5	Béton et mortier des années 2000 à 2040	2000	2040
STANDARD6	Béton et mortier des années 2000 à 2040 – Standard Minergie*	2000	2040

*Minergie est un label de qualité destiné aux bâtiments neufs ou modernisés.

Tableau 3-5 : Les standards de construction des bâtiments proposés par CEA.

- L'usage du bâtiment (base « *use-types* »). Cette base stocke les informations relatives aux horaires d'occupation des bâtiments dérivée des standards SIA 2024 (SIA, 2017), dont sont déduits l'utilisation de l'eau chaude, de l'éclairage ou encore les charges internes pour plusieurs types d'occupation. CEA propose actuellement 19 types de bâtiments différents auxquels sont associés des occupations (Tableau 3-6). Cette base est utile pour établir les besoins en énergie.

Type CEA	Usage
Multi_res	Résidentiel collectif
Single_res	Résidentiel individuel
Hotel	Hôtel
Office	Bureau
Retail	Commerces
Foodstore	Boutique alimentaire
Restaurant	Restaurant
Industrial	Industrie
School	École
Hospital	Hôpital
Gym	Gymnase
Swimming	Piscine
Serverroom	Salle de serveurs
Parking	Parking
Coolroom	Chambre froide
Lab	Laboratoire
Museum	Musée
Library	Librairie
University	Université

Tableau 3-6 : Les 19 types de bâtiments proposés par CEA.

Les différentes variables de ces deux bases de données par défaut sont répertoriées en Annexe 1 et en Annexe 2. Dans le cas d'une étude sur un autre territoire, ces différentes bases peuvent également être fournies par l'utilisateur s'il dispose des données.

Les bases de données systèmes sont également composées de plusieurs éléments :

- Les systèmes d'enveloppe (« *envelope* ») : cette base de données stocke des informations avec les propriétés détaillées des matériaux de l'enveloppe du bâtiment (capacité thermique, transmittance, coefficient d'absorption, etc.).
 - Les systèmes de production (« *HVAC* ») : cette base de données stocke des informations sur les systèmes de chauffages, de refroidissement et sur les systèmes de production d'eau chaude sanitaire, utilisées pour calculer leurs performances.
 - Les systèmes d'approvisionnement (« *Supply* ») : cette base stocke des informations sur le type d'approvisionnement énergétique pour faire fonctionner les différents systèmes de chauffage, de refroidissement, etc.
- Les bases de données primaires

Les bases de données d'entrées primaires sont obligatoires pour le fonctionnement de CEA. Toutes les bases de données d'entrée primaires doivent se conformer aux exigences établies dans la documentation officielle en termes de format, de dénomination et de noms de colonnes.

- La géométrie des bâtiments étudiés : elle consiste en un fichier de forme (« *zone.shp* ») stockant la géométrie des bâtiments étudiés. Chaque bâtiment doit être caractérisé par son nom, sa hauteur au-dessus du sol et en dessous (*cave*), le nombre d'étages au-dessus du sol et en dessous.
- L'âge et le standard de construction des bâtiments étudiés : cette base de données consiste en un fichier stockant l'âge et le standard de construction des bâtiments étudiés.
- L'usage des bâtiments étudiés : cette base de données consiste en un fichier stockant les parts des types d'occupation des bâtiments dans la zone d'analyse. En effet, un bâtiment peut abriter plusieurs usages (jusqu'à trois usages différents). Ces données sont utiles pour établir notamment les plannings d'occupation.
- La géométrie des bâtiments environnant la zone d'étude : elle consiste en un fichier de forme (« *surroundings.shp* ») stockant la géométrie des bâtiments autour de la zone d'étude. Cette base de données est utile pour calculer le rayonnement réfléchi par les bâtiments environnants dans la zone d'analyse.
- La météo de la zone étudiée : cette base consiste en un fichier .epw (EnergyPlus) stockant des données horaires sur les conditions météorologiques. Ces fichiers sont définis de manière conventionnelle et contiennent toutes les informations usuelles : la température d'air, la température de la voûte céleste, l'humidité, l'irradiation solaire, etc. À partir de mesures climatologiques des 50 dernières années, une année typique peut être construite (Typical Meteorological Year : TMY). Plus de 3000 fichiers TMY sont disponibles sur le site d'EnergyPlus¹⁸. Ces données sont utiles pour estimer le rayonnement solaire sur place, et les conditions de température et d'humidité de l'air. CEA intègre par défaut des fichiers météo TMY sur les zones de Zurich et de Singapour.
- Le relief de la zone d'étude : cette base consiste en un MNT (Raster) stockant l'élévation du terrain en mètres. Cette base de données est également utile pour calculer le rayonnement solaire réfléchi vers les bâtiments. Il est possible de générer cette base directement dans CEA (avec une élévation identique sur toute la zone d'étude).

La figure suivante synthétise l'organisation des différentes bases de données et met en évidence les liens existants entre elles (Figure 3-15).

¹⁸ <https://energyplus.net/weather>

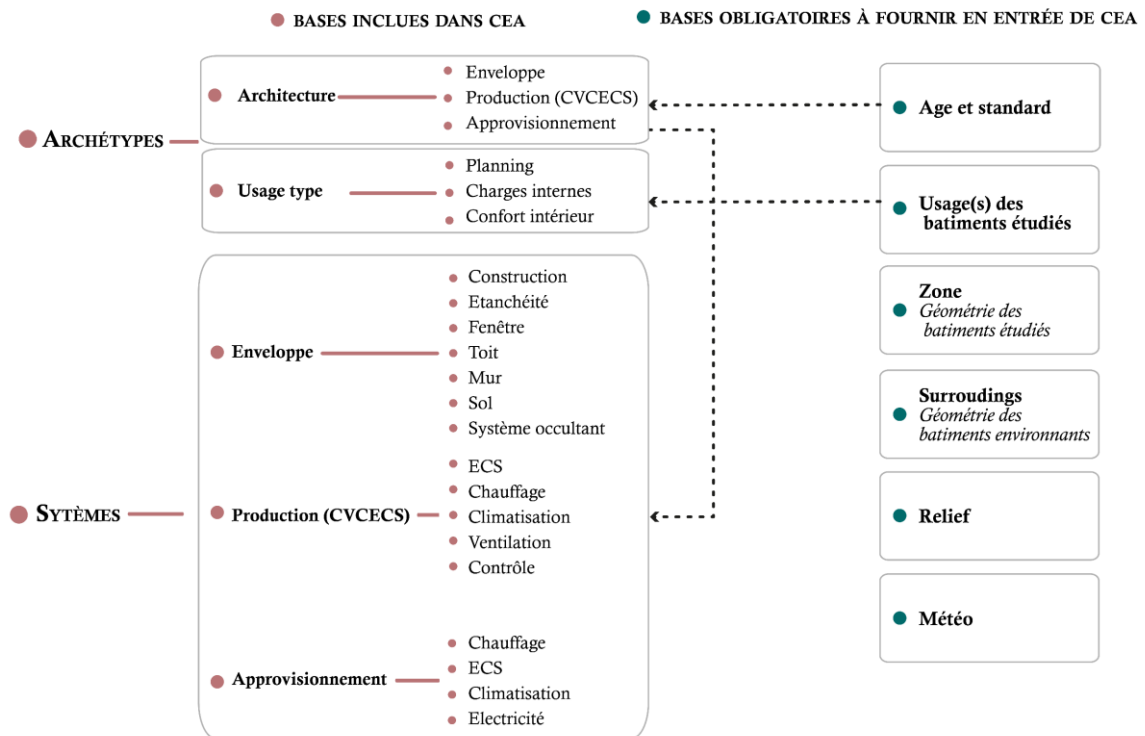


Figure 3-15 : Les différentes bases de données de CEA.

La génération des plannings d'occupation des bâtiments

À partir des bases de données d'usage des bâtiments, des plannings d'occupation sont proposés dans CEA pour chaque type de bâtiment. Ces plannings se présentent sous la forme de probabilités de présence journalière et mensuelle (Tableau 3-7).

Schedules																								
Yearly/Month																								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12												
MONTHLY_MULTIPLIER	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8												
Day/Hour																								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
WEEKDAY	0	0	0	0	0	0	0	0	0.23	0.23	0.23	0.6	1	0.6	0	0	0	0	0.2	0.2	0.6	1	0.2	0.2
SATURDAY	0	0	0	0	0	0	0	0	0.23	0.23	0.23	0.6	1	0.6	0	0	0	0	0.2	0.2	0.6	1	0.2	0.2
SUNDAY	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tableau 3-7 : Le planning d'occupation des bâtiments de type « restaurant » (d'après CEA).

Ils sont construits suivant deux méthodes, soit avec une méthode déterministe, soit avec une méthode stochastique. Le modèle stochastique d'occupation correspond au modèle de présence des occupants (Page et al., 2008), dans lequel la présence de chaque occupant est modélisée comme un processus de Markov à deux états. La figure suivante présente le fonctionnement des deux modèles, déterministes et stochastiques (Figure 3-16).

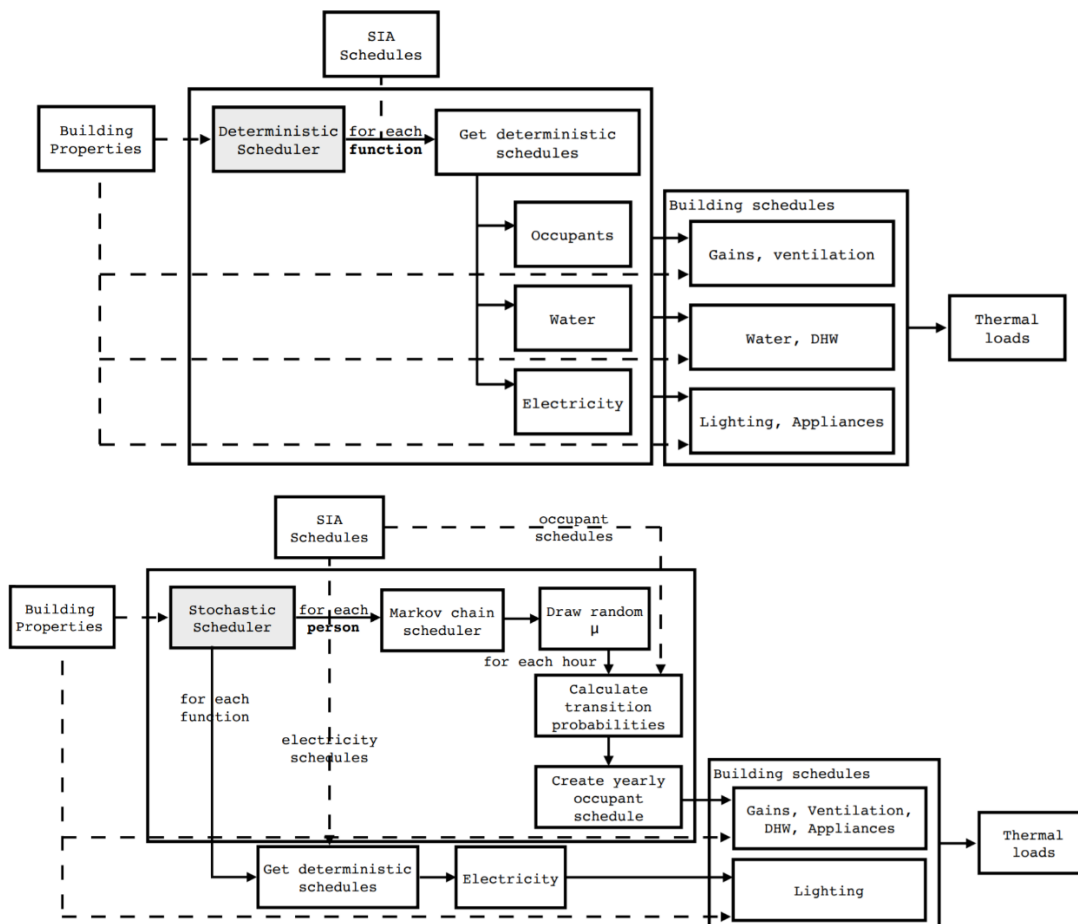


Figure 3-16 : La définition des plannings d’occupations avec un modèle déterministe (haut) et stochastique (bas) (d’après City Energy Analyst 3.26.0 documentation, 2017).

Ces plannings sont ensuite utilisés par les modules de calcul énergétique de CEA, où ils représentent soit les demandes à satisfaire pour le bâtiment en question, soit les gains internes qui doivent être pris en compte dans le modèle thermique.

Les modules de calculs énergétiques

CEA comprend une série de modules de calcul : un module de demande énergétique, un module de potentiel de ressources énergétiques, un module de technologie des systèmes, un module d’optimisation des systèmes d’approvisionnement et un modèle d’analyse en cycle de vie. Dans notre cas, seul le premier module est nécessaire et sera présenté ici. Tout d’abord, la demande d’énergie est décomposée en plusieurs utilisations finales : le chauffage, la climatisation, l’eau chaude sanitaire, l’électricité consommée par les appareils ménagers (électricité spécifique), l’éclairage et l’électricité auxiliaire pour les usages résidentiels. D’autres utilisations finales existent pour les types de bâtiments non résidentiels telles que le refroidissement des salles de serveurs, la chaleur industrielle, etc. Les consommations finales sont estimées sur une base horaire et avec différents indicateurs (intensité énergétique, courbe de charge, pic de demande, demande finale, etc.). Les besoins en chauffage et en refroidissement sont calculés avec le modèle thermique dynamique d’énergie des bâtiments de Fonseca & Schlueter (2015) (Figure 3-17).

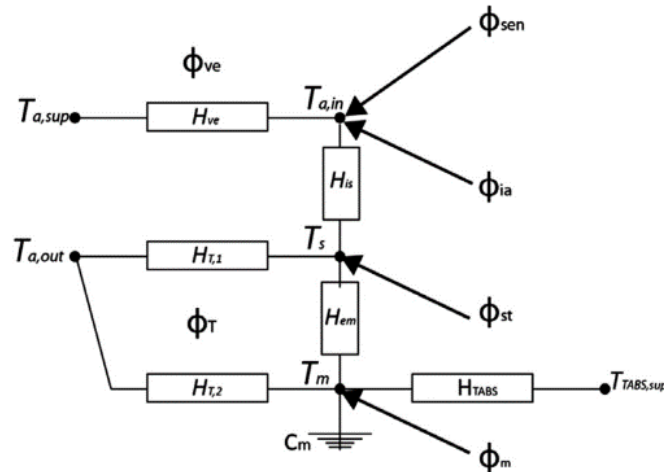


Fig. 3. Resistance-capacitance model. The three nodes of the thermal model network, $T_{a,in}$, T_s and T_m respectively represent: the indoor air temperature, a “mix” between air indoor temperature and mean radiant temperature, and the equivalent building thermal mass temperature. The heat flows from internal heat gains and solar heat sources are split between the three nodes and represented by the heat flows ϕ_{ia} , ϕ_{st} , ϕ_m . This distribution accounts for the amount of energy absorbed or released by the thermal mass of the building according to its Internal heat capacity C_m . The terms $H_{t,1}$ and $H_{t,2}$ are equivalent heat transfer coefficients due to transmittance in the nodes T_s and T_m respectively. The terms H_{TABS} and $T_{TABS,sup}$ represent the heat transfer coefficient and temperature of supply in thermo activated surfaces (In this context, TABS refers to slab-embedded HVAC systems such as floor heating or ceiling cooling systems (when existent)).

Figure 3-17 : Le modèle RC de CEA (d’après Fonseca & Schlueter, 2015).

Ce modèle est un modèle RC issu d’une analogie électrique : il divise un bâtiment entier et ses surfaces en un réseau électrique fonctionnant avec des condensateurs, des résistances et des nœuds de température. Les condensateurs représentent les surfaces qui absorbent/libèrent de l’énergie et les résistances représentent les surfaces qui retardent un transfert d’énergie. Le comportement dynamique du circuit électrique permet ainsi de retranscrire l’évolution thermique du bâtiment. Le modèle utilisé compte ici six résistances et une capacité (R6C1), tel que décrit dans la norme européenne et suisse SIA 2044 (ISO 13780). Les bâtiments sont considérés comme étant une zone thermique unique (avec une occupation mixte possible). L’utilisation de ce modèle permet de calculer la demande finale en chauffage ou refroidissement dans les bâtiments en tenant compte de l’effet de stockage de la masse thermique du bâtiment et de l’air intérieur. Il prend également en compte les échanges de chaleur entre les occupants, l’air extérieur et le rayonnement solaire. Le rayonnement solaire tient compte des surfaces, des matériaux, de la topographie et de la réflexion entre bâtiments. Le modèle de rayonnement permet ainsi d’estimer la disponibilité annuelle de la lumière du jour dans des bâtiments. Le moteur de calcul du modèle de rayonnement est basé sur le logiciel open source Daysim.

3.4 Synthèse du chapitre 3

Afin de répondre à notre problématique et d'apporter des éléments nouveaux sur la question des liens entre la forme urbaine et les consommations énergétiques individuelles, nous avons dans ce chapitre proposé une démarche de recherche qui permet d'aller au-delà des principales difficultés identifiées. Nous proposons ainsi (1) de recourir à des villes archétypales comme terrains d'étude et (2) d'avoir une approche de modélisation désagrégée des pratiques générant des consommations énergétiques. La première proposition permet d'avoir des territoires « *standardisés* », représentatifs des villes en France, caractérisés par des formes variées à toutes les échelles considérées et entièrement paramétrables. La seconde proposition qui place l'individu et son lieu de vie au cœur de la modélisation permet de spatialiser l'énergie et ainsi de combiner à la fois le secteur des transports et celui du bâtiment. Ce chapitre présente ensuite la méthodologie déployée pour modéliser les villes archétypales et les consommations énergétiques dans ses villes. Concernant les villes archétypales, différentes approches de modélisation sont retenues : une approche chorématique des structures urbaines ; une approche typo-morphologique des tissus urbains et des architectures bâties ; et une approche des réseaux de déplacement par leur constitution et leur hiérarchie. Concernant les consommations énergétiques, la plateforme de simulation des mobilités quotidiennes Mobisim-Soft est sélectionnée. Cette plateforme, développée par le laboratoire ThéMA, propose une modélisation individu-centrée et permet ainsi de répondre à nos objectifs. Concernant les consommations résidentielles, après une comparaison des atouts et inconvénients de plusieurs outils existants, la plateforme City Energy Analyst (CEA) est sélectionnée pour ce travail. La méthodologie générale de la thèse étant mise en place, il est maintenant possible de l'appliquer.

Conclusion de la partie 1

Au cours de cette première partie, nous avons pu dessiner les contours théoriques et méthodologiques du sujet. Ainsi, nous avons tout d'abord vu que les formes urbaines actuelles, résultat d'un long processus historique, ont d'importantes répercussions sur les sphères économique, sociale et environnementale du système urbain. Face au changement climatique et à la raréfaction des ressources, les formes urbaines doivent ainsi répondre aux objectifs de la transition énergétique. Ces nouveaux enjeux ont suscité un regain d'intérêt pour l'analyse des formes urbaines, et la mise en évidence d'une forme plus économe qu'une autre, plus adaptée à la mise en place de la transition énergétique est au centre des recherches actuelles sur la question. Nous avons également vu que les consommations énergétiques résidentielles et celles liées aux mobilités quotidiennes apparaissent comme un champ d'action majeur permettant de réduire significativement la consommation globale d'énergie. En tant que support et déterminant des pratiques résidentielles et des pratiques de mobilités, la forme urbaine impacte directement les consommations d'énergie associée. Cependant, bien que ce constat soit largement admis, la nature des liens entre les consommations énergétiques et la forme urbaine n'est pas clairement identifiée. L'évaluation de ces impacts reste délicate, plusieurs difficultés majeures entretenant l'ambiguïté persistante des résultats. L'une des conclusions, face à ces éléments, a été le besoin d'aborder les consommations énergétiques par l'individu et son lieu de vie, c'est-à-dire en étudiant leurs pratiques (et donc leurs consommations) face à des localisations résidentielles différentes en termes de forme urbaine. Enfin, en explicitant le positionnement méthodologique du sujet de thèse, nous avons précisé l'intérêt du recours à une approche modélisatrice multi-échelle, tant pour la modélisation des terrains d'études que pour la modélisation des consommations énergétiques. Les différentes méthodes et outils à mobiliser pour générer des villes archétypales et modéliser les consommations énergétiques individuelles ont également été présentés. Cette première partie a donc été l'occasion de développer les principaux concepts mobilisés ainsi que le positionnement méthodologique de notre travail, qui se situe à l'interface entre les recherches en énergie urbaine et les recherches en urbanisme. À présent, il est possible de modéliser et de générer les villes archétypales, qui constitueront les terrains d'étude pour l'évaluation des consommations énergétiques individuelles.

Deuxième partie

Modélisation et génération des villes archétypales

Introduction de la partie 2

La compréhension des liens entre la forme urbaine et les consommations énergétiques individuelles nécessite de réussir à isoler le facteur de forme des autres facteurs impactant ces consommations. Dans la première partie, nous avons vu que le recours à des villes archétypales comme terrains d'études permet de répondre à cet objectif. Nous avons également proposé un protocole méthodologique en trois étapes principales pour leur génération. Ces trois étapes constituent l'architecture de cette seconde partie (Figure 3-9).

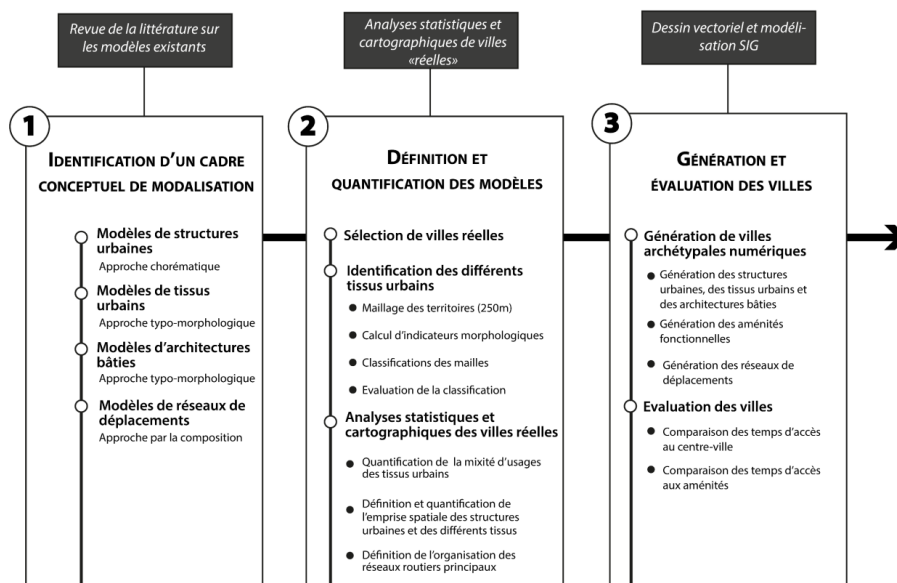


Figure 3-9 : méthodologie de génération des villes archétypales utilisée dans cette thèse.

Ainsi, dans un premier temps nous chercherons à identifier un cadre conceptuel de modélisation aux différentes échelles de la forme urbaine. À partir d'une revue de la littérature sur les modèles existants, nous sélectionnerons plusieurs modèles de structures urbaines, de tissus urbains et d'architectures bâties. L'enjeu sera de réussir à identifier des modèles représentatifs des villes françaises qui présentent des caractéristiques de formes variées afin de pouvoir explorer les effets de la combinaison de ces formes. Différents modèles de réseaux de déplacements seront également identifiés. Dans un second temps, une analyse statistique et cartographique de villes réelles permettra de préciser la définition de ces modèles urbains et d'apporter des éléments quantifiés. L'enjeu est de réussir à intégrer dans les villes archétypales l'ensemble des éléments nécessaire à la modélisation des consommations énergétiques individuelles, qui intervient dans la troisième partie. Enfin dans un dernier temps, les villes archétypales seront générées puis leur réalisme sera évalué.

Chapitre 4

Proposition d'un cadre conceptuel de modélisation des villes archétypales

Le chapitre précédent expose la problématique ainsi que les hypothèses associées. Une démarche de recherche est proposée permettant d'apporter de nouveaux éclairages sur la question des liens entre la forme urbaine et les consommations énergétiques individuelles. La génération de villes archétypales est la première étape de cette démarche : elles sont les terrains d'études pour la modélisation des consommations énergétiques individuelles. La génération des villes archétypales passe tout d'abord par l'identification de modèles conceptuels de villes dans la littérature, aux trois échelles de la forme urbaine. Ce chapitre a ainsi pour objectif d'identifier et de qualifier différents modèles de structures urbaines, de tissus urbains et de formes architecturales. Ces modèles doivent être représentatifs des villes françaises et présenter des formes urbaines variées, et ce à toutes les échelles identifiées (agglomération, quartier et îlot) afin de pouvoir ensuite explorer les effets de la combinaison de ces formes. Dans un premier temps, des modèles de structures urbaines sont identifiés et à l'aide de l'approche chorématique une modélisation graphique est proposée. Dans un second temps, des modèles de tissus urbains et d'architectures bâties sont sélectionnés, à partir d'une approche typo-morphologique. Enfin, des modèles de réseaux de déplacements sont identifiés suivant une approche par leur composition.

4.1 Les modèles de structures urbaines

Cette section expose les principaux modèles de structures urbaines identifiés dans la littérature, des premiers modèles fondateurs aux modèles plus récents. À partir de cette littérature, trois structures urbaines sont sélectionnées et une modélisation graphique est proposée.

4.1.1 Les théories fondatrices des modèles urbains

4.1.1.1 Trois modèles classiques de la structure des villes

Si les économistes allemands sont parmi les premiers à mettre en évidence le modèle centre-périphérie, les modèles urbains des sociologues américains de l'école de Chicago font figure de références (Figure 4-1).

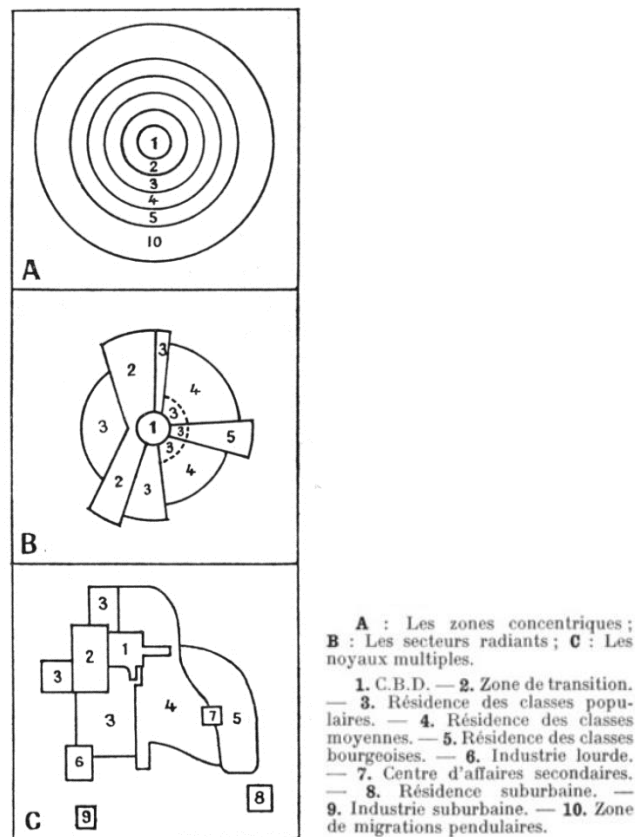


Figure 4-1 : les trois modèles classiques de la structure des villes américaines (d'après Racine, 1971).

Le modèle des zones concentriques de Burgess (1925) cherche ainsi à expliquer l'utilisation des sols par les individus, caractérisés par leur statut culturel, ethnique et socio-économique. Il introduit une nouvelle dimension de l'organisation urbaine, celle de l'évolution temporelle : à chaque sphère concentrique correspond une étape du processus d'ascension sociale, du centre vers la périphérie (Baumont et al., 1996). Avec l'évolution rapide des villes et la spécialisation de certains espaces, la modélisation en cercles concentriques n'apparaît plus suffisante pour expliquer les phénomènes de localisation : la sectorisation de l'espace devient un élément de modélisation urbaine à part entière. Le modèle de Hoyt (1939) s'inscrit dans

la suite des travaux de Burgess. Hoyt cherche également à expliquer la localisation des entreprises et des individus, mais son modèle repose sur une hypothèse nouvelle : la ville ne s'organise pas en cercles réguliers, mais en arcs de cercle ou en secteurs, localisés de part et d'autre des principaux axes routiers. Ce modèle met ainsi l'accent sur le rôle prépondérant des infrastructures de transports dans l'organisation de la ville (Antoni, 2016). Harris & Ullman (1945) vont par la suite enrichir ce modèle sectoriel. Ils partent de l'hypothèse qu'il existe dans une agglomération différents noyaux, qui se différencient par leurs fonctions et qui sont connectés par les axes de transports principaux. L'existence d'un centre majeur n'est pas remise en cause, il n'est juste plus le seul espace attractif. L'existence de ces différents noyaux entraîne une organisation de la ville en quartier type, plutôt qu'en secteurs. Ce modèle est la première représentation polycentrique de la ville (Baumont et al., 1996). Ces différents modèles sont de plus en plus complexes afin d'intégrer les différentes évolutions de la ville au cours du temps.

4.1.1.2 Les systèmes de villes

La révolution des transports et notamment le développement de l'automobile au début du 20^e siècle entraîne un renouveau des modèles urbains. Les modèles centre-périphérie et sectoriel doivent intégrer de nouveaux lieux, de nouvelles centralités et des nouvelles fonctions. Un changement d'échelle apparaît nécessaire. Les villes ne se pensent plus seules, isolées, mais comme un véritable réseau. L'un des premiers à modéliser ce système de villes est Christaller en 1933. Ce géographe allemand cherche à expliquer la taille, le nombre et la répartition hiérarchique et géographique des villes au sein d'un espace régional. Il fonde son modèle sur l'hypothèse que la structure urbaine d'un territoire s'organise de manière hiérarchique, en fonction de l'offre de biens et de la demande. Les villes s'échelonnent ainsi sur plusieurs niveaux, de la grande métropole régionale, qui offre tous les services et commerces possibles, jusqu'au village offrant peu d'aménités (Antoni et al., 2011). Ces travaux mettent en avant la notion de centralité : chaque centre « *domine* » une périphérie, fournit des biens et des services à un territoire, plus ou moins étendu selon le niveau de hiérarchie du centre. Ces territoires, aussi appelés « *aires de marché* », structurent l'espace sous forme d'hexagones emboîtés (Figure 4-2), qui correspondent à la distance qu'un consommateur accepte de parcourir pour acquérir un bien (Dumont, 2017).

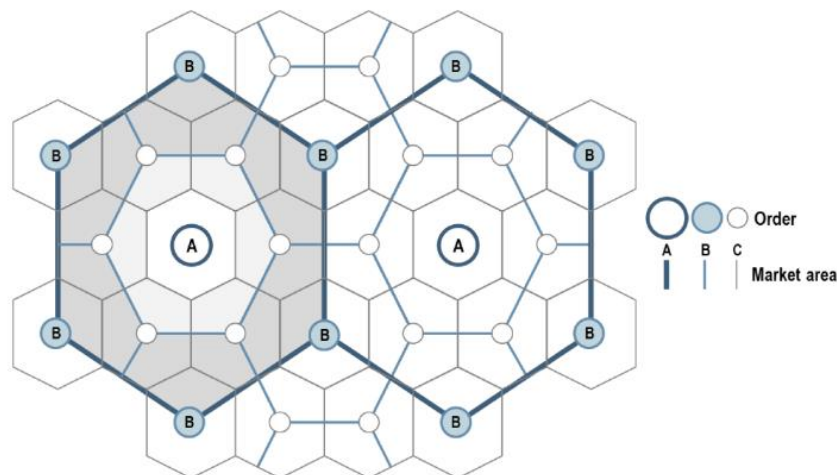


Figure 4-2 : La théorie des lieux centraux de Christaller (d'après Rodrigue, 2020).

En 1940, Auguste Lösch, économiste allemand, cherche également à analyser la hiérarchie urbaine au regard de la production industrielle. Pour analyser cette hiérarchie, il se place dans une position inverse à celle de Christaller : il part des éléments de production les plus isolés, régulièrement espacés, pour reconstruire la structure du territoire et identifier les villes les plus influentes. Il propose ainsi une sectorisation de l'espace en zones homogènes, qui traduit la spécialisation des territoires concernés. Ce cadre conceptuel n'a cessé de s'enrichir et a été repris par de nombreux géographes. On peut citer notamment les travaux et les réflexions menés sur les systèmes urbains de Denise Pumain (Pumain, 1997, 2006; Pumain & Saint-Julien, 1979) ou de Lena Sanders (Sanders, 1992, 2013).

Ces différents modèles constituent une base solide pour comprendre les évolutions structurelles des villes et fournissent les principaux éléments de modélisation de la structure urbaine que sont le centre, la distance au centre, la sectorisation de l'espace, la multipolarisation et la hiérarchie urbaine. Ces différents éléments ont été repris dans des modèles de structures urbaines plus récents, « *actualisés* » au regard des évolutions urbaines du siècle dernier.

4.1.2 Des modèles de structures urbaines actualisés

Les modèles fondateurs constituent une base solide à la modélisation des structures urbaines, mais ne prennent cependant pas en compte les évolutions importantes de la ville ces 50 dernières années. Dans la littérature internationale, de nombreux travaux plus récents proposent une description et une quantification des structures des villes. On peut citer notamment les travaux de Tsai (2005), de Crucitti et al. (2006), de Huang et al. (2007), de Cirilli & Veneri (2009), d'Adolphson (2009) ou encore de Cutsinger & Galster (2006). Concernant uniquement les villes européennes, plusieurs études existent également, avec par exemple les travaux de Thomas et al. (2008) sur des villes Belges, de Kasanko et al. (2006), de Schwarz (2010) ou encore de Le Néchet (2015) sur plusieurs villes européennes. L'étude de Le Néchet (2015) constitue une base solide pour la modélisation des structures urbaines. Il propose une classification des principales métropoles européennes ("*Larger Urban Zones*" (zones urbaines élargies) de l'Audit Urbain ayant plus de 500 000 habitants). Pour cela, il identifie à partir de la littérature sur la quantification des configurations internes des densités, plusieurs « *dimensions* » de la structure urbaine (Figure 4-3).

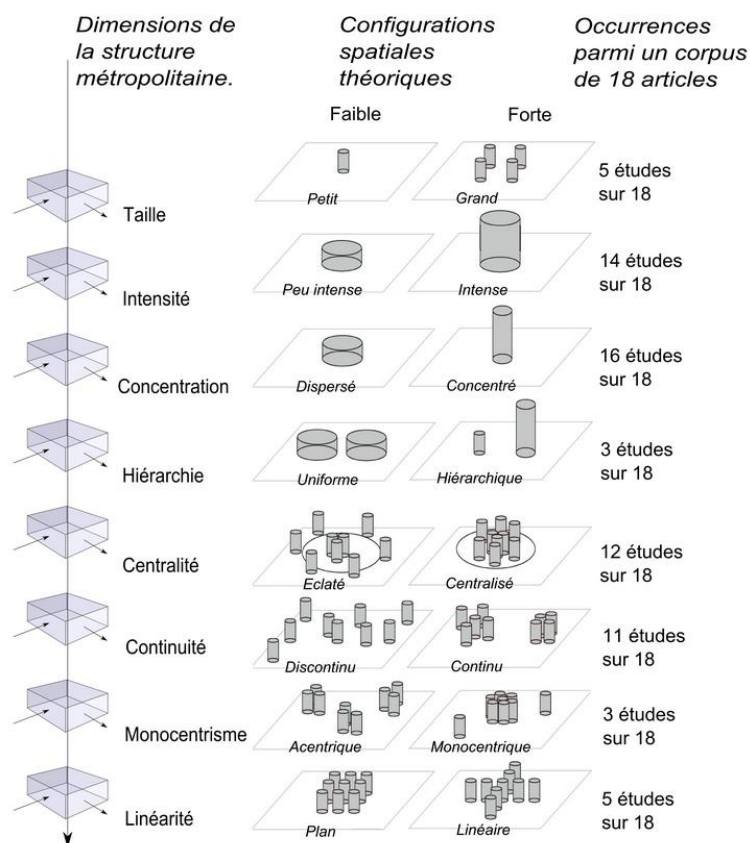


Figure 4-3 : Les dimensions de la structure urbaine identifiées dans la littérature (d’après Le Néchet, 2015).

Cette liste de dimensions nous permet d’établir un cadre d’évaluation de la diversité des structures urbaines sélectionnées. Ce cadre est construit à partir des deux dimensions principales identifiées comme impactant les consommations énergétiques et que nous souhaitons analyser, l’étalement et le caractère monocentrique ou polycentrique d’une structure urbaine. Les dimensions identifiées par Le Néchet permettent de les décliner en plusieurs sous-dimensions (Figure 4-4).

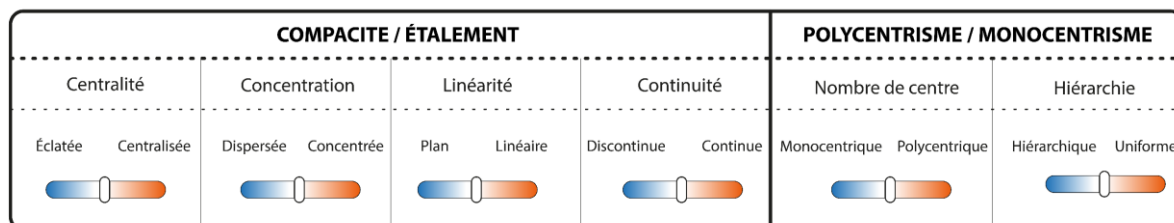


Figure 4-4 : Cadre d’évaluation de la diversité des structures urbaines sélectionnées.

Ainsi, la concentration, la centralité, la continuité et la linéarité traduisent bien différentes formes prises par l’étalement ; et le monocentrisme et la hiérarchie sont des dimensions liées au caractère monocentrique ou non d’une métropole. Le Néchet identifie également six structures urbaines au sein des villes européennes à partir de ces dimensions : les métropoles polycentriques éclatées, les monocentriques discontinues, les polycentriques hiérarchisées, les polycentriques compactes, les monocentriques denses et les monocentriques compactes. Un rapprochement de ces structures européennes est fait avec des figures « idéaltypiques », dont il

propose une représentation graphique simplifiée (Figure 4-5).

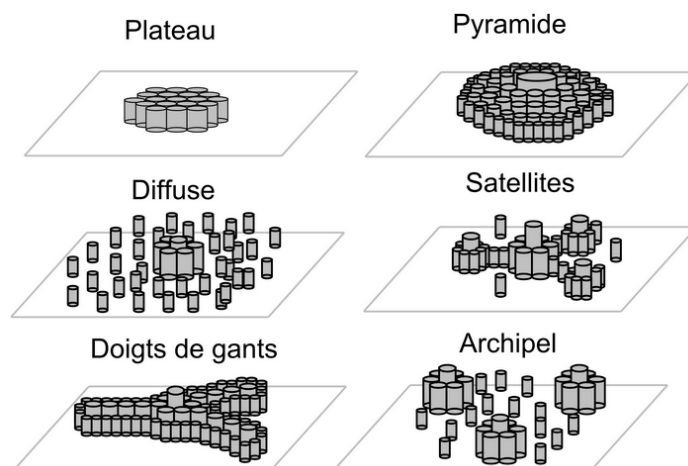


Figure 4-5 : Les six figures idéaltypiques de la structure urbaine (d'après Le Néchet, 2015).

Si ces travaux permettent de mieux qualifier et de dresser une typologie des structures urbaines des villes européennes, ils ne proposent pas une véritable modélisation graphique des structures urbaines. Ainsi, la traduction graphique des différents indicateurs de formes n'apparaît que très rarement. Une étude apparaît cependant particulièrement pertinente dans le cadre d'une modélisation de villes archétypales, recourant à l'approche chorématique. J. Baro (2015) propose ainsi dans sa thèse une typologie détaillée de modèles de structures urbaines, basée sur une analyse de 50 agglomérations françaises. À partir d'une méthode de classification des tissus urbains par transfert d'apprentissage supervisé appliquée à ces aires urbaines, elle identifie 11 modèles de structures urbaines différentes, composés de différents morphotypes¹⁹. Les différents modèles de structures urbaines obtenus et leurs représentations chorématiques sont présentés dans la figure suivante (Figure 4-6). La première ligne de cette figure regroupe les structures urbaines polycentriques. Au sein de ce groupe, les agglomérations de l'ancien bassin minier (Douai-Lens, Béthune et Valenciennes) se distinguent des autres villes par leur faible densité et leur organisation autour des réseaux routiers principaux. Dans cette catégorie polycentrique se trouvent également les villes au développement contraint du fait de leur position littorale (Bayonne, Brest, Saint-Nazaire et Lorient). La seconde ligne de la figure regroupe les agglomérations monocentriques. Au sein de cet ensemble, trois groupes se démarquent : les structures périurbaines, les structures axialisées et les structures hiérarchisées. Les structures monocentriques hiérarchisées sont nombreuses en France. Elles sont caractérisées par une très forte présence de petites agglomérations autour du centre principal. Les structures axialisées sont marquées par la présence de

¹⁹ Défini par Baro (2015) comme étant des « catégories d'espaces bâtis qui peuvent être identifiés comme étant le résultat des différents processus d'organisation ».

multiples noyaux connectés au centre principal, formant des « *doigts* ». Cette structure résulte d'un développement radioconcentrique guidé par les réseaux (majoritairement de transports collectifs) ou d'un développement contraint (par la topographie notamment). Enfin les structures périurbaines reflètent le fort mouvement d'étalement qu'on subit les villes ces 50 dernières années. Elles sont caractérisées par la présence de très nombreux villages en périphérie de la ville principale.

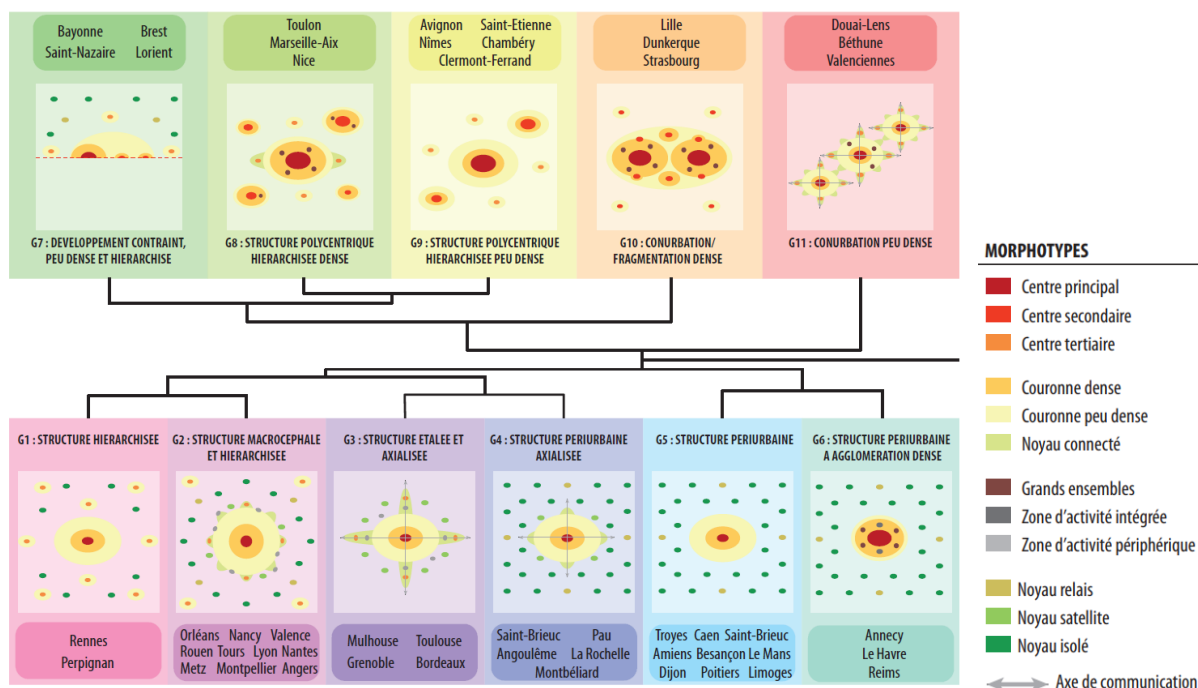
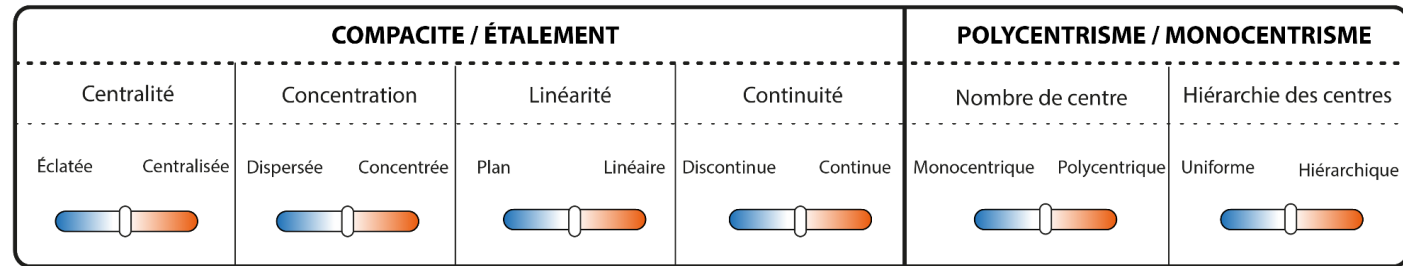


Figure 4-6 : Les modèles de structures urbaines en France (d'après Baro, 2015).

S'il serait intéressant de générer ces 11 modèles de structures urbaines comme terrains d'études, cela n'est cependant pas réalisable et une sélection a été réalisée dans le cadre de ce travail de thèse.

4.1.3 Les modèles de structures urbaines sélectionnés

Pour rappel, l'objectif de cette section est d'identifier les structures urbaines à modéliser. Ces structures doivent être réalistes et présenter des attributs de forme variés afin de pouvoir répondre à notre objectif de recherche. La grille d'évaluation construite à partir des travaux de Le Néchet nous permet ainsi d'évaluer la diversité des modèles de structures urbaines proposés par J. Baro au regard de notre problématique, l'énergie consommée. Trois modèles de structures urbaines ont ainsi été sélectionnés dans cette thèse. Ils correspondent à des modèles qui présentent des dimensions de forme variées et qui sont bien représentés en France : un modèle de ville monocentrique axialisée, un modèle de ville monocentrique périurbaine et un modèle de ville polycentrique hiérarchisée (Figure 4-7).



G1 / G2	Monocentrique hiérarchisée						
G3	Monocentrique axialisée						
G4	Monocentrique périurbaine axialisée						
G5/G6	Monocentrique périurbaine						
G7	Polycentrique contrainte						
G8/G9	Polycentrique hiérarchisée						
G10	Conurbation dense						
G11	Conurbation peu dense						

* Les structures urbaines sélectionnées sont grisées.

Figure 4-7 - Comparaison des différents modèles de structures urbaines en fonction des dimensions identifiées.

Une représentation chorématique de ces trois modèles de structure urbaine est proposée avec une résolution spatiale « *grossière* », qui correspond à l'enveloppe des groupes de bâtiments (Figure 4-8).

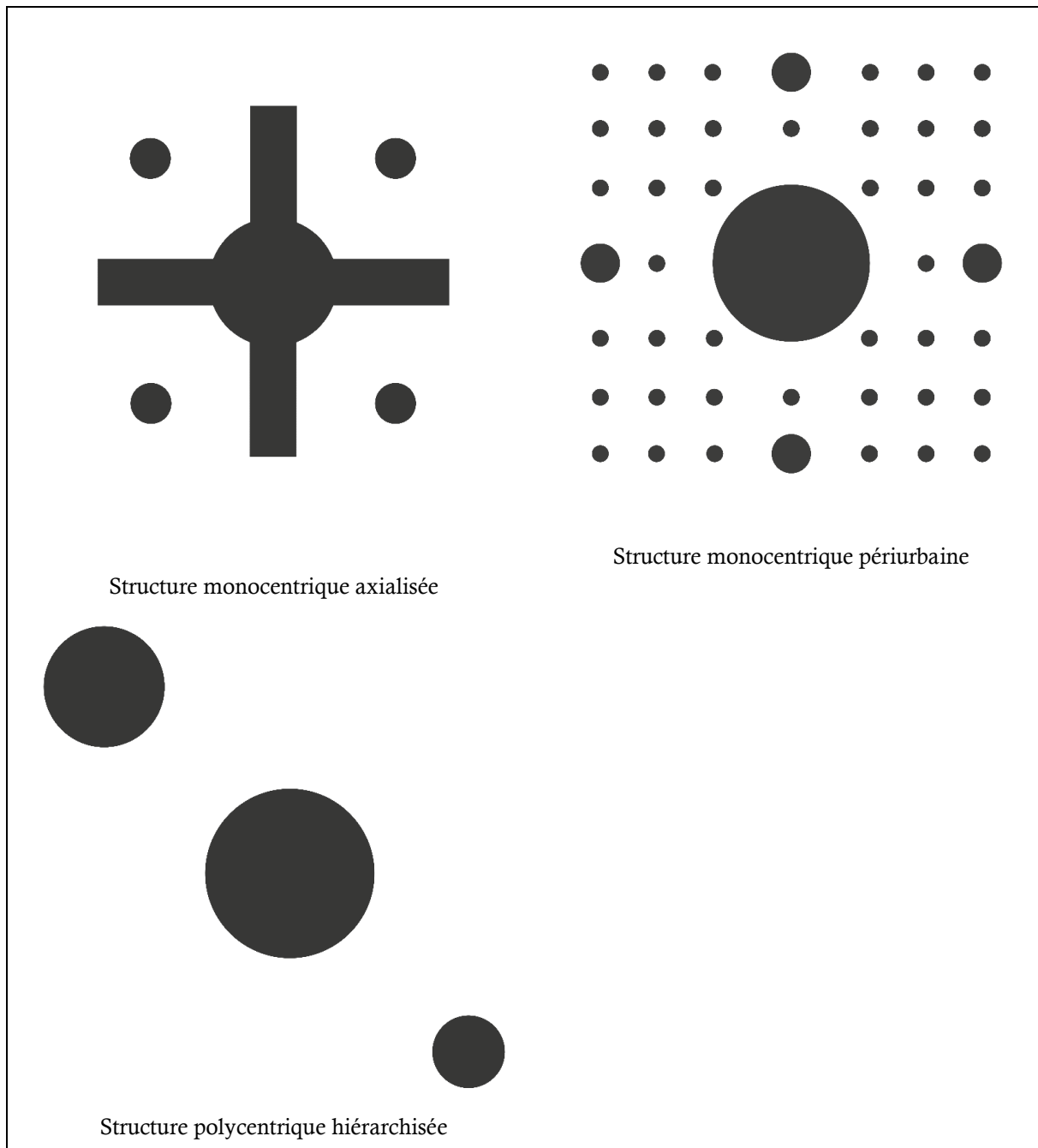


Figure 4-8 : Les trois modèles de structure de ville sélectionnés.

- La structure monocentrique axialisée est composée d'une ville centre et de quatre noyaux satellites. Elle présente les dimensions d'étalement suivantes : elle est spatialement concentrée et centralisée, continue et linéaire.
- La structure monocentrique périurbaine est composée d'une ville centre, de quatre noyaux relais et de 40 noyaux isolés. Elle est spatialement dispersée, éclatée, discontinue et non linéaire.
- Enfin, la structure polycentrique hiérarchisée est composée d'une ville avec un centre principal,

d'une ville avec un centre secondaire et d'une ville avec un centre tertiaire. Elle est concentrée, centralisée, continue et non linéaire. Elle compte plusieurs centres qui s'organisent de manière hiérarchique.

Concernant l'attribut de taille, nous avons fait le choix de modéliser des villes archétypales de type « *grande aire urbaine* », avec une emprise totale de 1600 km² (voir partie 3.1.2.2).

Si la littérature nous permet d'identifier et de sélectionner trois structures urbaines aux dimensions variées et représentatives des villes françaises, elle ne nous fournit pas tous les éléments nécessaires à la génération des villes archétypales. La surface urbanisée doit encore être définie, ainsi que la répartition de cette surface entre les différentes « *taches bâties* » composant les structures urbaines.

4.2 Les modèles de tissus urbains et de types architecturaux

La section précédente nous a permis d'identifier trois modèles de structures urbaines. L'objectif de cette section est maintenant d'identifier les modèles de tissus urbains et d'architectures bâties qui viendront composer ces structures urbaines.

4.2.1 Types de tissus urbains

L'approche typo-morphologique (voir partie 3.2.1.2) est très utilisée dans la littérature cherchant à différencier et à quantifier les quartiers des espaces urbains. Ainsi, de nombreuses typologies de tissus urbains existent aujourd'hui. Une sélection non exhaustive de travaux dressant des typologies de tissus urbains et d'architectures bâties a été effectuée pour permettre d'identifier les formes récurrentes, les types à modéliser. Ces types doivent être représentatifs des villes françaises et présenter des attributs de forme variés afin de pouvoir répondre à notre objectif de recherche. Pour rappel, les attributs de la forme urbaine impactant les consommations énergétiques étudiés dans ce travail sont :

- Pour les tissus urbains la densité de bâti, la diversité de fonction et la distance au centre ;
- Pour l'architecture du bâti, la compacité (ratio de la surface au sol sur le volume), la mitoyenneté et la profondeur de plan (surface à plus d'un mètre d'une façade).

4.2.1.1 Des typologies similaires dans la littérature

Dans la littérature scientifique française, de nombreuses études s'intéressent à l'identification statistique des quartiers (Bernabé et al., 2013; Fusco, 2018; Long & Kergomard, 2005; Sahraoui et al., 2014). Si les objectifs poursuivis de ces travaux, les méthodes statistiques appliquées et les terrains d'études choisis varient, il est cependant possible d'établir un parallèle entre les différentes typologies de ces travaux (Tableau 4-1).

	Bernabé et al., 2013	Sahraoui et al., 2014	Fusco, 2018	Long & Kergomard, 2005	Baro, 2015
Objectif de la typologie	Proposer une modélisation générique de la forme urbaine	Mieux qualifier les espaces urbains	Renouveler l'approche de la forme des tissus	Étudier l'influence des différentes formes sur la climatologie urbaine	Identifier six tissus urbains à partir d'hypothèses posées préalablement
Méthode	Classification à partir d'indicateurs morphologiques	Classification à partir d'indicateurs morphologiques et démographiques	Protocole Multiple Fabric Assessment (MFA)	Classification à partir d'indicateurs morphologiques	Connaissances a priori et validation statistique
Terrains d'étude	Nantes	Metz et Besançon	Espace métropolitain azuréen	Marseille	50 agglomérations françaises
Tissus urbains identifiés	Centre urbain	Centre	Tissus urbains anciens contraints et traditionnels (1 et 2)	Centre-ville	Centre historique
	Péri-urbain	Couronne de petit collectif	Tissus urbains discontinus et irréguliers (3)	Péricentre et petit collectif	Mixte et dense
	Grands ensembles	Couronne de grand collectif	Tissus urbains discontinus modernes (4)	Grands ensembles	Collectif
	Résidentiel dense	Périurbain groupé	Tissus périurbains résidentiels (5)	Individuel dense	Individuel groupé
	Résidentiel épars	Périurbain diffus	Tissus périurbains contraints (6)	Individuel peu dense	Individuel dispersé

Tableau 4-1 : Comparaison des différentes typologies de tissus urbains identifiées dans la littérature.

Chacun de ces auteurs caractérise les tissus urbains identifiés, de manière qualitative et/ou quantitative, et il est possible de dégager les points de consensus suivants sur les cinq types de tissus identifiés :

- Le centre urbain correspond au quartier du centre-ville historique des différents territoires étudiés et occupe donc une position centrale. Il présente une forte mixité de fonctions, une densité de bâti très élevée avec très peu d'espaces résiduels et est majoritairement composé d'habitat collectif.
- Le second tissu identifié ceinture le centre urbain. Sa position proche du centre-ville lui confère une diversité de fonctions relativement importante. C'est un tissu mixte avec une densité de bâti élevée, composé d'habitat collectif de petite envergure mais également de maisons individuelles.
- Le troisième tissu identifié est marqué par la prédominance de l'habitat collectif de grande envergure.

Il est associé à une proportion importante d'espaces non bâtis et à un développement vertical. Il occupe une position relativement centrale au sein de la ville.

- Enfin, les deux derniers types correspondent aux tissus périurbains, groupés (dense) ou plus diffus (peu dense). Ils sont situés en périphérie de la ville, dominés par des fonctions résidentielles et sont caractérisés par une prédominance de maisons individuelles avec une faible densité de bâti.

4.2.1.2 Les tissus urbains sélectionnés

Les typologies de tissus urbains étant relativement similaires dans la littérature, nous faisons le choix de modéliser les cinq tissus urbains résidentiels récurrents. À partir des différentes études analysées ici, nous posons les hypothèses suivantes concernant les différentes dimensions des tissus urbains (Figure 4-9).

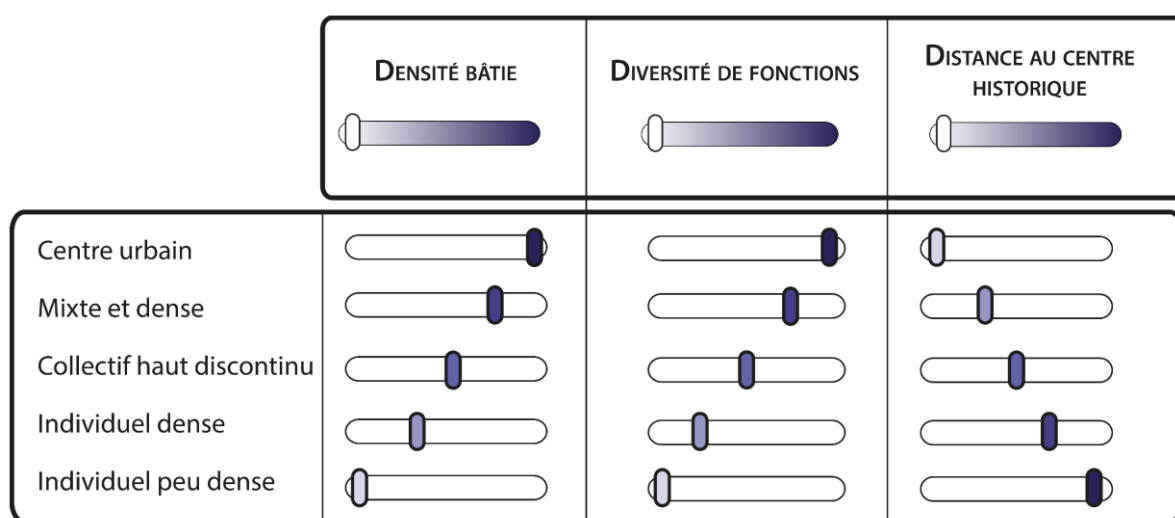


Figure 4-9 : Caractérisation des cinq types de tissus urbains sélectionnés au regard des dimensions identifiées dans la littérature.

Ces cinq tissus présentent ainsi des dimensions variées impactant les consommations énergétiques individuelles :

- Le tissu de type « *centre urbain* » est caractérisé par une forte densité de bâti, une très importante diversité de fonction et est au centre de la ville ;
- Le tissu urbain de type « *mixte et dense* » présente une forte densité de bâti également, une importante diversité de fonction et est relativement proche du centre.
- Le tissu « *collectif haut discontinu* » est peu dense, présente une faible mixité de fonction et est plus loin du centre.
- Les tissus « *individuels dense et peu dense* » sont très peu denses, avec une absence de diversité de fonctions et une distance au centre très importante.

À ces cinq types de tissus nous ajoutons le tissu urbain « *d'activités* », qui correspond aux zones d'activités commerciales et industrielles. Ce tissu n'est pas considéré comme résidentiel et nous ne modéliserons pas de consommations énergétiques. Cependant il abrite des commerces, des services et des emplois qui génèrent

des déplacements. Il est donc nécessaire de le conserver.

Si la littérature nous permet d'identifier et de caractériser qualitativement ces tissus, elle ne nous permet pas d'avoir les mesures quantitatives nécessaires à leur génération. La construction des villes archétypales nécessite en effet de connaître l'emprise de chaque tissu au sein des structures urbaines ainsi que leur organisation spatiale. De plus afin de pouvoir modéliser les consommations énergétiques individuelles avec une résolution à la maille, la diversité de fonction des tissus doit être quantifiée. Ainsi, chaque maille de tissu doit contenir un nombre de commerces, services et emplois.

4.2.2 Types d'architectures bâties

4.2.2.1 Les typologies existantes dans la littérature

Les études cherchant à réaliser des typologies à l'échelle des bâtiments s'intéressent pour la plupart à des problématiques énergétiques. Deux grandes méthodes sont généralement appliquées pour construire ces typologies : les méthodes « *statistiques* » et les méthodes basées sur des « *familles de référence* » (Bonhomme, 2013).

Les typologies construites à partir de méthodes « statistiques »

Ces typologies s'appuient sur une analyse statistique de la morphologie des bâtiments, elles ne sont pas basées sur des connaissances urbaines a priori mais sur une méthode mathématique de classification. Dans son travail de thèse, Marion Bonhomme (2013) identifie pour cela sept types architecturaux à partir d'une analyse statistique des villes de Paris et de Toulouse (Figure 4-10). Les types « *pavillon discontinu* » et « *pavillon continu* » sont caractérisés par une très faible densité et compacité, avec des hauteurs moyennes de respectivement sept et dix mètres (R+1 et R+2). Le type « *immeuble discontinu* » présente une compacité importante, ainsi qu'une importante hauteur moyenne (14 mètres soit R+4). La densité reste cependant assez faible. Les types « *immeuble continu* » et « *centre ancien* » sont très proches. Ils présentent la plus forte densité bâtie et une importante hauteur moyenne (18 mètres soit R+5/6). Les « *immeubles de grande hauteur* » se démarquent par leur forte hauteur (40 mètres soit R+12), et une compacité très élevée. Enfin les bâtiments d'activités présentent une forte hétérogénéité, mais leur principale similitude est leur emprise au sol de grande taille.




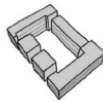



Type de quartier	Illustration
Pavillon discontinu	
Pavillon continu	
Immeuble discontinu	
Immeuble continu	
Immeuble de grande hauteur	
Centre ancien	
Bâtiment d'activités	

Figure 4-10 : Les sept types architecturaux identifiés (d'après Bonhomme, 2013).

Les typologies construites à partir de « familles de référence »

Pour établir une typologie à partir de familles de référence, chaque bâtiment est associé à un type en fonction de critères sélectionnés. C'est ce qui a été fait, par exemple, dans le travail de recherche de l'APUR sur Paris intitulé « *Consommation d'énergie et émissions de gaz à effet de serre liées au chauffage des résidences principales parisiennes* » (APUR, 2007). Dans cette étude, chaque bâtiment est classé par période de construction. Ces périodes sont définies en fonction des grandes périodes historiques qui ont marqué l'histoire urbaine, des modifications de politiques urbaines et des changements de réglementations et de normes de construction. Ainsi, neuf types architecturaux différents sont identifiés correspondant à neuf périodes de constructions (Figure 4-11).

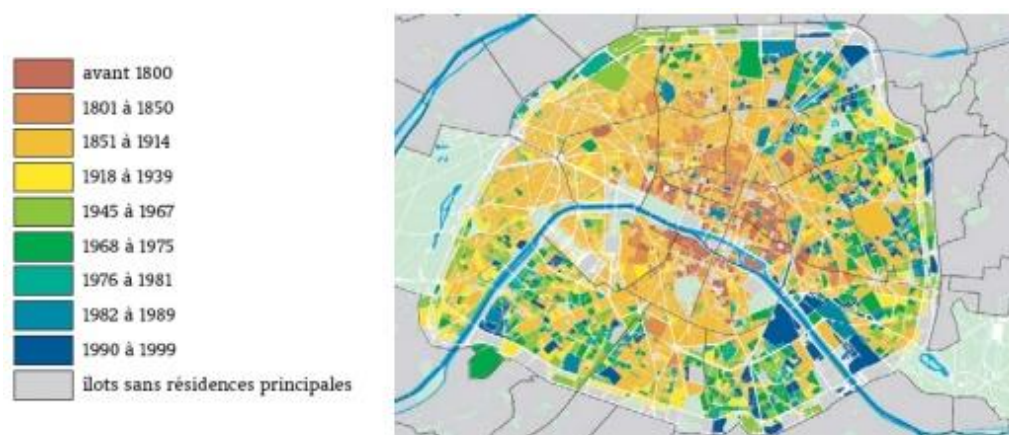


Figure 4-11 : Les neuf types architecturaux identifiés à Paris (d'après l'Apur, 2007).

Autre exemple, le projet de recherche « *Typology Approach for Building Stock Energy Assessment* » (TABULA) mené dans le cadre du programme européen Intelligent Energy Europe (IEE) entre 2009 et 2012 fait figure de référence en matière de typologie de bâtiments résidentiels. L'objectif du projet était de créer une structure harmonisée pour les "typologies de bâtiments européens" afin d'estimer la demande énergétique du parc immobilier résidentiel au niveau national et, par conséquent, de prévoir l'impact potentiel des mesures d'efficacité énergétique et de sélectionner des stratégies efficaces pour la modernisation des bâtiments existants. Sur cette base commune, chaque pays participant (dont la France) a développé une "typologie de bâtiment" nationale, c'est-à-dire un ensemble de bâtiments modèles de référence, chacun d'entre eux ayant des propriétés énergétiques spécifiques. (Loga & Diefenbach, 2010). Le projet EPISCOPE (2013-2016) a fait suite au projet TABULA, en se concentrant sur les processus de rénovation énergétique de ces différents bâtiments types. En France, la typologie des bâtiments est classée en fonction de deux paramètres spécifiques. Le premier correspond au type d'habitat : quatre classes différentes ont été choisies au regard de critères morphologiques (taille, compacité et mitoyenneté) (Tableau 4-2).

Classe	Dénomination anglaise	Définition
SFH	Single-Family House	Maison individuelle détachée sur parcelle, pas de mitoyenneté
TH	Terraced House	Maison individuelle mitoyenne sur un ou deux côtés
MFH	Multi-Family House	Petit immeuble de logements collectifs avec moins de 10 logements, mitoyen ou isolé
AB	Apartment Block	Grand immeuble de logements collectifs avec plus de 9 logements

Tableau 4-2 : Les quatre classes de bâtiments sélectionnées (d'après Rochard et al., 2015).

Le second paramètre correspond aux périodes constructives des bâtiments. Dix périodes constructives ont été établies, reflétant les grandes périodes constructives et l'évolution de la performance énergétique des bâtiments au fil des réglementations thermiques (Tableau 4-3).

N° période	1	2	3	4	5
Date de construction	avant 1915	entre 1915 et 1948	entre 1949 et 1967	entre 1968 et 1974	entre 1975 et 1981
N° période	6	7	8	9	10
Date de construction	entre 1982 et 1989	entre 1990 et 2000	entre 2001 et 2005	entre 2005 et 2012	après 2012

Tableau 4-3 : Les dix périodes constructives utilisées pour la typologie des bâtiments résidentiels en France (d’après Rochard et al., 2015).

Le croisement de ces périodes constructives avec les classes de bâtiments permet d’obtenir une matrice typologique de 40 types archétypaux, illustrés par un bâtiment exemple (Figure 4-12).

Classe bâtiment		Maison individuelle détachée SFH	Maison individuelle mitoyenne TH	Petit logement collectif (<10 log.) MFH	Grand logement collectif (≥10 log.) AR
1	Avant 1915				
2	1915 - 1948				
3	1949 - 1967				
4	1968 - 1974				
5	1975 - 1981				
6	1982 - 1989				
7	1990 - 1999				
8	2000 - 2005				
9	2006 - 2012				
10	après 2012				

Figure 4-12 : La matrice typologique des bâtiments résidentiels en France dans le cadre des projets TABULA/EPISCOPE (d’après Rochard et al., 2015).

Dans la même logique, le programme PACTE (Programme d’Action pour la qualité de la Construction et la Transition Energétique) lancé en 2015 propose également une typologie de bâtiments basée sur trois paramètres. Le premier distingue deux familles de bâtiments à partir du critère « *individuel – collectif* ». Le second paramètre correspond aux périodes constructives des bâtiments. Trois grandes périodes constructives sont établies (avant 1948, 1948 -1974, et entre 1975-2000), ainsi que six sous-périodes (avant 1914, avant

1948, 1948 – 1967, 1968 – 1974, 1975 – 1981, 1982 – 1989, 1990 – 2000). Enfin le troisième paramètre correspond à la localisation du bâtiment (urbaine ou rurale). Finalement, une matrice de dix types architecturaux est établie pour l'habitat individuel et de 16 types pour l'habitat collectif (Tableau 4-4).

PÉRIODES		TYPES	
« Ancien » Avant 1948		Immeuble de bourg	
		Immeuble Haussmannien et assimilés	
		Immeuble éclectique	
		Immeuble de type HBM	
« Récent non isolé » 1948 – 1974		Immeuble pastiche	
		Immeuble « bourgeois »	
		Habitat intermédiaire 1968 – 1974	
		Petit collectif divers 1948-1974	
		«Barres» 1948 – 1974	
« Récent isolé » 1975 – 2000		Tours 1948 – 1974	
		Habitat intermédiaire 1975 – 1981	
		Petit collectif divers 1975 – 1981	
		«Barres» 1975 – 1981	
		Tours 1975 – 1981	
		Immeubles 1982 – 1989	
		Immeubles 1990 – 2000	
PÉRIODES		TYPES	
« Ancien » Avant 1948		Maison rurale	
		Maison bourgeoise	
		Maison de bourg	
		Villa éclectique	
		Pavillon de banlieue	
« Récent non isolé » 1948 – 1974		Pavillon de la reconstruction	
		Pavillon 1968 – 1974	
		Pavillon 1975 – 1981	
« Récent isolé » 1975 – 2000		Pavillon 1982 – 1989	
		Pavillon 1990 – 2000	

Tableau 4-4 : les matrices typologiques des bâtiments résidentiels individuels (gauche) et collectifs (droite) en France dans le cadre du projet Pacte (d'après PACTE, 2017).

4.2.2.2 Les types d'architectures bâties sélectionnées

Concernant les architectures bâties, nous avons fait le choix de nous appuyer sur une typologie en huit classes basées sur un critère de famille de bâtiments et d'année de construction. Ces différentes architectures bâties présentent en effet des dimensions impactant la consommation d'énergie très différentes et reflètent bien le parc de logements existant aujourd'hui en France (Figure 4-13).

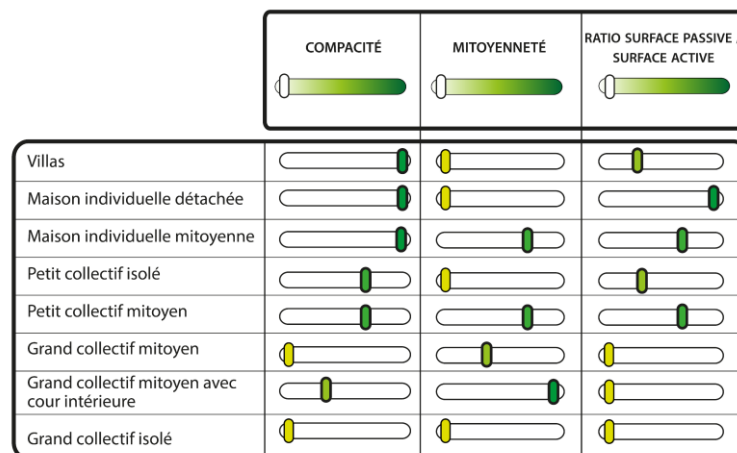


Figure 4-13 : Comparaison des différentes architectures bâties sélectionnées en fonction des dimensions identifiées.

Contrairement aux tissus urbains, la littérature nous apporte également des informations quantitatives, nécessaires à la génération de ces architectures bâties. Dans le projet Tabula, chaque classe est illustrée par un bâtiment exemple qui est caractérisé par le nombre de logements qu'il abrite, la surface chauffée, le nombre de niveaux chauffés, un facteur de forme (niveau de compacité) et des informations sur sa mitoyenneté (ou non). De la même manière, le projet Pacte propose des fiches pour chaque type de bâtiment, contenant notamment des caractéristiques architecturales. La combinaison de ces deux sources nous permet ainsi d'apporter des éléments quantitatifs nécessaires à la génération des architectures bâties (Tableau 4-5).

	Villas	Maison individuelle détachée	Maison individuelle mitoyenne	Petit collectif isolé	Petit collectif mitoyen	Grand collectif mitoyen	Grand collectif mitoyen avec cour intérieure	Grand collectif isolé
Volumétrie	R+1	R+1	R+1	R+3	R+3	R+6	R+6	R+10
Nombre de logements	1	1	1	< 10	<10	> 10	>10	>10
Hauteur totale (m)	6	6	6	12	12	21	21	30
Volume (m³)	600	294	288	1260	840	10500	5250	30000
Surface au sol (m²)	100	49	48	105	70	500	250	1000
Longueur (côté rue) (m)	10	7	8	15	10	50	10	100
Largeur (m)	10	7	6	7	7	10	30	10
Surface de l'enveloppe (m²)	320	182	180	474	344	2260	1340	5300
Compacité du bâti (surface de l'enveloppe / volume)	0,5	0,6	0,6	0,4	0,4	0,2	0,3	0,2
Taux de façade mitoyenne	0%	0%	43%	0%	41%	8%	75%	0%
Surface passive* (m²)	36	24	20	40	30	108	64	216
Surface active (m²)	64	25	28	65	40	392	186	784
Ratio surface passive / surface active	0,56	0,96	0,71	0,62	0,75	0,28	0,34	0,28

*Surface passive : surface à moins d'un mètre d'une façade non mitoyenne

Tableau 4-5 : Caractéristiques détaillées des différentes architectures bâties modélisées dans les villes théoriques.

Les maisons individuelles détachées comptent un seul logement, avec deux étages (rez-de-chaussée compris) et présentent une compacité élevée. Aucune façade n'est mitoyenne et le ratio surface passive sur surface active est très élevé. Les maisons individuelles mitoyennes comptent également un seul logement avec deux étages et ont une compacité similaire aux maisons individuelles détachées. Elles présentent cependant un taux de mitoyenneté de 43% (soit deux façades) et un ratio surface passive sur surface active plus faible (0,71). Le petit collectif isolé compte plusieurs logements (moins de 10) répartis sur quatre étages. Il présente une compacité moyenne (0,4) et un ratio surface passive sur surface active de 0,62. Le petit collectif mitoyen a la même volumétrie et la même compacité. Son taux de mitoyenneté est de 41% (soit deux façades). Le grand collectif mitoyen compte plusieurs logements (plus de 10) répartis sur sept étages. Il présente une compacité faible (0,2) et un taux de mitoyenneté de 8% (une façade). Le ratio surface passive sur surface active est faible

(0,28). Le grand collectif mitoyen avec cour intérieure présente la même volumétrie et est également peu compacte (0,3). Il présente le plus fort taux de mitoyenneté (75%), et un ratio surface passive sur surface active faible (0,34). Enfin, le grand collectif isolé présente onze étages avec une compacité et un ratio surface passive sur surface active très faibles (respectivement 0,2 et 0,28). Ces différents éléments seront utilisés lors de la génération des architectures bâties. Une représentation graphique de ces différentes architectures bâties est également proposée dans la figure suivante, facilitant la comparaison de leurs dimensions (Figure 4-14).

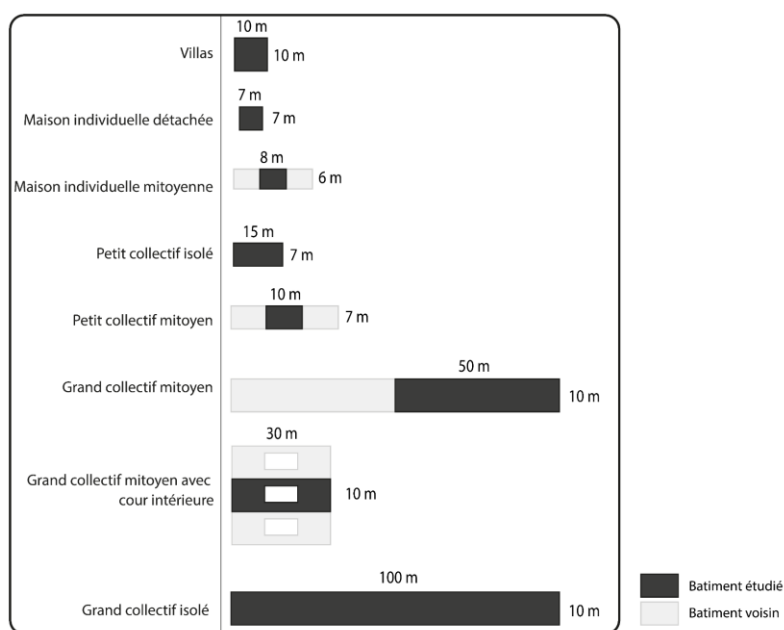


Figure 4-14 : Représentation graphique des différentes architectures bâties modélisées.

L'ensemble des mesures nécessaires à la génération des architectures bâties avec une résolution au bâtiment sont ainsi disponibles. Cependant, l'échelle de simulation des consommations énergétiques résidentielles et le niveau d'agrégation final sont la maille de tissu urbain. Il est donc nécessaire d'agréger les architectures bâties au sein des mailles de tissus urbains. Nous faisons tout d'abord le choix de générer des mailles de tissu contenant une seule forme architecturale. L'articulation des tissus urbains et des architectures bâties nécessite de connaître :

- La composition en architectures bâties des différents tissus urbains.
- La densité bâtie des mailles de chaque tissu urbain, afin de connaître le nombre de bâtiment à affecter.

Concernant le premier point, la littérature sur les tissus urbains (voir partie 4.2.1.1) et nos connaissances préalables sur les espaces urbains nous permettent de poser les postulats méthodologiques suivants :

- Le centre ancien est composé exclusivement de grand collectif mitoyen ancien avec cour intérieure ;
- Le tissu mixte et dense est composé à parts égales de maisons individuelles mitoyennes, de petit collectif isolé, de petit collectif mitoyen et de grand collectif mitoyen ;
- Le tissu collectif haut discontinu est composé exclusivement de grands collectifs isolés ;

- Le tissu individuel dense est composé à parts égales de maisons individuelles détachées et de maisons individuelles mitoyennes ;
- Le tissu individuel peu dense est composé à parts égales de maisons individuelles détachées et de villas.
- Le tissu d'activités n'est associé à aucune forme d'architecture bâti : ce tissu n'est en effet pas considéré comme un tissu résidentiel.

Certaines formes architecturales bâties sont ainsi présentes dans plusieurs tissus urbains (Figure 4-15).

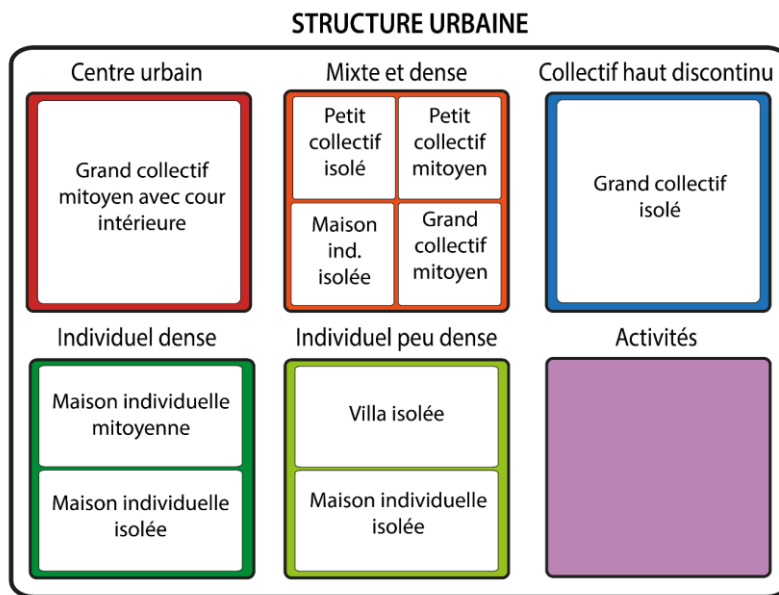


Figure 4-15 : Articulation des architectures bâties et des tissus urbains sélectionnés.

Si cette répartition simplifiée amène à des limites sur les futurs résultats, la réalité étant plus complexe, elle permet de faciliter la construction des villes archétypales, mais également la lecture des résultats. Concernant la densité bâtie des mailles de chaque tissu, celle-ci reste à quantifier.

4.3 Les modèles de réseaux de transports

La section précédente nous a permis d'identifier cinq tissus urbains et huit architectures bâties aux caractéristiques variées, qui composent les structures urbaines. L'objectif de cette section est maintenant d'identifier les modèles de réseaux de transports, qui vont permettre de connecter ces différents espaces. La modélisation des réseaux, avec un niveau d'abstraction important, par leur constitution et leur hiérarchie (voir partie 3.2.1.3) est une approche relativement rare dans la littérature existante. En effet, quelle que soit l'échelle de forme concernée, la question des réseaux de transport est souvent mise de côté dans les modèles urbains.

4.3.1 Les premiers modèles de réseaux de transports

Les premiers modèles de réseaux de transports correspondent aux plans des villes grecques et romaines. Le modèle principal est celui du réseau en damier ou en échiquier. Ce plan est né chez les Romains et était dirigé par le *cardo* (axe Nord-Sud) et le *decumanus* (axe Est-Ouest), qui constituent alors les axes dominants. Un maillage régulier constitue ensuite le réseau secondaire, de desserte locale. De très nombreuses villes européennes ont été fondées sur ce principe, et si les centres romains n'ont pas conservé la résolution de la maille initiale, ils ont conservé une orientation générale orthogonale et un pas de petite dimension (Salat et al., 2011). L'urbaniste grec Hippodamos de Milet (450 av. J.-C.) est le premier à introduire cette grille dans son plan de la ville de Milet (Figure 4-16).

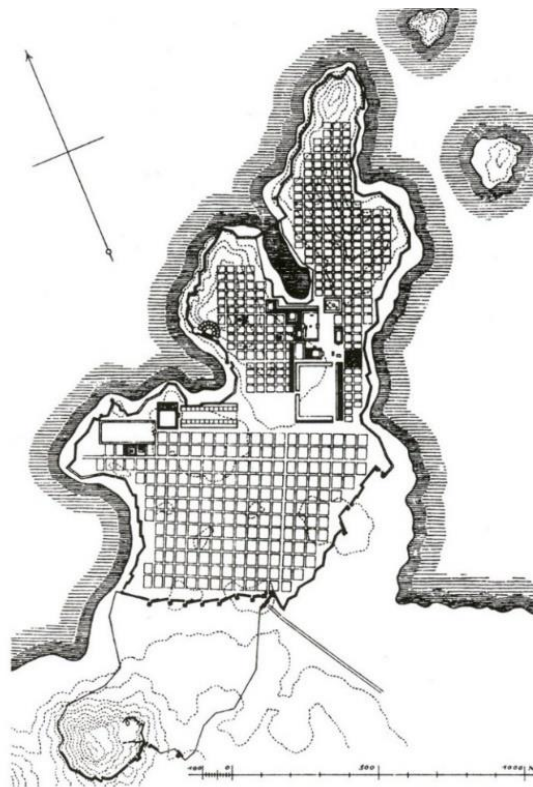


Figure 4-16 : Plan hippodaméen de Milet (d'après Gruet, 2008).

Le second modèle dégagé est le plan radioconcentrique. Ce plan a été adopté dès le Moyen-âge en Europe. La ville se construit alors sur un système de convergence vers la place du marché. Ce système en étoile va s'accroître jusqu'au 19^e siècle. Les villes connaissent alors un essor considérable, doivent accueillir une population grandissante et rénover les tissus anciens du centre. De grandes percées radiales sont créées, rompant les orientations orthogonales, pour ouvrir la ville sur l'extérieur. Au fur et à mesure de la croissance, des voies complémentaires se développent en boucles concentriques, d'abord à la place des remparts, puis de plus en plus loin du centre. Le plan de la ville de Karlsruhe au 19^e siècle illustre bien le modèle radioconcentrique (Figure 4-17).

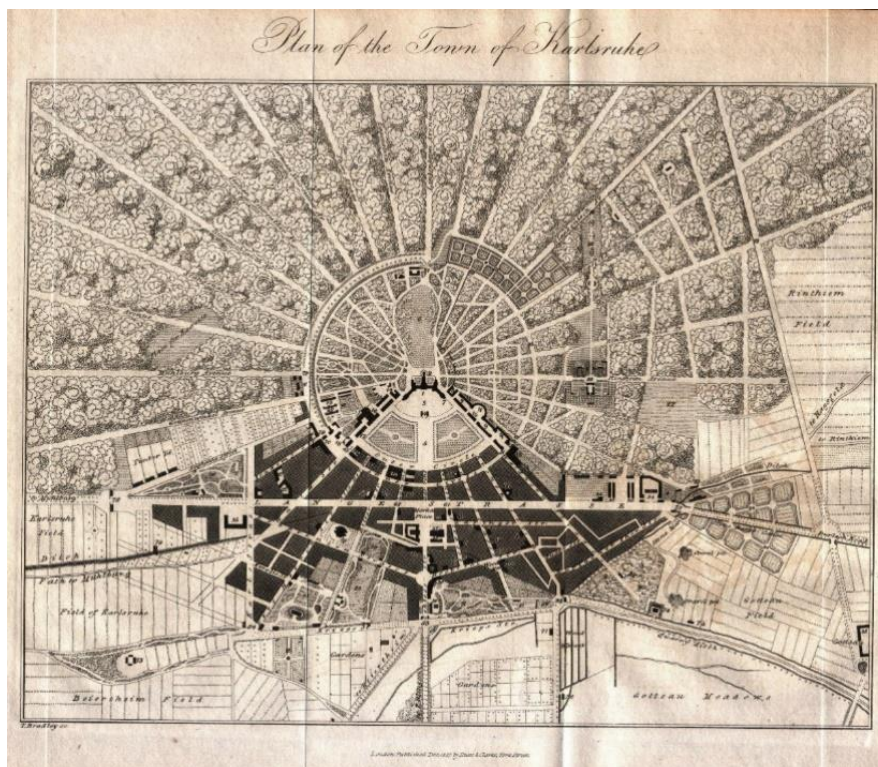


Figure 4-17 : Plan de la ville de Karlsruhe (Allemagne) en 1827 par T. Bradley²⁰.

Le troisième modèle de réseau dégagé par les plans et cartes correspond au plan linéaire. Ce plan apparaît dès la fin du 19^e siècle, et correspond à la naissance de la « ville-rue », concept initialement proposé par Arturo Soria en 1882 (Figure 4-18). Ce plan simple met en avant la fonction circulatorie de la ville : une voie unique majeure permet le développement de la ville de part et d'autre de cet axe. Aujourd'hui, une combinaison de ces modèles historiques compose les villes. Ces modèles sont ainsi toujours visibles dans les agglomérations

²⁰ Disponible ici : http://www.karlsruhe-antiquarisch.de/Plane_/Plan_of_the_Town_of_Karlsruhe_/plan_of_the_town_of_karlsruhe_.html

actuelles mais à une échelle locale, de nouvelles structures globales de réseaux de transports apparaissant à l'échelle des agglomérations urbaines.

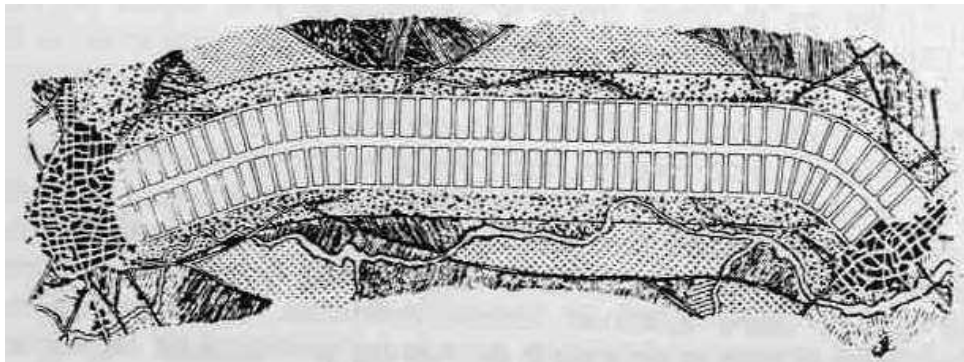


Figure 4-18 : Plan du projet de ville linéaire d'Arturo Soria.

4.3.2 Des modèles de réseaux de transports actualisés

Les travaux proposant une modélisation graphique des réseaux de transports sont relativement rares. Deux travaux principaux ont été identifiés. Dans le cadre du programme européen COST C10, intitulé « *Outskirts of European Cities* »²¹, Borsdorf (2004) propose une modélisation graphique des structures urbaines de villes européennes ainsi qu'une modélisation des réseaux de transports associés. Allain (2004) dans son ouvrage traitant de la morphologie urbaine propose également des modèles graphiques des structures urbaines de villes dans le monde incluant les réseaux de transports. Les différents modèles de réseaux proposés par ces auteurs peuvent être rapprochés des structures urbaines précédemment sélectionnées (Figure 4-19).

²¹ <https://www.cost.eu/cost-action/outskirts-of-european-cities/>

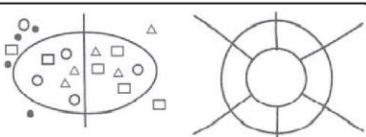

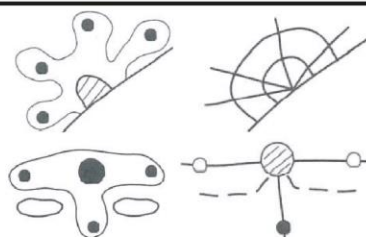

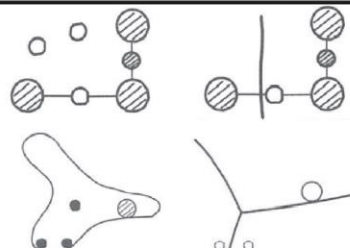
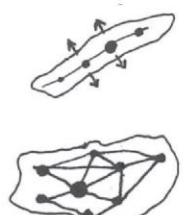
	SOURCE	STRUCTURE	VILLES ÉTUDIÉES	MODÉLISATION GRAPHIQUE
MONOCENTRIQUE PÉRIURBAINE	Borsdorf (2004)	PATCHWORK	Berlin	
	Allain (2004)	RADIO-CONCENTRIQUE	Paris Vienne Atlanta Baltimore	
MONOCENTRIQUE AXIALISÉE	Borsdorf (2004)	EN DOIGT DE GANT	Copenhague Helsinki	
	Allain (2004)	MODÈLE EN ÉTOILE	Copenhague Lyon Nantes Washington Stockolm	
POLYCENTRIQUE HIÉRARCHISÉE	Borsdorf (2004)	POLYNUCLÉAIRE	Saint-Sébastien Florence	
	Allain (2004)	LINÉAIRE POLYCENTRIQUE RÉTICULAIRE POLYCENTRIQUE	Le Caire Seattle Détroit Los Angeles Ruhr Rhin-Neckar	

Figure 4-19 : Les modèles de réseaux de transports et structures urbaines associées.

La structure monocentrique périurbaine peut être rapprochée de deux modèles de réseaux. Le premier correspond au modèle de réseaux associé à la structure urbaine en « *patchwork* », proposé par Borsdorf ; le second au modèle de ville radio-concentrique proposé par Allain. Nous retrouvons ici la structure radio-concentrique à l'échelle de l'agglomération, composée d'axes concentriques et de radiales qui permettent de mailler l'ensemble des espaces urbanisés de l'agglomération. La structure monocentrique axialisée peut également être rapprochée de deux modèles, celui en « *doigt de gant* » et celui « *en étoile* ». Les réseaux de transport s'organisent en étoile autour du centre principal et suivent les différents « *doigts* » d'urbanisation. Dans la ville de Copenhague, ces axes radiaux sont complétés par des axes concentriques qui permettent de

connecter les différents corridors entre eux sans passer par le centre. Nous retrouvons ainsi une structure de réseau radioconcentrique à l'échelle de cette agglomération. Enfin la structure polycentrique hiérarchisée peut être rapprochée des modèles « *polynucléaire* », « *linéaire polycentrique* » et « *réticulaire polycentrique* ». Le polycentrisme peut ainsi générer deux formes de réseaux différentes selon la configuration qu'il prend. Certaines villes présentent des réseaux linéaires, qui viennent connecter les différents pôles alignés sur un même axe. Une structure plus complexe peut également apparaître lorsque les pôles urbains sont plus nombreux et non alignés, générant la création d'un véritable maillage, plus ou moins régulier, connectant les pôles.

4.3.3 Les modèles de réseaux de transports sélectionnés

Concernant les réseaux routiers secondaires des villes archétypales, nous faisons le choix d'utiliser un plan en damier couvrant l'ensemble des zones urbanisées. Ce quadrillage de réseaux possède une résolution de 250 mètres, pour correspondre à celles des mailles de tissus urbains. Si ce choix entraîne une simplification importante dans la forme des réseaux secondaires, la réalité étant bien plus complexe, il permet de faciliter la génération de ce réseau. Concernant les réseaux routiers principaux, la littérature nous a permis d'identifier plusieurs grands modèles de réseaux à l'échelle des agglomérations. Cependant ces modèles ont été élaborés en considérant des métropoles internationales de taille souvent largement supérieure à celle des structures urbaines modélisées ici. Il nous paraît nécessaire de vérifier que ces modèles sont également applicables à des villes plus restreintes, dans un contexte français. De plus, les modèles identifiés présentent la structure générale des réseaux, leurs « *empreintes* » spatiales, mais n'abordent ni la question de la hiérarchisation des différents axes (qui a un impact notamment sur les vitesses de déplacements) ni celle de la position des réseaux par rapport aux différents tissus urbains. L'analyse de villes réelles dans le chapitre suivant permettra d'apporter des éléments complémentaires pour la modélisation des réseaux routiers principaux.

4.4 Synthèse du chapitre 4

Ce chapitre nous a permis d'identifier et de sélectionner les modèles de villes à partir de la littérature, aux trois échelles de la forme urbaine. À l'échelle de l'agglomération, les théories fondatrices des modèles urbains associées à des modèles actualisés nous ont permis de sélectionner trois modèles de structures urbaines : la structure monocentrique périurbaine, la structure monocentrique axialisée et la structure polycentrique hiérarchisée. À l'échelle des quartiers, six tissus urbains ont été identifiés au travers des différentes typologies de quartier existantes. Ces tissus sont le centre urbain, le tissu mixte et dense, le tissu collectif haut discontinu, le tissu individuel dense, le tissu individuel peu dense et un tissu d'activités. Enfin, huit architectures bâties ont été sélectionnées et réparties dans les différents tissus urbains. Les modèles sélectionnés présentent tous des caractéristiques variées et sont représentatifs des villes françaises. Concernant les réseaux de transports, un plan en damier couvrant l'ensemble des zones urbanisées a été sélectionné comme réseau secondaire. Si cette première partie nous a permis d'identifier un cadre conceptuel de modélisation, certains éléments nécessaires à la génération des villes archétypales restent à apporter (Figure 4-20).

STRUCTURE URBAINE	ARCHITECTURE BÂTIE
✓ Modèle graphique des structures	✓ Modèle graphique des architectures bâties
✓ Emprise de l'agglomération	✓ Dimensions et volumétrie des batiments
✗ Surfaces artificialisées totale	✓ Répartition au sein des tissus urbains
✗ Surfaces des différentes taches bâties	✗ Nombre de batiment par maille
TISSU URBAIN	RÉSEAUX DE TRANSPORTS
✗ Surfaces de tissus par structure urbaine	✓ Modèle graphique des réseaux secondaires
✗ Organisation spatiale dans les structures urbaines	✗ Modèle graphique des réseaux primaires
✗ Nombre d'aménités fonctionnelles par maille	✗ Hiérarchisation détaillée des axes de transports

Figure 4-20 : Les apports et les manques des modèles urbains conceptuels identifiés dans la littérature pour une génération de villes archétypales.

Tout d'abord, si la littérature permet de caractériser qualitativement les structures urbaines et les tissus urbains sélectionnés, des mesures quantitatives restent nécessaires pour une génération de ces formes. Enfin, si plusieurs modèles de réseaux de transports majeurs ont été identifiés dans la littérature, des analyses complémentaires sont nécessaires afin de les enrichir et de réaliser une sélection. Un enrichissement et une quantification des modèles urbains conceptuels sont donc nécessaires, ce qui fait l'objet du chapitre suivant.

Chapitre 5

Définition et quantification des modèles urbains conceptuels

Le chapitre précédent identifie et qualifie différents modèles de structures urbaines, de tissus urbains et de formes architecturales. Trois structures urbaines sont modélisées, monocentrique périurbaine, monocentrique axialisée et polycentrique hiérarchisée. Ces structures sont composées de six tissus urbains, dont cinq à dominante résidentielle et un tissu d'activités. Ces différents tissus sont eux-mêmes composés de huit architectures bâties. Ces différents modèles sont représentatifs des villes françaises et présentent des formes urbaines variées. Ils constituent le cadre conceptuel de la modélisation des villes archétypales, mais ne permettent pas directement la génération de ces villes. Une description quantitative de ces différents modèles est encore nécessaire afin de disposer de l'ensemble des éléments nécessaire à cette génération. Ainsi l'objectif de ce chapitre est de quantifier les différents modèles urbains conceptuels précédemment identifiés à partir de l'analyse de plusieurs villes « réelles ». Une identification des différents tissus urbains au sein de ces villes est tout d'abord nécessaire et fait l'objet de la première partie de ce chapitre, puis un ensemble d'analyses statistiques et cartographiques est mené sur ces villes dans la deuxième partie de ce chapitre.

5.1 Identification préalable des tissus urbains à modéliser dans des villes réelles

Dans cette section, notre objectif est d'identifier auprès d'un échantillon de villes réelles, les tissus urbains que nous modéliserons par la suite dans nos villes archétypales. Pour rappel, ces tissus sont les suivants : (1) le type « *centre urbain* », (2) le type « *mixte et dense* », (3) le type « *collectif haut* », (4) le type « *individuel dense* », (5) le type « *individuel peu dense* » et (6) le type « *activités* ». Dans un premier temps, plusieurs villes réelles sont sélectionnées, puis les différents tissus urbains sont identifiés par une méthode statistique de classification. Cette classification est ensuite évaluée.

5.1.1 Mise en place de la méthodologie d'identification des tissus urbains

5.1.1.1 Les villes réelles sélectionnées

Dans son travail de thèse, Baro (2015) propose une typologie de 50 grandes aires urbaines françaises par type de structure urbaine. Parmi ces aires urbaines, nous retenons comme terrains d'études trois villes monocentriques périurbaines (Amiens, Besançon et Limoges), trois villes monocentriques axialisées (Nîmes, Chambéry et Clermont-Ferrand) et trois villes polycentriques hiérarchisées (Mulhouse, Grenoble et Bordeaux) (Tableau 5-1).

Villes sélectionnées	Population municipale	Population aire urbaine	Superficie aire urbaine (km ²)
Amiens	132 874	294 595	2 116
Besançon	116 676	250 563	1 883
Limoges	133 627	283 823	2 309
Nîmes	151 001	266 175	776
Chambéry	59 183	223 280	794
Clermont-Ferrand	142 686	482 472	2 415
Mulhouse	108 999	285 603	505
Grenoble	158 180	690 050	2 615
Bordeaux	252 040	1 215 769	5 613

Tableau 5-1 : Les aires urbaines sélectionnées, leur population et leur superficie.

5.1.1.2 Emprise et résolution spatiale

Les villes théoriques modélisées sont des grandes aires urbaines, dont l'emprise est de 1600 km² soit un carré de 40 km par 40 km. Dans un souci de cohérence et dans le but de limiter les temps de calcul des indicateurs, le territoire étudié des villes réelles sectionnées est défini à partir d'un cercle de 20 km de rayon depuis la

mairie de la commune principale, approximation du point central de ces villes.

La résolution spatiale choisie pour le calcul des différents indicateurs doit permettre d'identifier à la fois un tissu dense comme celui du centre-ville mais également un tissu lâche, comme dans le périurbain. Elle ne doit ainsi pas être trop fine, au risque de trop fragmenter les bâtiments, mais doit être suffisamment précise pour réussir à identifier les différents tissus urbains. Dans la littérature, les auteurs cherchant à identifier des tissus urbains (voir partie 4.2.1), utilisent différentes résolutions spatiales. Sahraoui et al. (2014) associent leurs indicateurs au bâtiment, « *plus petit des objets disponibles pour décrire la ville, afin de conserver l'échelle d'analyse la plus fine possible* ». Dans le protocole MFA, Fusco et Araldi (Araldi et al., 2018; Fusco, 2018) calculent des indicateurs à l'échelle d'une « *bande de proximité autour de la rue* », en accord avec le point de vue du piéton. Enfin d'autres auteurs proposent d'utiliser un maillage uniforme sous forme de grille, la taille de la maille varie alors entre 200*200 mètres (Baro, 2015; Bernabé et al., 2013; Long & Kergomard, 2005) et 250*250 mètres (Bonhomme, 2013). Après un test de ces deux résolutions spatiales (200*200 et 250*250) sur une seule ville réelle, nous faisons le choix de retenir la maille la plus large. Nous n'observons en effet pas de différences notables dans la lecture des résultats et préférons conserver une maille large qui diminue le nombre total de mailles à traiter. Cela représente près de 20 200 mailles par territoire étudié (contre 31500 avec des mailles de 200*200), soit 182 000 mailles au total (contre 283 000 mailles de 200*200).

5.1.1.3 Les indicateurs et les sources de données

Dans les différentes études cherchant à identifier des tissus urbains au sein des villes plusieurs types d'indicateurs sont utilisés (Figure 5-1). Les plus fréquents sont tout d'abord les indicateurs de morphologie du bâti, caractérisant leur forme et leur organisation (Baro, 2015; Bernabé et al., 2013; Bonhomme, 2013; Fusco, 2018; Fusco & Araldi, 2018; Long & Kergomard, 2005; Sahraoui et al., 2014). Ces indicateurs sont par exemple la compacité, la surface d'enveloppe ou encore le volume. Les indicateurs d'environnement résidentiel du bâtiment sont également très utilisés : ils peuvent être liés à l'occupation du sol (Araldi et al., 2018; Baro, 2015; Bernabé et al., 2013; Bonhomme, 2013; Long & Kergomard, 2005; Sahraoui et al., 2014), à l'accessibilité (Sahraoui et al., 2014) ou bien encore à la population présente (Baro, 2015; Bonhomme, 2013; Sahraoui et al., 2014). Ces indicateurs sont par exemple la densité nette de bâti, le temps d'accès au centre-ville ou encore la densité de population. Le troisième type d'indicateurs est lié au découpage foncier (Bonhomme, 2013; Sahraoui et al., 2014). Ces indicateurs peuvent caractériser la forme des parcelles (largeur sur rue, compacité) ou leur répartition et organisation (nombre, densité). Enfin, des indicateurs de morphologie des réseaux viaires sont également utilisés (Araldi et al., 2018; Baro, 2015; Bonhomme, 2013; Fusco, 2018). Ce sont par exemple la surface des tronçons routiers ou encore le degré de sinuosité.

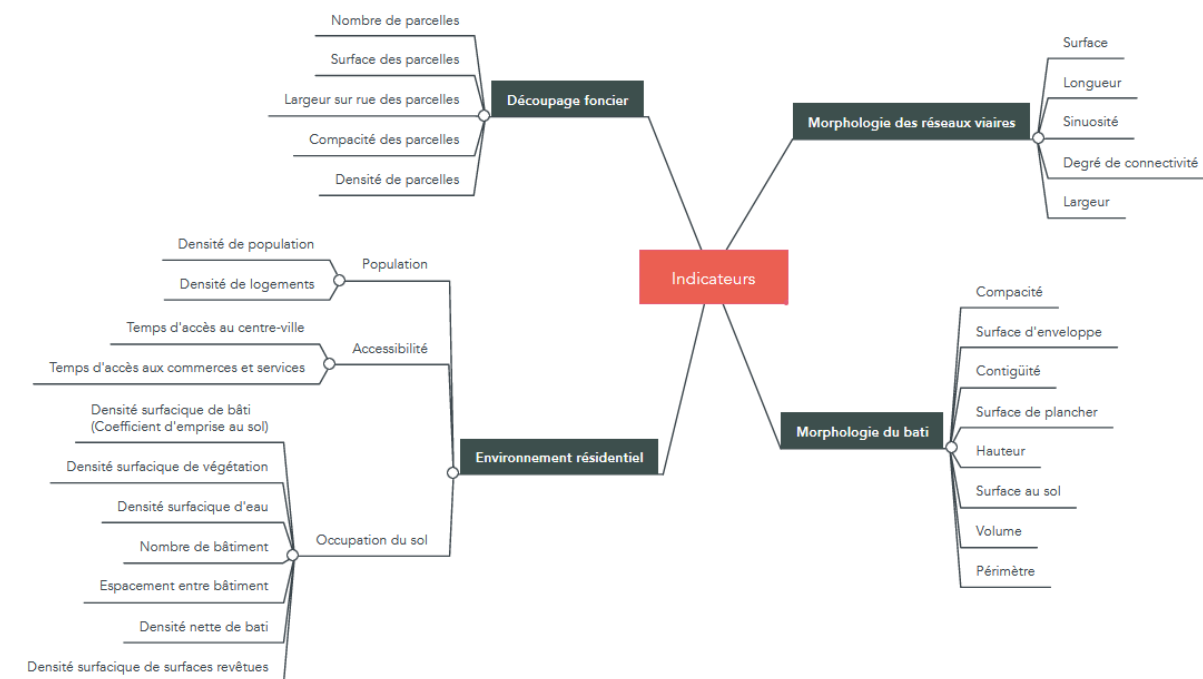


Figure 5-1 : Synthèse des indicateurs identifiés dans la littérature.

Notre objectif est de proposer une méthode « *automatique* » pour identifier les différents tissus urbains qui composent la ville, en limitant le nombre d'indicateurs et le nombre de sources d'information nécessaires à la construction d'une base de données. Nous souhaitons également travailler avec des bases de données homogènes à l'échelle de la France, travaillant sur neuf terrains d'étude différents. Ainsi, des indicateurs utilisant une seule source de données sont sélectionnés. Cette source est l'institut national de l'information géographique et forestière (IGN), qui est un établissement public à caractère administratif ayant pour mission d'assurer la production, l'entretien et la diffusion de l'information géographique de référence en France. Les bases de données suivantes seront sollicitées : la BD Topo et la BD Parcellaire (mises à jour en 2018). La BD Topo est une base de données vectorielle qui fournit des informations à l'échelle de l'objet sur différentes thématiques : les bâtiments, les routes, la végétation, les réseaux hydrographiques, etc. Chaque objet est décrit géométriquement (forme et localisation de l'élément) et sémantiquement (nature et caractéristiques de l'élément). La BD Parcellaire est également une base de données vectorielle et fournit l'information cadastrale numérique, géoréférencée et continue sur l'ensemble du territoire français. Elle est réalisée à partir de l'assemblage du plan cadastral dématérialisé.

Au regard de ces objectifs, nous obtenons le jeu de paramètres présentés dans le tableau suivant (Tableau 5-2). Concernant les indicateurs de morphologie du bâti, quatre indicateurs sont retenus : la hauteur, la surface au sol, la surface d'enveloppe et la compacité. Le nombre et la surface des parcelles sont choisis comme indicateur du découpage foncier. Concernant l'environnement résidentiel, quatre indicateurs sont calculés : le nombre de bâtiments dans la maille, la densité bâtie nette, la densité surfacique de bâti (aussi appelé coefficient d'emprise au sol du bâti) et la densité surfacique de végétation. Pour les indicateurs calculés à l'échelle du bâtiment ou de la parcelle, le calcul de la moyenne permet d'obtenir une tendance centrale pour la maille, tandis que l'écart type permet de savoir si cette moyenne est représentative des éléments d'une

maille.

	Indicateur	Définition	Base de données	Échelle de calcul
1	h_m_bati	Hauteur moyenne des bâtiments intersectant une maille	IGN BD Topo	Bâtiment
2	h_std_bati	Écart type des hauteurs des bâtiments intersectant une maille	IGN BD Topo	Bâtiment
3	surf_m_bat	Surface au sol moyenne des bâtiments intersectant une maille	IGN BD Topo	Bâtiment
4	surf_std_bat	Écart type de la surface au sol des bâtiments intersectant une maille	IGN BD Topo	Bâtiment
5	surf_env_m	Surface d'enveloppe moyenne des bâtiments intersectant une maille Calcul de la surface d'enveloppe : $Surf_{env} = 2 * surface\ au\ sol + P\acute{e}rim\grave{e}tre * Hauteur$	IGN BD Topo	Bâtiment
6	surf_env_s	Écart type de la surface d'enveloppe des bâtiments intersectant une maille	IGN BD Topo	Bâtiment
7	comp_m_bat	Compacité moyenne des bâtiments intersectant une maille Calcul de la compacité : $Comp_{bat} = \frac{Surf_{env}}{Volume}$	IGN BD Topo	Bâtiment
8	Comp_std_b	Écart type de la compacité des bâtiments intersectant une maille	IGN BD Topo	Bâtiment
9	nb_bati	Nombre de bâtiments intersectant une maille	IGN BD Topo	Bâtiment
10	fsi	Surface de plancher contenue dans la maille rapportée à la surface totale de la maille (densité nette de bâti). Calcul de la surface de plancher : $Surf_{plancher} = \frac{hauteur}{2,71} * surface\ au\ sol$	IGN BD Topo	Maille
11	gsi	Surface au sol des bâtiments contenue dans la maille rapportée à la surface totale de la maille (coefficient d'emprise au sol)	IGN BD Topo	Maille
12	Dens_activ	Surface au sol des bâtiments d'activités (industriels, agricoles et commerciaux) dans la maille rapportée à la surface totale de la maille	IGN BD Topo	Maille
13	dens_vege	Surface végétalisée contenue dans la maille rapportée à la surface totale de la maille	IGN BD Topo	Maille
14	surf_m_par	Surface moyenne des parcelles intersectant la maille	IGN BD Parcellaire	Parcelle
15	surf_std_p	Écart type de la surface des parcelles intersectant la maille	IGN BD Parcellaire	Parcelle
16	nb_par	Nombre de parcelles intersectant la maille	IGN BD Parcellaire	Parcelle

Tableau 5-2 : Les indicateurs morphologiques retenus.

5.1.2 Identification des tissus urbains

5.1.2.1 Calcul des indicateurs morphologiques

Afin de calculer les différents indicateurs, des routines d'automatisation ont été mises en place en SQL avec PostgreSQL/PostGIS. L'ensemble des bâtiments de la BD Topo ont été utilisés pour le calcul des indicateurs : les bâtiments remarquables (sportifs, religieux, etc.), les bâtiments industriels, agricoles ou commerciaux et enfin les bâtiments indifférenciés sans fonction particulière (habitation, ...). La couche bâtiments indifférenciés pose cependant un problème de précision car elle contient des bâtiments mais également des emprises artificialisées comme les cours intérieures et les parkings. La présence de ces grandes surfaces artificialisées peut ainsi biaiser certains indicateurs. L'intersection de la grille régulière et des polygones de bâtiments (ou de parcelles) amène à deux configurations : soit un bâtiment est entièrement compris dans une maille, soit il chevauche plusieurs mailles. Dans ce dernier cas, deux solutions sont utilisées pour le calcul des indicateurs et leur agrégation à la maille. Pour les indicateurs calculés à l'échelle du bâtiment ou de la parcelle, toutes les entités intersectant la maille sont prises en compte lors de l'agrégation à l'échelle de la maille. Les entités ne sont pas « *découpées* » : elles conservent leur forme et surface initiale. Un même bâtiment peut ainsi être pris en compte dans deux mailles différentes (Figure 5-2– cas 1). Pour les indicateurs directement calculés à l'échelle de la maille, les entités sont au contraire « *découpées* ». Seules les surfaces réellement contenues dans la maille sont ainsi prises en compte (Figure 5-2 – cas 2).

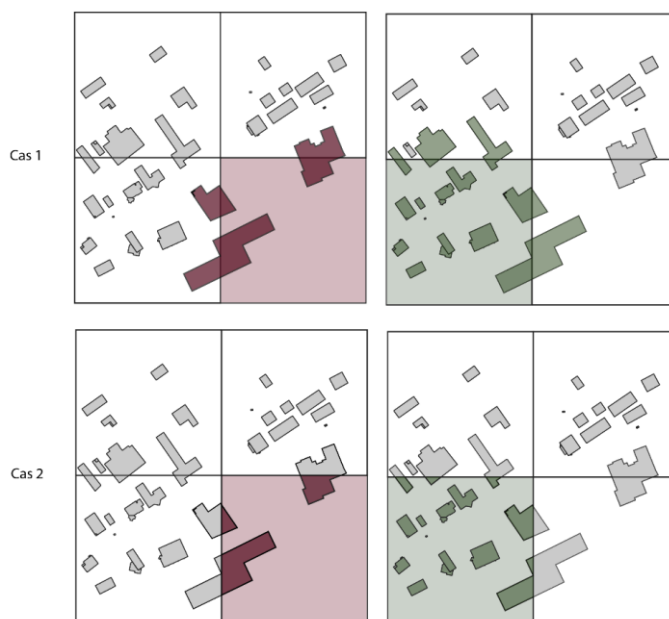


Figure 5-2 : Gestion du chevauchement des entités sur plusieurs mailles.

5.1.2.2 Le choix d'une méthode et d'un outil statistique

Identification préalable des tissus d'activités

L'indicateur de densité surfacique des bâtiments d'activités nous permet d'identifier directement les cellules de type « *activités* ». Ainsi les mailles présentant une densité surfacique de plus de 50% (plus de la majorité)

sont considérées comme correspondantes au tissu urbain de type « *activités* ». Nous considérons également que les mailles présentant un coefficient d’emprise au sol inférieur à 0,01 sont non bâties. Par la suite, ces mailles ont été écartées de l’analyse et l’indicateur de densité surfacique de bâtiments d’activités retiré pour l’analyse factorielle. La classification portera donc sur 35 487 mailles et cherchera à identifier uniquement les cinq types de tissus urbains restants.

Synthétisation des indicateurs par une analyse factorielle

Certains des 15 indicateurs calculés sont corrélés entre eux. La figure suivante présente les coefficients de corrélations linéaires entre ces différents paramètres pour l’ensemble des mailles de nos grilles couvrant les neuf territoires d’études (Figure 5-3).

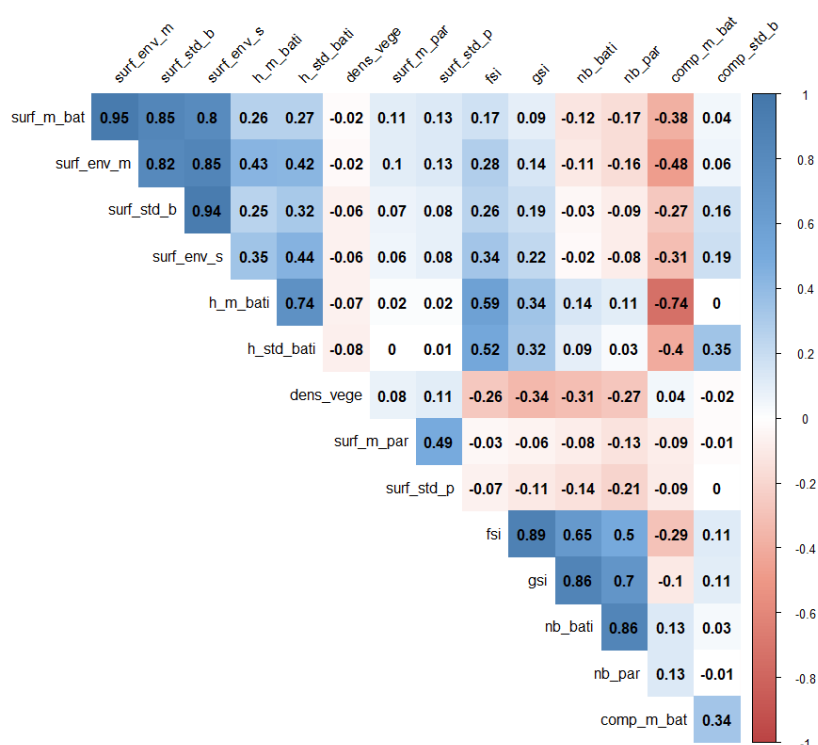


Figure 5-3 : Coefficients de corrélation linéaire entre les indicateurs morphologiques sélectionnés (variables décrites dans le Tableau 5-2).

Ces fortes corrélations résultent du fait que certaines variables sont issues d’un calcul basé sur d’autres variables engendrant ainsi une colinéarité voire une corrélation entre elles. C’est le cas de la compacité, calculée à partir de la hauteur moyenne des bâtiments et fortement corrélée avec celle-ci ($r=0.74$). Avant de réaliser une classification, ces différents indicateurs vont donc être synthétisés par une analyse factorielle. Les indicateurs étant des variables quantitatives, une analyse en composantes principales (ACP) est réalisée. Une ACP est une technique d’analyse des données qui permet de construire m composantes principales ou facteurs à partir d’un ensemble de p variables quantitatives ($m < p$). Ces facteurs sont des combinaisons linéaires des variables analysées, dont ils résument la variabilité en mettant en évidence les principaux axes de covariation. En effet, ils présentent les caractéristiques suivantes :

- Les facteurs sont des vecteurs orthogonaux indépendants, c'est-à-dire des variables non corrélées entre elles ;
- Ils sont ordonnés selon la part de variabilité qu'ils restituent, la première composante principale étant celle qui en restitue la plus grande part.

Nous allons ainsi passer d'un grand nombre de variables corrélées les unes aux autres à un nombre plus faible de facteurs non corrélés. Nous pourrions ensuite distinguer les individus, c'est-à-dire les mailles, selon leurs coordonnées sur les composantes principales et réaliser plus facilement une classification (ou typologie) plus facilement. Le lien entre chaque variable initiale et les facteurs nous permettra en outre de relier chaque typologie aux plages de valeurs des variables initiales qui les caractérisent.

Le choix d'une méthode de classification

La classification des mailles nécessite le choix d'une méthode de classification automatique. La classification est une opération statistique qui consiste à regrouper des objets (individus ou variables) en un nombre limité de groupes, les classes (ou segments, ou clusters). Ces objets sont caractérisés par un certain nombre de variables, qui peuvent être quantitatives ou qualitatives. On distingue généralement deux grandes familles de méthodes de classification qui sont les méthodes de partitionnement et les méthodes hiérarchiques. Les méthodes de partitionnement conduisent à la décomposition de l'ensemble des individus en un nombre de classes généralement prédéterminé, toujours disjointes. Les méthodes hiérarchiques consistent à fournir des suites de partitions en classes de plus en plus nombreuses, obtenues par regroupements successifs. Les méthodes de partitionnement présentent deux avantages : leur complexité est linéaire ce qui les rend applicables à un grand nombre d'individus et les algorithmes de réaffectation améliorent en continu la qualité des classes. Cependant, la partition finale dépend beaucoup du choix initial des centres. Les méthodes hiérarchiques au contraire ne dépendent pas du choix des centres initiaux. Elles détectent également des classes de formes diverses. Le principal inconvénient de ces méthodes est la complexité de l'algorithme, qui n'est pas linéaire. Autre inconvénient, le critère de partitionnement n'est pas global mais dépend des classes déjà obtenues. Ainsi deux individus placés dans des classes différentes dès le début ne seront plus jamais comparés. Le tableau suivant récapitule les points essentiels de ces grandes familles de méthodes (Tableau 5-3).

Méthodes	Choix du nombre de classes	Traitement exhaustif des bases de données	Traitement des données hétérogènes ou lacunaires
Partitionnement	Oui	Oui	Non
Hiérarchique	Non	Non (complexité non linéaire)	Oui

Tableau 5-3 : Avantages et inconvénients des principales méthodes de classification (adapté de Tufféry, 2017).

Dans notre cas, nous avons un nombre important d'individus et les méthodes de partitionnement

apparaissent ainsi plus pertinentes. Parmi ces méthodes, les plus connues sont la méthode des centres mobiles et ses variantes. La méthode des centres mobiles a le déroulement suivant (Figure 5-4) :

- Avant de commencer, les différentes variables sont centrées et réduites : cela permet de s'affranchir de leur unité et d'éliminer les individus hors normes ;
- À l'étape 1, on choisit k individus comme centres initiaux des classes (sélection généralement aléatoire) ;
- À l'étape 2, on calcule les distances entre chaque individu et chaque centre : on affecte chaque individu au centre le plus proche, ce qui définit k classes ;
- À l'étape 3, on remplace les k centres par les barycentres des k classes définies ;
- On répète les étapes 2 et 3 jusqu'à ce que les centres soient stables ou jusqu'à atteindre un nombre fixé d'itérations.

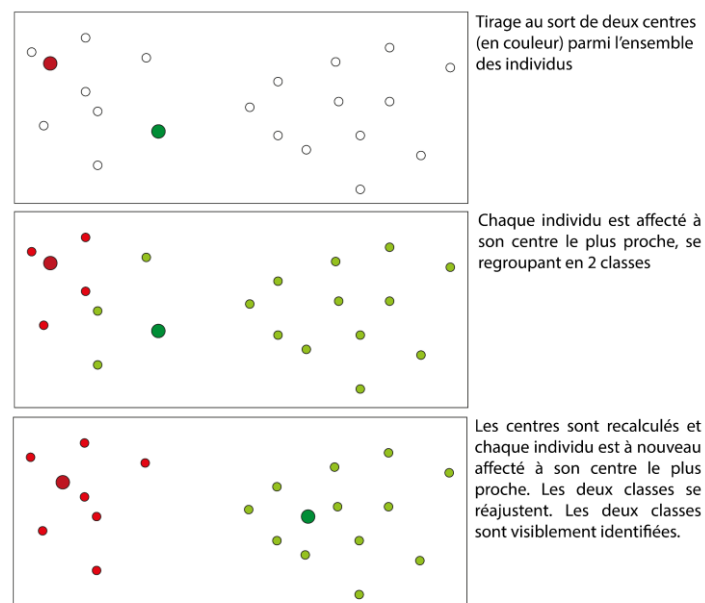


Figure 5-4 : La méthode des centres mobiles (d'après Tufféry, 2017).

La méthode des nuées dynamiques est une variante des centres-mobiles. Chaque classe n'est plus représentée par son barycentre mais par un sous-ensemble de la classe, appelé noyau. Dans une autre variante, celle des k -means, le barycentre de chaque classe est recalculé à chaque nouvel individu introduit dans une classe, plutôt que d'attendre l'affectation de tous les individus avant de recalculer les barycentres. L'algorithme est ainsi plus rapide, mais le résultat est dépendant de l'ordre des individus. C'est cette dernière variante, des k -means, qui est ici sélectionnée.

Nous posons l'hypothèse forte que les tissus urbains sont similaires dans toutes les villes étudiées, c'est-à-dire qu'ils ont les mêmes caractéristiques morphologiques. Ce choix est fait au regard de la littérature sur les tissus urbains présentée dans la partie 4.2.1. Quelle que soit la ville étudiée par les auteurs, la même classification en tissus urbains est obtenue. La méthode de classification sera ainsi appliquée directement à l'ensemble des villes (et non sur une ville après l'autre).

5.1.2.3 Application de la méthode statistique de classification

Réalisation de l'ACP

Le diagramme en barre des valeurs propres de l'ACP est présenté ci-après (Figure 5-5). Nous constatons que la première dimension explique 31,8 % de l'information disponible.

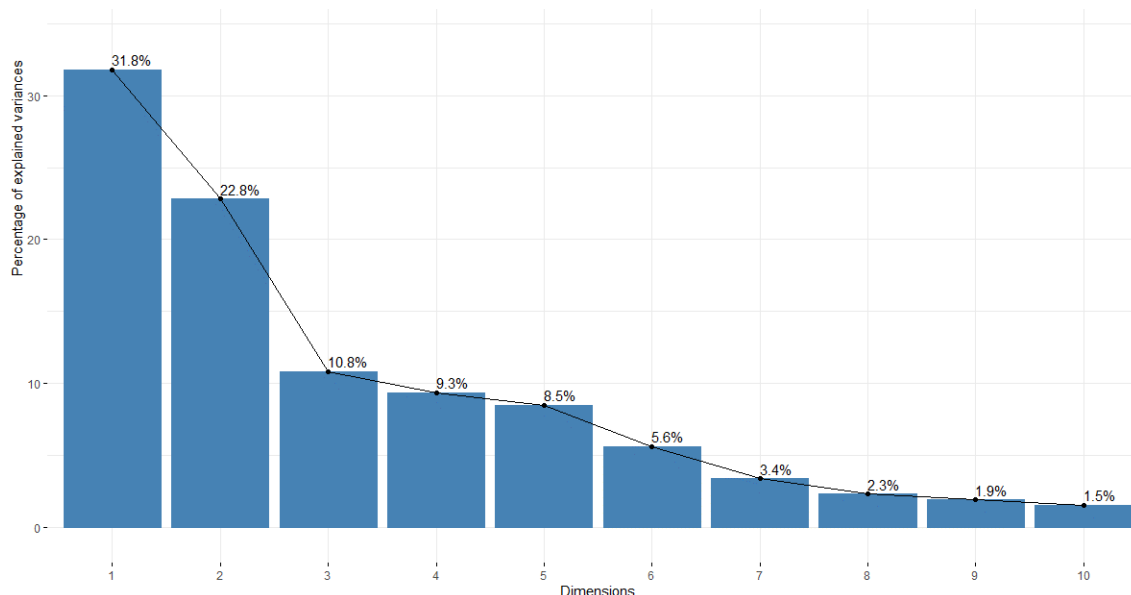


Figure 5-5 : Éboulis des valeurs propres.

Nous souhaitons résumer au mieux l'information, c'est-à-dire trouver un nombre minimum d'axes qui apportent le maximum d'information. En examinant le graphique des valeurs propres, nous pouvons voir un coude après l'axe 2, c'est-à-dire une diminution brutale du pourcentage de variance expliquée. Nous faisons ainsi le choix de conserver uniquement les deux premiers axes, qui expliquent à eux deux près de la moitié de l'information totale. Le tableau ci-dessous indique la qualité de représentation (Cos2) et leur contribution en pourcentages aux axes (Tableau 5-4). Associé au cercle des corrélations (Figure 5-6), nous pouvons voir les éléments suivants :

- L'axe 1 oppose les mailles composées de bâtiments avec une surface d'enveloppe et une surface au sol forte et avec une compacité faible à celles composées de bâtiments pour lesquels ces surfaces sont plus faibles et la compacité plus forte. Cet axe est ainsi dirigé principalement par les indicateurs calculés à l'échelle des bâtiments, propres à l'architecture bâtie. Nous pouvons donc parler d'axe de « *composition* » des tissus urbains.
- L'axe 2 oppose les mailles ayant un nombre de bâtiments et de parcelles élevé et une densité bâtie (fsi et gsi) élevée à celles pour lesquelles ces valeurs sont plus faibles. Cet axe est principalement dirigé par des variables calculées à l'échelle de la maille, de « *configuration* » des tissus urbains.
- La densité de végétation et les surfaces de parcelles n'apparaissent pas comme des critères qui opposent les mailles.

Variables	Dimension 1		Dimension 2	
	Cos2*	Contributions (%)	Cos2*	Contributions (%)
h_m_bati	0,48	10,10	0,01	0,33
h_std_bati	0,45	9,53	0,00	0,13
surf_m_bat	0,57	11,99	0,21	6,14
surf_std_b	0,62	12,92	0,12	3,57
nb_bati	0,06	1,35	0,78	22,75
surf_env_m	0,71	14,91	0,18	5,13
surf_env_s	0,70	14,75	0,10	2,90
comp_m_bat	0,32	6,63	0,04	1,12
comp_std_b	0,02	0,46	0,00	0,06
fsi	0,46	9,71	0,37	10,76
gsi	0,29	6,16	0,60	17,42
dens_vege	0,04	0,79	0,15	4,28
surf_m_par	0,00	0,10	0,06	1,70
surf_std_p	0,00	0,10	0,10	2,92
nb_par	0,02	0,51	0,71	20,80

* *Un cos2 élevé indique une bonne représentation de la variable sur les axes principaux en considération.*

Tableau 5-4 : Coordonnées des variables, qualité de représentation et contribution aux axes factoriels (variables décrites dans le Tableau 5-2).

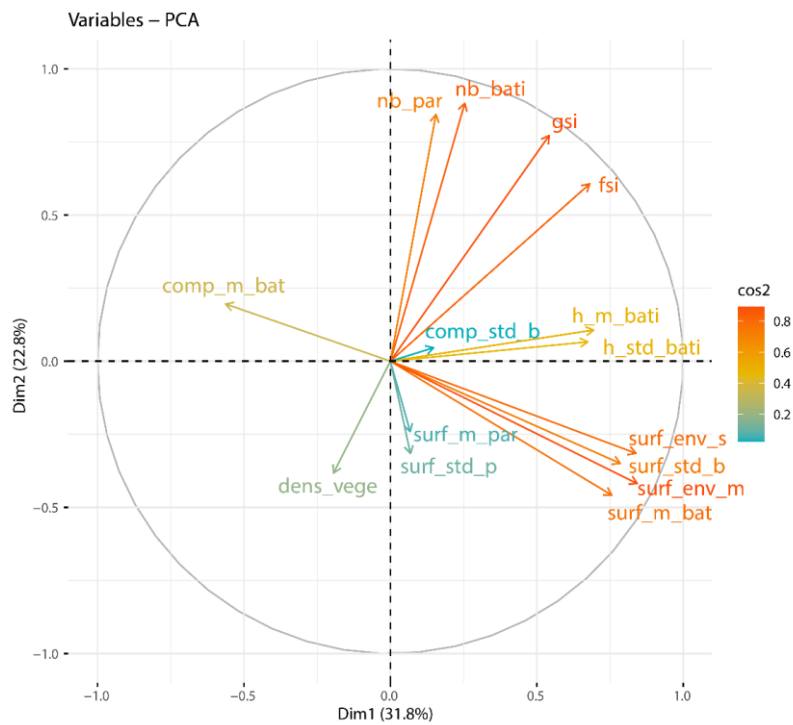


Figure 5-6 : Cercle des corrélations de l'ACP (dimension 1 et 2) (variables décrites dans le Tableau 5-2).

Réalisation de la classification automatique k-means

Nous souhaitons réaliser une classification en cinq classes correspondant aux cinq types de tissus urbains sélectionnés. Cependant, fixer un nombre de classes a priori, de façon arbitraire, peut nuire à la qualité de la classification lorsque ce nombre ne correspond pas à la répartition véritable des individus. Pour pallier à cet inconvénient principal, la méthode des k-means a été appliquée avec un nombre de classes variables entre quatre et huit. Une cartographie des mailles classifiées associée à une connaissance fine de certains des territoires étudiés nous permet de sélectionner le nombre optimal de classes, de sept classes (Figure 5-7).

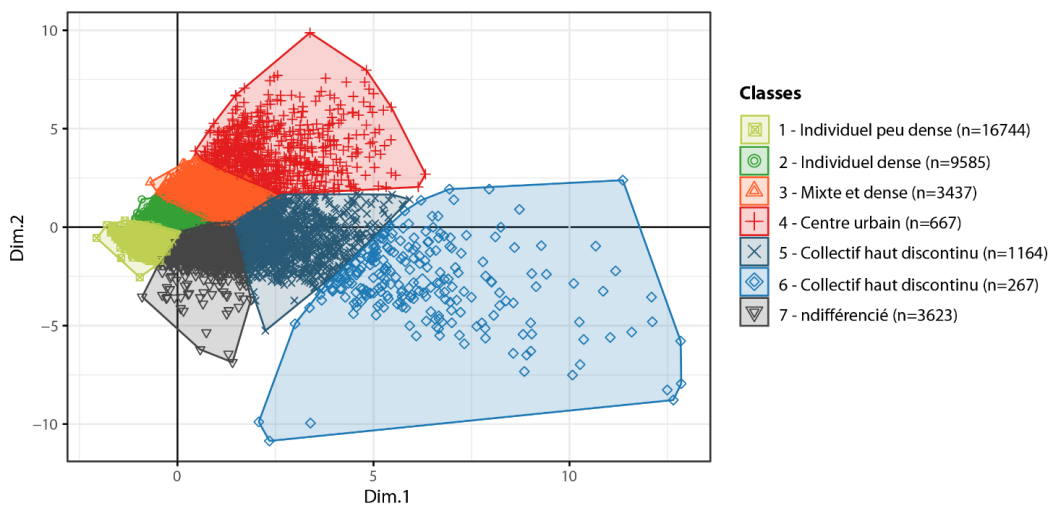


Figure 5-7 : Projection des 7 classes sur le nuage de points des individus.

La lecture des coordonnées des centres de classe ainsi qu'une cartographie de la classification nous permet d'identifier les types de tissus urbains représentés par chaque classe :

- La classe 1 correspond au tissu individuel peu dense ;
- La classe 2 correspond au tissu individuel dense ;
- La classe 3 correspond au tissu mixte et dense ;
- La classe 4 correspond au tissu centre urbain ;
- Les classes 5 et 6 correspondent au tissu collectif haut discontinu. Elles sont agrégées pour former une classe unique ;
- La classe 7 est une classe indifférenciée : située au milieu du nuage, elle ne correspond à aucun tissu en particulier. Ces mailles ne seront pas étudiées par la suite, n'étant pas assez « *typiques* ».

Nous pouvons voir que l'axe 1, de composition, oppose principalement le tissu collectif haut discontinu aux autres tissus. Ce tissu est en effet marqué par des valeurs fortes sur cet axe, certaines mailles de la classe 6 apparaissant comme des « *outliers* ». Une analyse spatiale fine de ces mailles montre cependant qu'elles correspondent bien à du tissu collectif haut discontinu, et nous décidons de les conserver. La forte différenciation de ce tissu par rapport aux autres s'explique notamment par son histoire. Il s'est en effet construit en rupture complète avec la ville existante, avec de nouveaux standards de construction et une nouvelle vision de l'urbanisme (voir partie 1.1.2.1). Une caractérisation fine des différentes classes obtenues est effectuée dans la partie suivante.

5.1.2.4 Analyse des classes obtenues

ANOVA

Nous souhaitons vérifier dans un premier temps que les classes obtenues reflètent bien des différences entre les tissus urbains et non des différences entre les villes étudiées. Ces neuf villes présentent en effet des caractéristiques différentes et des spécificités qui peuvent impacter le résultat de notre classification. Il est donc nécessaire de réaliser une analyse de la variance (ou ANOVA) à deux facteurs pour permettre une vérification de l'effet du tissu urbain sur la dispersion des données. L'ANOVA est une méthode statistique employée pour comparer plus de deux moyennes. L'idée derrière cette méthode est de dire que la dispersion des données a plusieurs origines : la part imputable au premier facteur (ici, le type de tissu urbain), la part imputable au second facteur (les villes étudiées) et la part non expliquée, ou résiduelle. À partir de cette distinction, il est possible d'évaluer, à l'aide d'un test statistique, l'effet de chaque facteur sur la dispersion des données. Ce test est un test F, qui correspond au rapport entre la variabilité inter-classe et la variabilité intra-classe d'un facteur. Plus ce rapport est élevé, plus le facteur a un effet important sur la dispersion des données. Nous réalisons ainsi plusieurs ANOVA :

- Entre les deux facteurs et les indicateurs morphologiques les plus discriminants ;
- Entre les deux facteurs et les dimensions 1 et 2 de l'ACP.

Au regard de la spécificité du tissu urbain collectif haut par rapport aux autres tissus, nous faisons le choix

de créer deux jeux de données, un jeu contenant les mailles de tissu collectif haut et un sans ces mailles. Cela permet de vérifier que la variabilité entre tissus urbains n'est pas due uniquement à une opposition entre le collectif haut et l'ensemble des autres tissus. Les valeurs F des différentes Anova sont présentées dans le tableau suivant (Tableau 5-5). Pour tous les indicateurs morphologiques (excepté la surface moyenne des bâtiments par maille) et pour les dimensions 1 et 2 de l'ACP, les valeurs F du facteur « *tissus urbains* » sont très largement supérieures aux valeurs F du facteur « *villes* ». Ce constat est vrai, quel que soit le jeu de données utilisé, avec ou sans les mailles de tissu urbain collectif haut. Concernant l'indicateur de surface moyenne des bâtiments, la valeur F calculée à partir du jeu de données ne contenant pas le tissu collectif haut est plus élevée pour le facteur « *villes* ». Cela signifie que cet indicateur varie plus fortement entre les différentes villes qu'entre les différents tissus urbains. Cet indicateur reste cependant une exception. Nous pouvons ainsi tirer les conclusions suivantes :

- Si une part de la variabilité est expliquée par le facteur « *villes* », cette part reste minoritaire. Les classes obtenues dans la partie précédente reflètent donc majoritairement des différences entre les tissus urbains.
- Notre hypothèse de similitude des tissus urbains, quelle que soit la ville étudiée, est donc vérifiée.

Indicateurs morphologiques	Facteur	Valeur F	
		Jeu de données 1 : avec le tissu collectif haut	Jeu de données 2 : sans le tissu collectif haut
surf_m_bat	Villes	60.831	292.31
	Tissus	6341.359	232.92
surf_std_b	Villes	59.802	124.12
	Tissus	6467.328	1769.00
surf_env_m	Villes	124.3	195.14
	Tissus	9727.3	1841.02
surf_env_s	Villes	110.16	125.68
	Tissus	9402.49	3009.20
h_m_bati	Villes	1229.1	1600.5
	Tissus	7257.8	6669.8
fsi	Villes	349.06	415.68
	Tissus	19985.42	36062.81
gsi	Villes	1269.3	1707.6
	Tissus	33134.4	56065.5
Nb_bati	Villes	1289.7	1324.6
	Tissus	24200.3	31807.2
Nb_par	Villes	937.38	945.05
	Tissus	13022.11	16752.32
Dim.1	Villes	593.71	524.51
	Tissus	25535.20	27000.81
Dim.2	Villes	839.68	1458
	Tissus	21947.93	45595

Tableau 5-5 : Résultats de l'ANOVA (variables décrites dans le Tableau 5-2).

Analyse détaillée des variables de composition des tissus urbains (axe 1)

Le centre urbain se caractérise par de fortes hauteurs de bâtiments : elles sont d'ailleurs similaires à celles des bâtiments du collectif haut discontinu. Elles sont comprises majoritairement entre 8 et 12 mètres, avec une moyenne à 10 mètres. Les bâtiments du centre ancien présentent des surfaces au sol et d'enveloppe modérées, avec des moyennes de respectivement 179 m² et 1000 m². Le tissu urbain mixte et dense présente des hauteurs de bâtiments comprises principalement entre 6 et 8 mètres. Ces bâtiments ont une surface au sol et une surface d'enveloppe faible, avec des moyennes de 160 m² et 722 m². Ils présentent également une compacité élevée, similaire à celle des bâtiments des tissus individuels dense et peu dense. Le tissu urbain collectif haut discontinu présente la hauteur de bâtiment moyenne la plus importante (11 mètres). Ils se démarquent également par les surfaces au sol et les surfaces d'enveloppe moyennes des bâtiments : ce sont les plus

importantes des tissus résidentiels, comparables à celles affichées par les bâtiments du tissu d'activités. Ils présentent ainsi la compacité la plus faible (0,6 en moyenne par maille). Les tissus individuels, dense et peu dense sont très proches au niveau des indicateurs de morphologie des bâtiments : les bâtiments ont les hauteurs moyennes, les surfaces au sol et les surfaces d'enveloppes les plus basses. Ils présentent de ce fait la compacité la plus élevée (0,8 en moyenne). L'ensemble des indicateurs de composition des tissus urbains sont présentés et comparés par type de tissus dans les figures suivantes (Figure 5-8 à Figure 5-11). Le tableau complet de données est également disponible en Annexe 3.

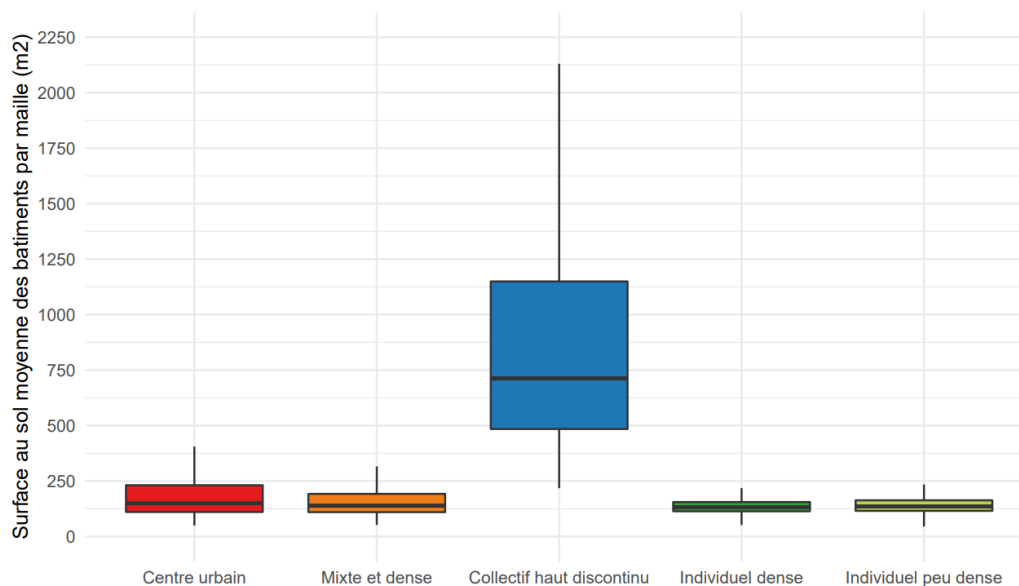


Figure 5-8 : Surface au sol moyenne des bâtiments par maille en fonction du tissu urbain.

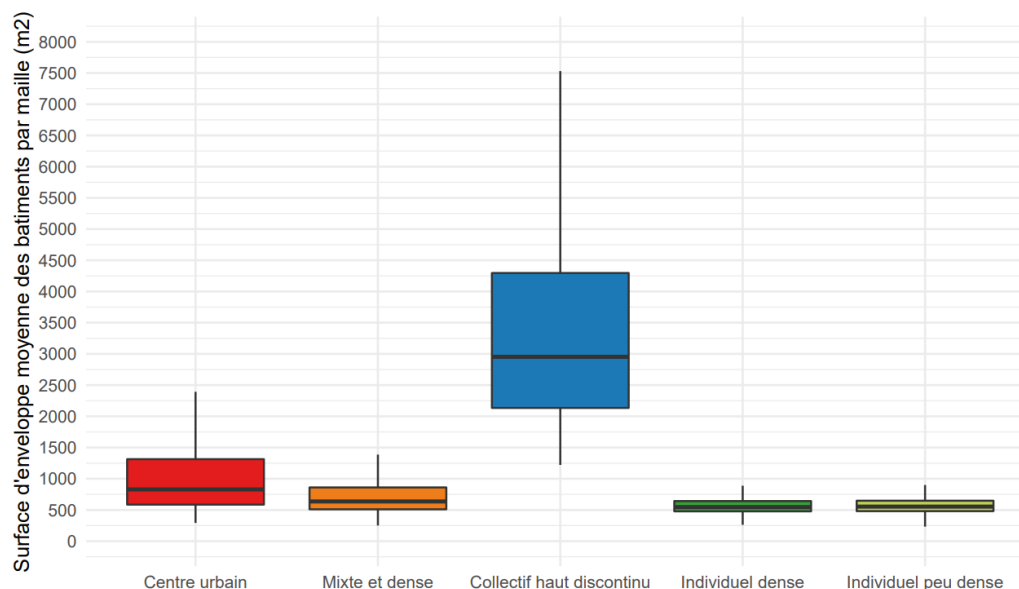


Figure 5-9 : Surface d'enveloppe moyenne des bâtiments par maille en fonction du tissu urbain.

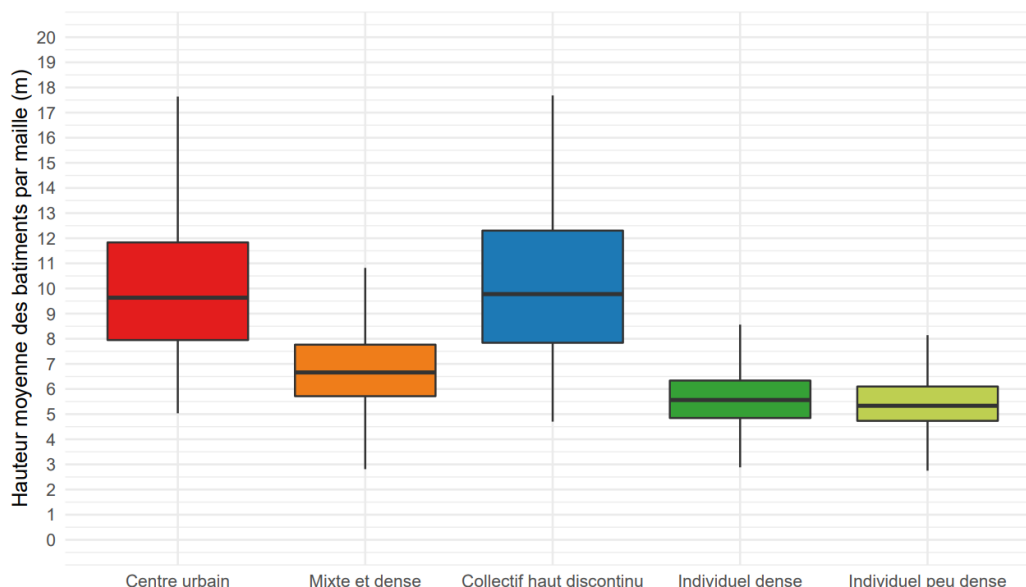


Figure 5-10 : Hauteur moyenne des bâtiments par maille en fonction du tissu urbain.

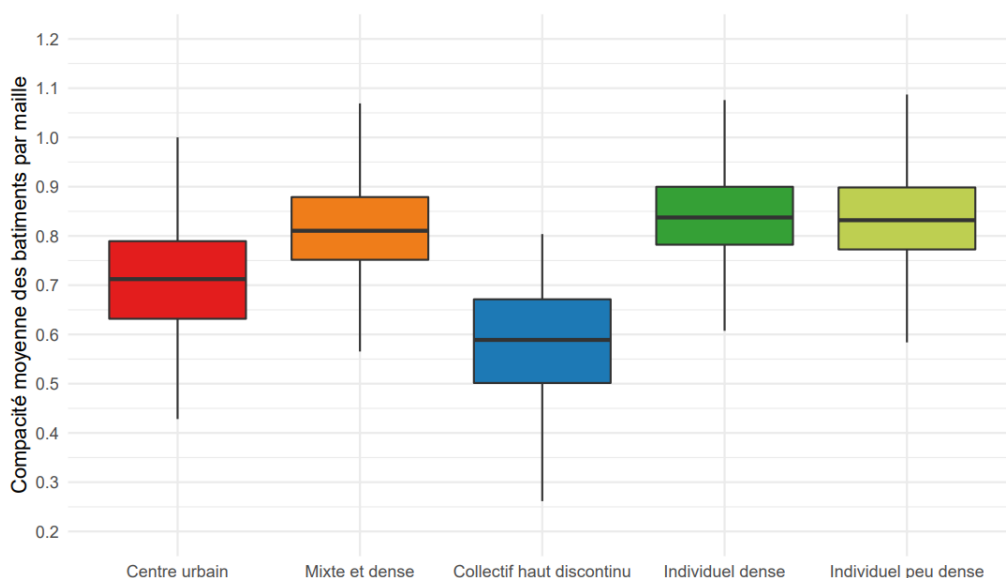


Figure 5-11 : Compacité moyenne des bâtiments par maille en fonction du tissu urbain.

Analyse détaillée des variables de configuration des tissus urbains (axe 2)

Le centre urbain se caractérise par le plus grand nombre de bâtiment et de parcelles par maille. Il compte en effet 200 bâtiments en moyenne et 214 parcelles. Le centre urbain présente ainsi la densité de bâti la plus élevée avec un coefficient d’emprise au sol de 40 % (gsi) et une densité bâtie (fsi) de 1,7. Le tissu urbain mixte et dense présente un nombre de bâtiments et de parcelles légèrement plus faible. Il compte en moyenne 97 bâtiments par maille et 128 parcelles. Il présente un coefficient d’emprise au sol élevé d’environ 20 % et une densité nette de bâtiment de 0,5. Cette faible densité nette s’explique par la faible hauteur des bâtiments composant ce tissu urbain. Le tissu urbain collectif haut discontinu à l’inverse présente un coefficient d’emprise au sol plus faible de 15 % mais une densité nette élevée de 0,7. Cela s’explique par le très faible

nombre de bâtiments (23 bâtiments par maille en moyenne) et par leur très forte hauteur. Enfin les tissus individuels, dense et peu dense, sont marqués par les plus faibles densités de bâtiments : ils présentent un coefficient d’emprise de respectivement 10 et 3 % et une densité nette de 0,2 et 0,1. Ces valeurs s’expliquent par le faible nombre de bâtiments associés à des hauteurs moyennes basses. Les différents indicateurs de configuration des tissus urbains sont détaillés et comparés par type de tissus dans les figures suivantes (Figure 5-12 à Figure 5-15). Le tableau complet de données nécessaire à la construction de ces graphiques est disponible en Annexe 4.

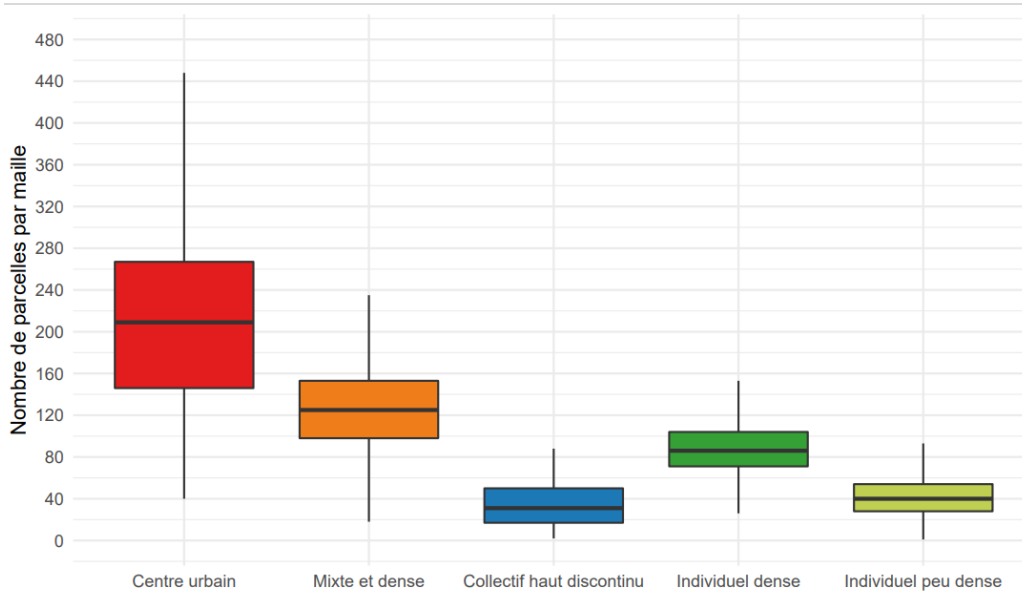


Figure 5-12 : Nombre de parcelles par maille en fonction du tissu urbain.

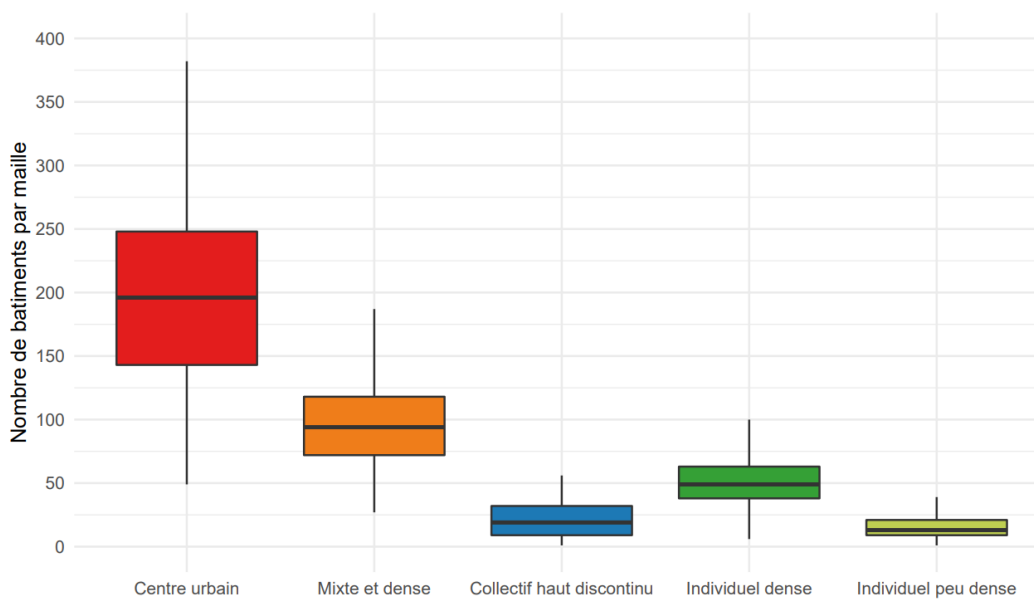


Figure 5-13 : Nombre de bâtiments par maille en fonction du tissu urbain.

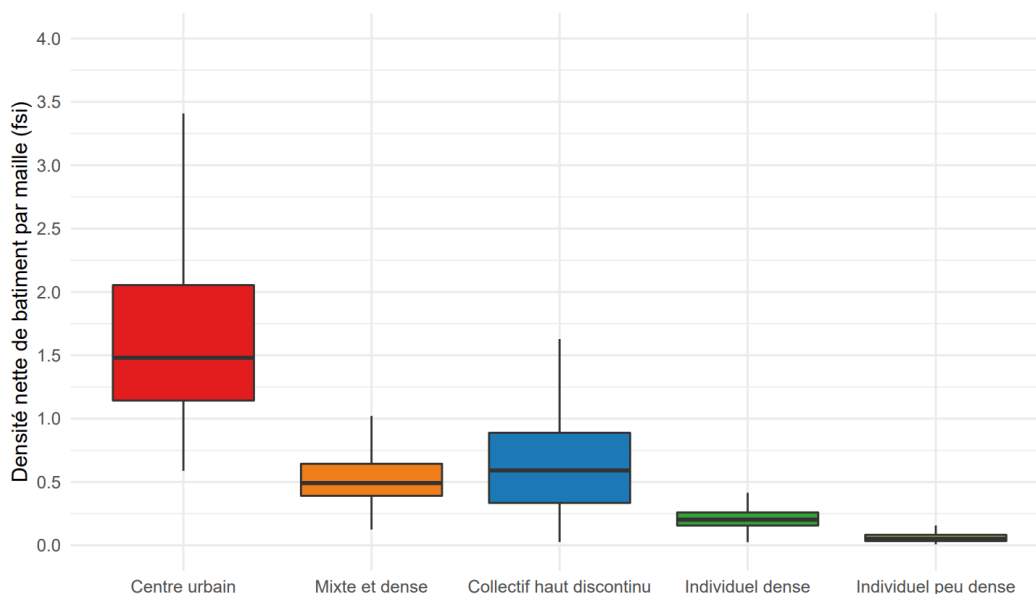


Figure 5-14 : Densité nette de bâtiment par maille (fsi) en fonction du tissu urbain.

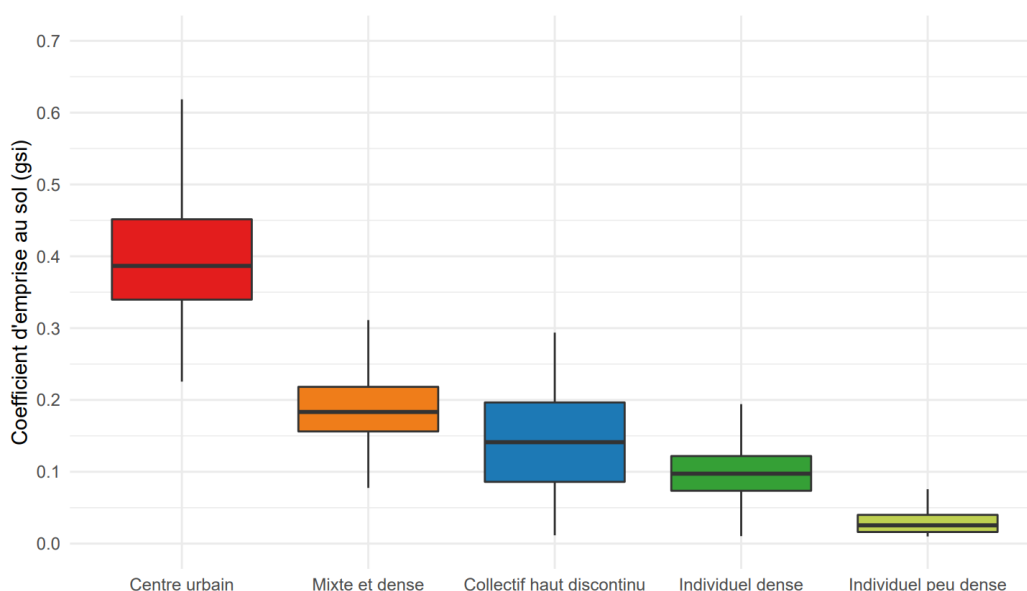


Figure 5-15 : Coefficient d'emprise au sol (gsi) en fonction du tissu urbain.

5.1.3 Évaluation de la classification

Une comparaison avec d'autres données est nécessaire afin d'évaluer la classification obtenue. Dans cet objectif nous allons utiliser deux bases de données :

- Pour l'ensemble des villes, les données de l'Urban Atlas. Cet atlas proposé par l'Agence européenne pour l'environnement (AEE) offre une cartographie haute résolution des espaces urbains de plus de 50 000 habitants (zones urbaines de l'UE participant au programme d'audit urbain). La base de données est en format vectoriel et a été développée à partir d'images satellites. L'unité cartographique minimale est de 0,25 ha (50x50 mètres). La base de données est disponible pour les années

suivantes : 2006, 2012 et 2018 (<https://land.copernicus.eu/local/urban-atlas>).

- Pour la ville de Besançon, nous disposons de données d'occupation du sol plus précises produites par le laboratoire ThÉMA. Il s'agit du MOS (Modèle d'Occupation des Sols) mis à jour en 2010 avec une résolution de 5x5 mètres. Le MOS a été construit avec la BD-Topo mais également à partir d'images satellites.

L'objectif ici n'est pas d'établir n'est pas d'évaluer la « *performance* » des différentes bases de données, chacune ayant ses limites et ses atouts, mais d'observer les similitudes (et les divergences) existantes entre les différentes typologies.

5.1.3.1 Comparaison avec les données de l'Urban Atlas

Nous utilisons ici la base de données produite en 2018 pour réaliser notre comparaison. Le système de classification l'Urban Atlas identifie cinq classes principales : les surfaces artificielles, les surfaces agricoles, les forêts, les zones humides et les surfaces en eau. Les surfaces artificielles sont subdivisées en 17 sous-classes recouvrant les bâtiments, les infrastructures de transports, l'ensemble des sites construits mais également les espaces verts aménagés pour les activités humaines (non agricoles). Dans notre cas, nous nous intéressons essentiellement aux classes artificialisées suivantes :

- Classe 1.1.1 « *espace urbain continu* », qui présente un taux d'imperméabilité supérieur à 80 % ;
- Classe 1.1.2.1 « *espace urbain discontinu dense* » qui présente un taux d'imperméabilité compris entre 50 et 80 % ;
- Classe 1.1.2.2 « *espace urbain discontinu à densité moyenne* » qui présente un taux d'imperméabilité compris entre 30 et 50 % ;
- Classe 1.1.2.3 « *espace urbain discontinu à densité faible* » qui présente un taux d'imperméabilité compris entre 10 et 30 % ;
- Classe 1.1.2.4 « *espace urbain discontinu à densité très faible* » qui présente un taux d'imperméabilité inférieur à 10 % ;
- Classe 1.2.1 « Espace industriel, commercial, public, militaire ou privé ».

Les autres classes de la nomenclature, éloignées de nos tissus urbains, sont regroupées en deux classes (« *autres espaces artificialisés* » et « *autres espaces non artificialisés* ») afin de faciliter la comparaison (Figure 5-16).

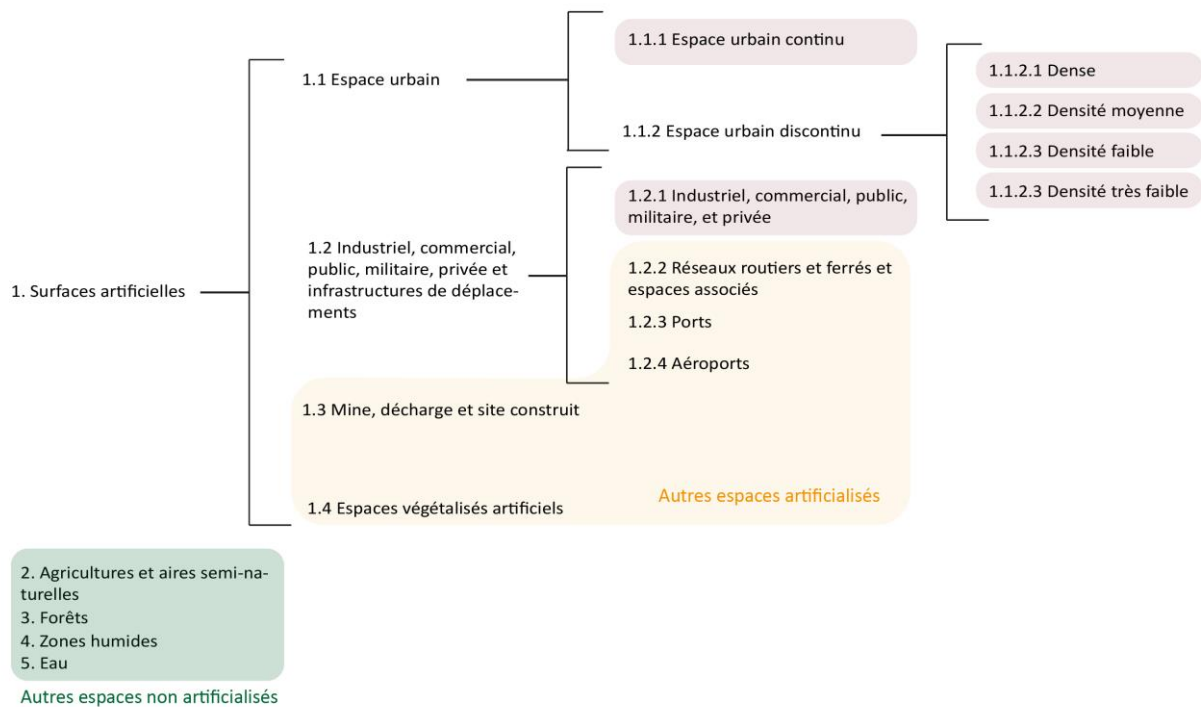


Figure 5-16 : Nomenclature de l'Urban Atlas.

Les résolutions spatiales de l'Urban Atlas (polygones vectoriels) et de nos tissus urbains (maille 250*250 mètres) ne sont pas identiques. Afin d'effectuer le meilleur croisement possible entre les deux jeux de données, nous faisons le choix d'effectuer cette comparaison à l'échelle des bâtiments. Pour l'ensemble des villes étudiées, nous associons chaque bâtiment au tissu urbain de la cellule dans laquelle il se trouve. Lorsqu'un bâtiment est situé sur plusieurs mailles de types différents, il est affecté à la maille qui contient la plus grande surface de ce bâtiment. Nous effectuons ensuite une intersection des bâtiments avec les zones de l'Urban Atlas. Nous calculons ensuite la surface de bâtiment de chaque type de tissu urbain comprise dans les différentes catégories de l'Urban Atlas (Tableau 5-6).

Code Urban Atlas	Centre urbain		Mixte et dense		Collectif haut discontinu		Individuel dense		Individuel peu dense		Activités	
	Surface (km ²)	Part (%)	Surface (km ²)	Part (%)	Surface (km ²)	Part (%)	Surface (km ²)	Part (%)	Surface (km ²)	Part (%)	Surface (km ²)	Part (%)
111	1268	74	1028	25	222	17	240	4	24	1	47	1
1121	191	11	1984	48	266	20	2625	45	575	17	132	3
1122	15	1	409	10	55	4	1557	27	999	30	43	1
1123	5	0	79	2	8	1	489	8	749	22	12	0
1124	0	0	22	1	2	0	153	3	283	8	4	0
121	192	11	481	12	675	51	441	8	258	8	3545	87
Artif.	51	3	145	3	91	7	182	3	254	8	200	5
Non artif.	0	0	11	0	14	1	107	2	195	6	106	3
Total	1723	100	4159	100	1333	100	5795	100	3337	100	4090	100

*En rouge, les valeurs maximales, en orange les secondes valeurs les plus importantes.

Tableau 5-6 : Comparaison de notre classification avec les données de l'Urban Atlas.

Les bâtiments situés dans des mailles de type centre urbain représentent une surface totale de 1723 km². 74 % de cette surface est incluse dans la catégorie « *espace urbain continu* » de l'Urban Atlas, catégorie présentant le plus fort taux d'imperméabilisation. Les bâtiments situés dans des mailles de type mixte et dense représentent une surface totale de 4159 km². 48 % de cette surface appartient à la catégorie « *espace urbain discontinu dense* » et 25 % à la catégorie « *espace urbain continu* ». Les bâtiments situés dans des mailles de type collectif haut discontinu représentent une surface totale de 1333 km². 50 % de cette surface appartient à la catégorie « *Espace industriel, commercial, public, militaire ou privé* » et 20 % à la catégorie « *espace urbain discontinu à forte densité* ». Enfin les bâtiments appartenant au tissu d'activités sont à très large majorité (87 %) dans la catégorie « *Industriel, commercial, public, militaire et privé* ». Globalement, nous constatons grâce à la comparaison avec l'Urban Atlas que les tissus sont bien identifiés, les résultats sont satisfaisants. Le tissu collectif haut discontinu est le plus mal identifié, avec une confusion avec le tissu d'activités, qui peut s'expliquer par la forte similarité entre les formes de bâti et notamment les coefficients d'emprise au sol importants.

5.1.3.2 Comparaison avec le MOS de Besançon

Afin d'enrichir la vérification de notre méthode, nous utilisons le MOS de Besançon pour réaliser une autre comparaison. Élaboré par le laboratoire ThéMA avec une résolution de cinq mètres, ce MOS contient 13 postes d'occupation du sol (Figure 5-17). Concernant le bâti, les postes d'occupations dépendent du type d'activité, de la hauteur des bâtiments et de leur date de construction.

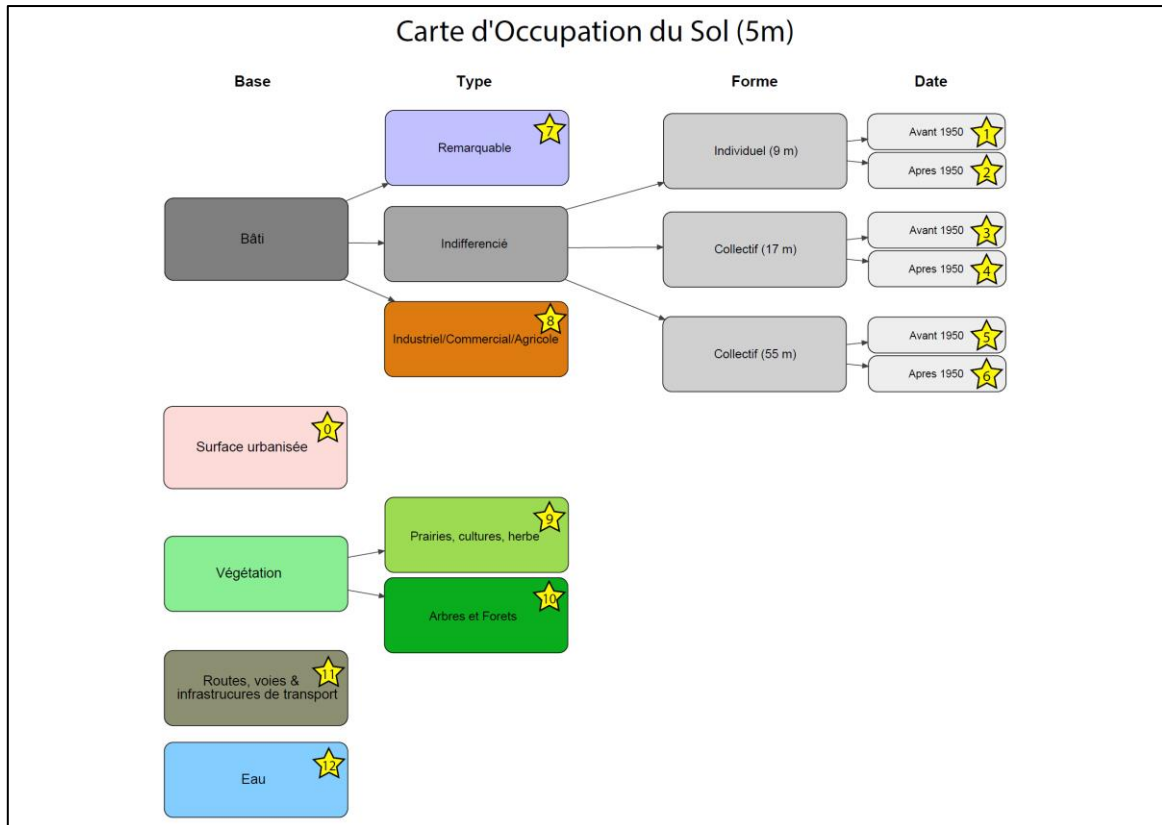


Figure 5-17 : Nomenclature du MOS de Besançon.

La comparaison est ici aussi réalisée à l'échelle des bâtiments. Pour chaque tissu urbain, nous calculons la surface de bâtiment comprise dans les différentes catégories du MOS (Tableau 5-7).

Code MOS	Centre urbain		Mixte et dense		Collectif haut discontinu		Individuel dense		Individuel peu dense		Activités	
	Surface (ha)	Part (%)	Surface (ha)	Part (%)	Surface (ha)	Part (%)	Surface (ha)	Part (%)	Surface (ha)	Part (%)	Surface (ha)	Part (%)
0	11	20	14	8	17	12	28	7	15	6	11	5
1	1	2	36	21	8	6	73	18	36	14	2	1
2	0	0	30	18	16	11	207	51	143	57	12	5
3	9	17	31	18	10	7	26	6	7	3	2	1
4	2	4	22	13	20	15	18	4	7	3	3	1
5	20	38	3	2	4	3	0	0	0	0	0	0
6	6	12	14	8	23	17	1	0	0	0	2	1
7	2	4	4	2	7	5	6	2	2	1	2	1
8	1	3	14	8	19	14	25	6	21	8	190	81
9	0	0	2	1	9	7	23	5	15	6	8	4
10	0	0	1	1	3	2	3	1	4	1	1	0
11	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	53	100	172	100	137	100	411	100	250	100	234	100

*En rouge : les valeurs maximales, en orange les secondes valeurs les plus importantes.

Tableau 5-7 : Comparaison de notre classification avec les données du MOS de Besançon.

Les bâtiments situés dans des mailles de type centre urbain à Besançon représentent une surface totale de 53 km². 38 % de cette surface est incluse dans la catégorie 5 du MOS, qui correspond à du collectif haut (55m) construit avant 1950. Près de 21 % des surfaces de bâtiments du tissu mixte et dense appartiennent à la catégorie 1 et 36 % aux catégories 2 et 3 qui correspondent à du petit collectif et à de l'habitat individuel. Les bâtiments situés dans le tissu collectif haut discontinu représentent une surface totale de 137 km². 17 % de cette surface appartient à la catégorie 6 et 15 % à la catégorie 4, qui sont du grand collectif et du petit collectif construits après 1950. Les bâtiments des tissus individuels denses et peu denses sont à majorité compris dans la catégorie 1 et 2, qui correspond à de l'habitat individuel. Enfin les bâtiments appartenant au tissu d'activités sont à très large majorité (81 %) dans la catégorie 8 qui correspond aux espaces industriels, commerciaux et agricoles. Globalement, la comparaison avec le MOS confirme que les tissus sont bien identifiés, les résultats étant satisfaisants.

5.2 Analyse des villes réelles pour quantifier les modèles urbains conceptuels

Dans la section précédente nous avons identifié les tissus urbains à modéliser dans neuf villes réelles. À partir de cette identification, il est maintenant possible de quantifier les modèles urbains conceptualisés dans la partie précédente. Dans un premier temps, les caractéristiques fonctionnelles des tissus urbains seront analysées, afin de quantifier la mixité d'usage de chaque tissu. Dans un second temps, l'emprise spatiale des structures urbaines et la répartition en tissus urbains seront quantifiées. Enfin dans un dernier temps, l'organisation des principaux réseaux routiers sera mise en évidence.

5.2.1 Les caractéristiques fonctionnelles des tissus urbains

L'objectif de cette sous-partie est d'identifier les caractéristiques fonctionnelles des différents tissus urbains, c'est-à-dire de connaître le nombre et l'organisation des différentes aménités. Par la suite, nous pourrions ainsi créer des règles d'affectation des différents équipements dans les villes archétypales en fonction du type de tissu urbain.

5.2.1.1 Les données utilisées

Les commerces et services

Afin de connaître les caractéristiques d'organisation des commerces et services, nous utilisons la base permanente des équipements (BPE) géolocalisés. Cette base de données est fournie par l'Insee et « *répertoire un large éventail d'équipements et de services, marchands ou non, accessibles au public sur l'ensemble de la France au 1^{er} janvier de chaque année. En 2020, elle porte sur 188 types de services et équipements différents, répartis en sept grands domaines : services aux particuliers, commerces, enseignement, santé-social, transports-déplacements, sports-loisirs-culture et tourisme.* » (Insee, 2021). Plus de 2,7 millions d'équipements sont ainsi répertoriés dans la BPE 2020. Afin de simplifier l'analyse et dans une visée de simulation des mobilités quotidiennes, nous faisons le choix de sélectionner uniquement certains équipements. Ces différents équipements sont ensuite regroupés en dix classes, par fréquence de recours (quotidien, hebdomadaire, mensuel et rare) et par nature de l'activité (achats, loisirs, santé, accompagnement et enseignement) (Tableau 5-8).

Niveau 1 BPE	Niveau 2 ou 3 BPE	Code	Fréquence	Nature de l'activité
A Services aux particuliers	A1 Services publics	4	Rare	Achat
	A2 Services généraux	3	Mensuel	Achat
	A3 Services automobiles	4	Rare	Achat
	A5 Autres services à la population	2	Hebdomadaire	Achat
B Commerces	B101 Hypermarché	3	Mensuel	Achat
	B102 Commerces alimentaires	2	Hebdomadaire	Achat
	B103 Commerces spécialisés non alimentaires	3	Mensuel	Achat
	B2 Commerces alimentaires	1	Quotidien	Achat
	B3 Commerces spécialisés non alimentaires	3	Mensuel	Achat
C Enseignement	C1 Enseignement du premier degré	5	Quotidien	Accompagnement
	C2 Enseignement du second degré premier cycle	5	Quotidien	Accompagnement
	C3 Enseignement du second degré second cycle	5	Quotidien	Accompagnement
	C4 Enseignement supérieur non universitaire	6	Quotidien	Enseignement
	C5 Enseignement supérieur universitaire	6	Quotidien	Enseignement
	C6 Formation continue	6	Quotidien	Enseignement
	C7 Autres services de l'éducation	6	Quotidien	Enseignement
D Santé	D1 Établissements et services de santé	10	Rare	Santé
	D201 Médecin généraliste	9	Mensuel	Santé
	D202 à D243 Spécialistes et autres	10	Rare	Santé
	D301 Pharmacie	3	Mensuel	Achat
	D5 Action sociale pour enfants en bas-âge	5	Quotidien	Accompagnement
F Sports, loisirs et culture	F1 Équipements sportifs	7	Hebdomadaire	Loisirs
	F2 Équipements de loisirs	8	Mensuel	Loisirs
	F303 Cinéma	7	Hebdomadaire	Loisirs
	F304 à 307 Autres	8	Mensuel	Loisirs

Tableau 5-8 : Les équipements de la BPE sélectionnés et leurs types.

Sur les neuf territoires étudiés, nous comptons ainsi 81 714 équipements avec la répartition suivante :

- 4792 équipements de type 1 « *Quotidien Achat* » ;
- 26209 équipements de type 2 « *Hebdomadaire achat* » ;
- 16434 équipements de type 3 « *Mensuel Achat* » ;

- 6355 équipements de type 4 « *Rare Achat* » ;
- 3440 équipements de type 5 « *Quotidien Accompagnement* » ;
- 204 équipements de type 6 « *Quotidien Enseignement* » ;
- 4936 équipements de type 7 « *Hebdomadaire loisirs* » ;
- 412 équipements de type 8 « *Mensuel loisirs* » ;
- 4001 équipements de type 9 « *Mensuel Santé* » ;
- 21286 équipements de type 10 « *Rare Santé* ».

Les emplois

Concernant les emplois, nous utilisons la base Sirene (V3) géolocalisée. Cette base de données est fournie par l'Insee et rassemble des informations sur 30 millions d'établissements, dont 12 millions actifs, appartenant à tous les secteurs d'activité. Parmi ces informations, nous disposons notamment de la « *Tranche d'effectif salarié de l'établissement* ». Afin de disposer d'un nombre d'emplois et non d'une tranche, nous faisons le choix d'utiliser la valeur de la borne inférieure de chaque tranche (Tableau 5-9).

Code Sirene	Tranche d'effectifs	Effectifs utilisés
01	1 à 2 salariés	1
02	3 à 5 salariés	3
03	6 à 9 salariés	6
11	10 à 19 salariés	10
12	20 à 49 salariés	20
21	50 à 99 salariés	50
22	100 à 199 salariés	100
21	200 à 249 salariés	200
32	250 à 499 salariés	250
41	500 à 999 salariés	500
42	1 000 à 1 999 salariés	1000
51	2 000 à 4 999 salariés	2000
52	5 000 à 9 999 salariés	5000
53	10 000 salariés et plus	10000

Tableau 5-9 : Les effectifs d'emplois à partir de la base Sirene.

5.2.1.2 La méthode d'analyse

L'ensemble des équipements et des emplois géolocalisés dans les neuf territoires d'étude sont croisés avec les mailles des différents tissus urbains grâce à un SIG. Pour les neuf types contenant plus de 250 équipements et pour les emplois, trois indicateurs d'organisation spatiale sont calculés. Le premier indicateur est la densité d'équipements par maille de tissu urbain. Il correspond au nombre d'équipements moyen par maille (Figure 5-18).

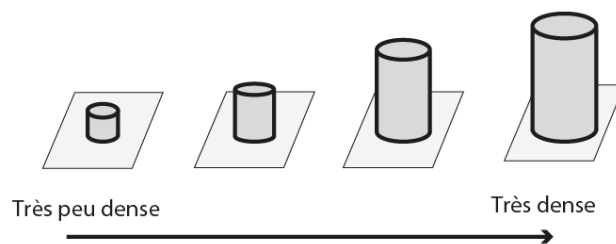


Figure 5-18 : Indicateur de densité des aménités.

Le second indicateur est la distribution des équipements : il correspond à la part des cellules vides (sans équipements) par type de tissu urbain. Une distribution concentrée correspond au regroupement d'une grande partie des commerces et services dans une petite partie de l'espace, au contraire d'une implantation dispersée qui se déploie dans l'ensemble du territoire (Figure 5-19).

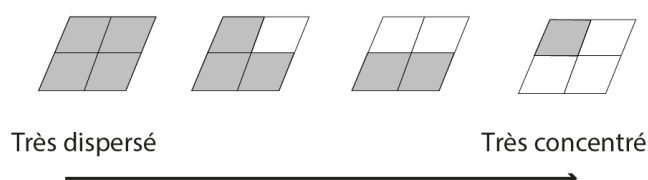


Figure 5-19 : Indicateur de distribution des aménités.

Enfin le dernier indicateur est la hiérarchie de la répartition : dans les cellules occupées (possédant au moins un équipement), les équipements peuvent être répartis de manière homogène ou non. Trois courbes de références sont construites : une courbe de distribution d'une répartition hiérarchisée, une courbe de distribution intermédiaire et une courbe de distribution d'une répartition uniforme. L'indicateur de hiérarchie correspond à l'écart entre les distributions réelles des équipements et celles des trois courbes de références (Figure 5-20). Plus cet écart est faible, plus la distribution réelle correspond à la distribution théorique.

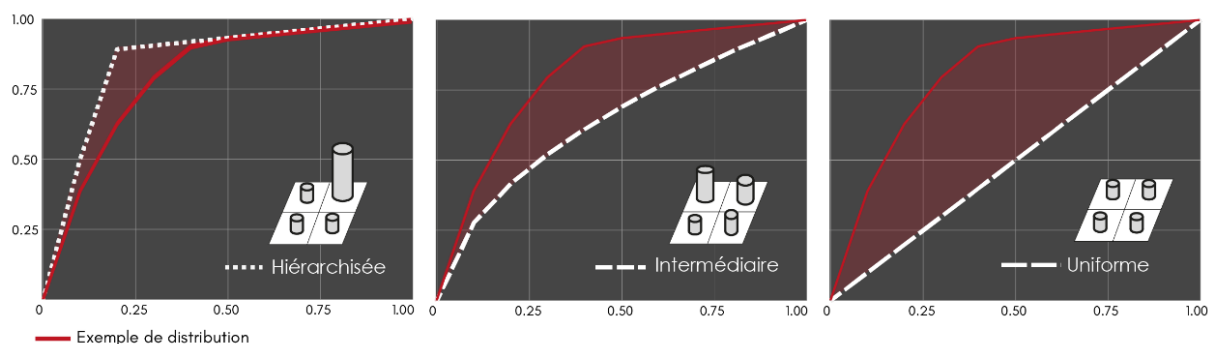


Figure 5-20 : Indicateur de hiérarchie de la répartition.

Les tableaux permettant la construction de ces courbes de hiérarchie sont disponibles en Annexe 5.

Les équipements de type 6 « *Quotidien Enseignement* », qui correspondent aux lieux d'étude sont analysés séparément car ils sont trop peu nombreux (moins de 250 équipements). Un seul indicateur de densité est

calculé, les indicateurs de distribution et de hiérarchie n'étant pas pertinents au vu des faibles effectifs de cette catégorie.

5.2.1.3 Résultats

Les lieux d'études

Le tissu centre ancien compte la plus grande densité d'établissements scolaires supérieurs avec près de cinq établissements pour 100 mailles de tissus (Figure 5-21). C'est en effet dans ce tissu que se trouvent généralement les sites universitaires historiques, implantés dans le cœur des villes. Le tissu collectif haut présente une également une densité relativement élevée, avec 2,2 établissements pour 100 mailles. Le tissu individuel dense présente une faible densité mais le nombre le plus élevé de lieux d'études supérieures. Cela s'explique par la présence de campus universitaires, généralement implantés à la périphérie des villes-centres.

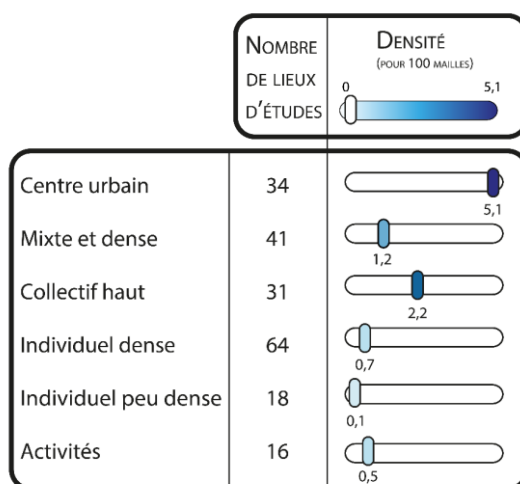


Figure 5-21 : Indicateur de densité des lieux d'études supérieures.

Les emplois

Le tissu du centre urbain compte la plus grande densité d'emplois avec 259 emplois par cellule en moyenne. Ces emplois sont très dispersés : seules 6 % des cellules sont sans emplois. Au sein des cellules occupées, les emplois ne sont pas répartis de manière homogène mais sont au contraire très hiérarchisés. C'est d'ailleurs le cas pour l'ensemble des tissus urbains. Le tissu mixte et dense présente une densité d'emplois beaucoup plus faible, avec seulement 46 emplois par maille. Ils sont là encore répartis dans la grande majorité des cellules (15 % de cellules sans emplois). Le tissu collectif haut discontinu présente une densité d'emplois intermédiaire avec 142 emplois par maille. Les tissus individuels dense et peu dense comptent peu d'emplois. Ils présentent respectivement des densités moyennes de 10 et 2 emplois par maille. Enfin le tissu urbain d'activités présente une densité moyenne de 82 emplois par maille. Ces emplois sont plus concentrés dans l'espace. L'ensemble des éléments présentés sont illustrés dans la figure ci-dessous (Figure 5-22).

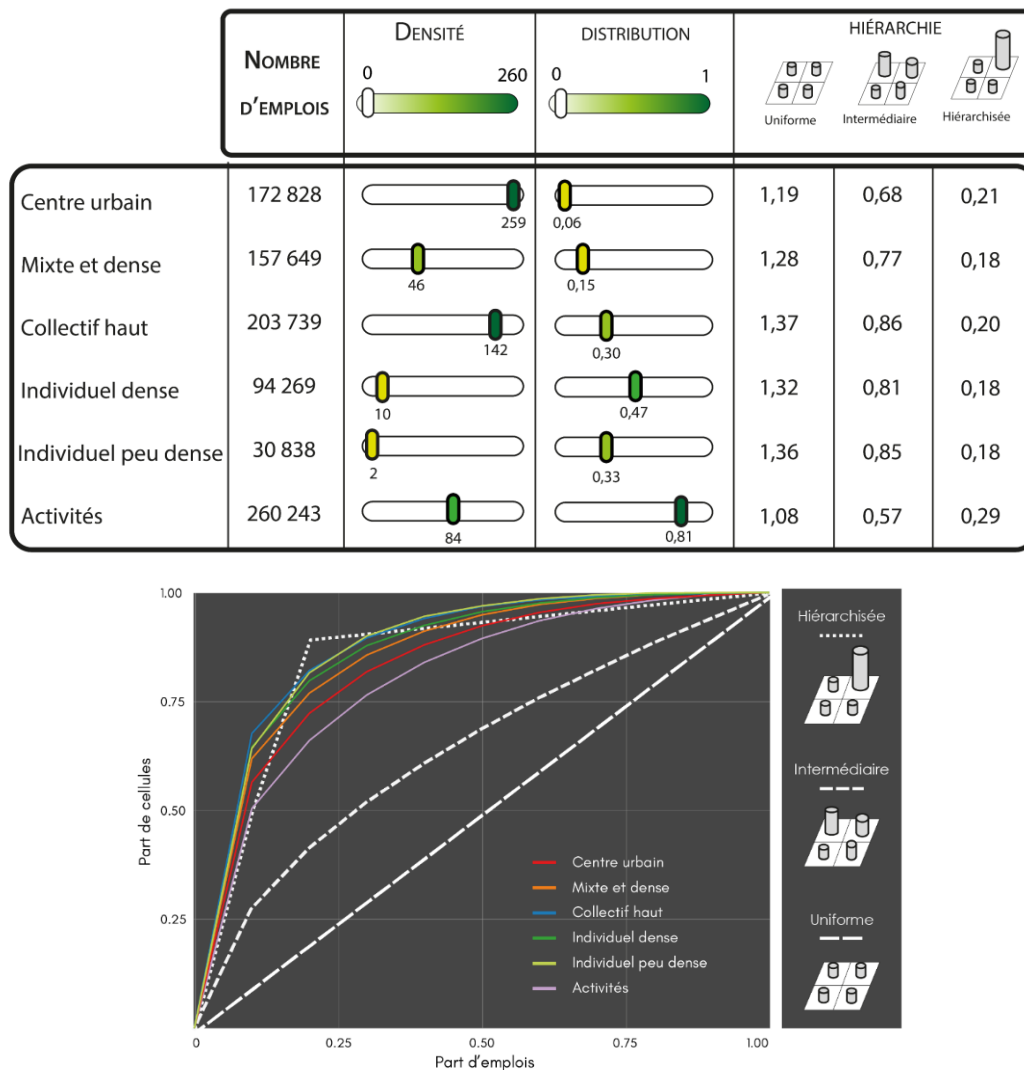


Figure 5-22 : Indicateurs d'organisation spatiale des emplois.

Les commerces et services

Le nombre de types de commerces et services étant élevé, nous proposons pour une meilleure lecture des résultats de construire quatre classes de densité et de distribution.

Dans le centre urbain, nous comptons 24 913 commerces et services pour 667 mailles, soit une densité moyenne de 37 équipements par maille. Dans le détail, les équipements sont globalement denses ou très denses, avec jusqu'à 13 équipements par maille pour les équipements de type « hebdomadaire achats ». Ces équipements sont très dispersés, il y a peu de cellules non occupées, exceptées pour les types « hebdomadaire loisirs » et « mensuels loisirs » qui sont plus concentrés. Enfin, au sein des cellules occupées, la répartition est globalement intermédiaire, avec seulement deux types qui présentent une répartition hiérarchisée (« hebdomadaire achats » et « mensuel achats »). Dans le tissu urbain mixte et dense, nous comptons 23 004 équipements pour 3437 mailles, soit une densité moyenne de 7 équipements par maille. Dans le détail, les équipements sont généralement peu denses : seuls les types « hebdomadaire achats » et « rare santé » présentent une densité supérieure à 1 équipement par maille. Ces équipements sont globalement dispersés sur l'ensemble

des cellules, même si plusieurs types sont concentrés avec des parts de cellules non occupées supérieures à 75% (« *quotidien accompagnement* », « *hebdomadaire loisirs* », « *mensuel santé* » et « *mensuel loisirs* »). Au sein des cellules occupées, la répartition est majoritairement intermédiaire, un seul type apparaît avec une répartition uniforme, le « *mensuel loisirs* » (ce qui peut s'expliquer sa très forte concentration). Le tissu urbain collectif haut discontinu, qui présente une densité globale de 7 équipements par maille, affiche une densité, une distribution et une hiérarchie similaire à celle du tissu mixte et dense. Dans le tissu individuel dense, la densité d'équipements moyenne est de 1,6 équipement par maille. Détaillée par types, la densité d'équipements est beaucoup plus faible que celles des tissus précédents. Certains types d'équipements sont ainsi très peu présents avec de nombreuses valeurs inférieures à 0,1 équipement par maille (« *quotidien achats* », « *mensuel loisirs* » et « *mensuel santé* »). Du fait de cette faible densité, les équipements apparaissent concentrés ou très concentrés : la part de cellules non occupées est supérieure à 70% pour l'ensemble des types d'équipements. Au sein des cellules occupées, la répartition est uniforme ou intermédiaire. Dans le tissu individuel dense, les mêmes caractéristiques sont observables. Les équipements sont encore moins présents, avec des densités toujours à inférieures à 0,1 équipement par maille et donc avec une très forte concentration. Enfin le tissu d'activités présente une densité moyenne de 2,95 équipements par maille. Les équipements de type « *mensuel achats* » sont les plus denses avec 1,02 équipement par maille. Les autres types d'équipements sont peu denses avec moins de 1 équipement par maille. L'ensemble de ces éléments sont présentés dans le tableau suivant (Tableau 5-10), accompagné des graphiques des écarts aux courbes de référence nécessaires pour l'indicateur de hiérarchie (Figure 5-23).

	Fréquences	Motifs	Nombre	Densité				Distribution				Hiérarchie			
				Très peu dense [0 - 0,1]	Peu dense [0,1 - 1]	Dense [1 - 5]	Très dense [5 - 13]	Très dispersée [0 - 0,3]	Dispersée [0,3 - 0,75]	Concentrée [0,75 - 0,95]	Très concentrée [0,95 - 1]	Uniforme	Intermédiaire	Hiérarchisée	
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
Centre urbain 667 cellules 24 913 commerces et services (CS) 37,35 CS/cellule	Quotidien	Accompagnement	922			1,38				0,60			0,44	0,16	0,91
	Quotidien	Achats	1674			2,51				0,31			0,79	0,28	0,55
	Hebdo.	Loisirs	1183			1,77					0,75		0,48	0,18	0,90
	Hebdo.	Achats	8430				12,64	0,04					0,93	0,42	0,40
	Mensuel	Loisirs	98		0,15						0,90		0,27	0,33	1,11
	Mensuel	Achats	5653				8,48	0,20					1,19	0,68	0,19
	Mensuel	Santé	929										0,75	0,26	0,61
	Rare	Achats	752			1,39				0,46			0,56	0,13	0,79
Rare	Santé	5272			1,13		7,90	0,10		0,42			0,83	0,32	0,51
Mixte et dense 3 437 cellules 23 004 commerces et services (CS) 6,69 CS/cellule	Quotidien	Accompagnement	1465		0,43						0,77		0,37	0,22	0,99
	Quotidien	Achats	1449		0,42					0,74			0,52	0,17	0,86
	Hebdo.	Loisirs	1440		0,42						0,81		0,48	0,19	0,90
	Hebdo.	Achats	5885			1,71				0,36			0,75	0,25	0,59
	Mensuel	Loisirs	208		0,06							0,97	0,30	0,32	1,09
	Mensuel	Achats	2917		0,85					0,59			0,73	0,25	0,64
	Mensuel	Santé	1345		0,39						0,81		0,61	0,16	0,74
	Rare	Achats	1454		0,42					0,71			0,44	0,22	0,95
Rare	Santé	6841			1,99				0,54			0,85	0,34	0,48	
Collectif haut 1 431 cellules 9 754 commerces et services (CS) 6,82 CS/cellule	Quotidien	Accompagnement	574		0,40				0,73				0,40	0,19	0,95
	Quotidien	Achats	391		0,27						0,84		0,54	0,17	0,84
	Hebdo.	Loisirs	791		0,55					0,74			0,54	0,12	0,81
	Hebdo.	Achats	2290			1,60				0,54			0,85	0,35	0,50
	Mensuel	Loisirs	67		0,05							0,98	0,17	0,39	1,18
	Mensuel	Achats	1303		0,91					0,68			0,85	0,35	0,53
	Mensuel	Santé	573		0,40						0,85		0,80	0,31	0,56
	Rare	Achats	572		0,40						0,78		0,61	0,21	0,78
Rare	Santé	3193			2,23				0,66			1,02	0,51	0,33	
Individuel dense 9 585 cellules 15 359 commerces et services (CS) 1,60 CS/cellule	Quotidien	Accompagnement	1093		0,07	0,11					0,91		0,28	0,31	1,09
	Quotidien	Achats	671			0,19					0,95		0,33	0,28	1,05
	Hebdo.	Loisirs	1825			0,39				0,71			0,51	0,17	0,86
	Hebdo.	Achats	3739										0,48	0,21	0,92
	Mensuel	Loisirs	248		0,03							0,99	0,11	0,44	1,23
	Mensuel	Achats	1610			0,17							0,47	0,23	0,94
	Mensuel	Santé	794		0,08								0,56	0,15	0,80
	Rare	Achats	1340			0,14				0,88		0,95	0,27	0,33	1,11
Rare	Santé	4039			0,42				0,84			0,82	0,33	0,53	
Individuel peu dense 16 744 cellules 5 077 commerces et services (CS) 0,30 CS/cellule	Quotidien	Accompagnement	230		0,01						0,99		0,11	0,44	1,23
	Quotidien	Achats	158		0,01							0,99	0,16	0,40	1,19
	Hebdo.	Loisirs	972		0,06							0,96	0,43	0,20	0,84
	Hebdo.	Achats	1426		0,09						0,92		0,21	0,37	1,16
	Mensuel	Loisirs	164		0,01							1,00	0,17	0,40	1,19
	Mensuel	Achats	453		0,03							0,97	0,18	0,39	1,18
	Mensuel	Santé	141		0,01							0,99	0,44	0,24	0,97
	Rare	Achats	661		0,04							0,96	0,15	0,41	1,20
Rare	Santé	872		0,05							0,97	0,53	0,25	0,91	
Activités 3 106 cellules 9158 commerces et services (CS) 2,95 CS/cellules	Quotidien	Accompagnement	485		0,16						0,97		0,27	0,32	1,10
	Quotidien	Achats	449		0,14						0,91		0,52	0,21	0,88
	Hebdo.	Loisirs	715		0,23						0,91		0,61	0,18	0,76
	Hebdo.	Achats	2 023		0,65					0,70			0,77	0,28	0,59
	Mensuel	Loisirs	53		0,02							1,00	0,00	0,51	1,30
	Mensuel	Achats	3 169			1,02				0,70			0,98	0,48	0,37
	Mensuel	Santé	219		0,07								0,83	0,34	0,55
	Rare	Achats	1 576			0,51				0,72			0,56	0,16	0,80
Rare	Santé	1 069			0,34					0,92		1,01	0,50	0,34	

Tableau 5-10 : Les indicateurs d’organisation spatiale des commerces et services.

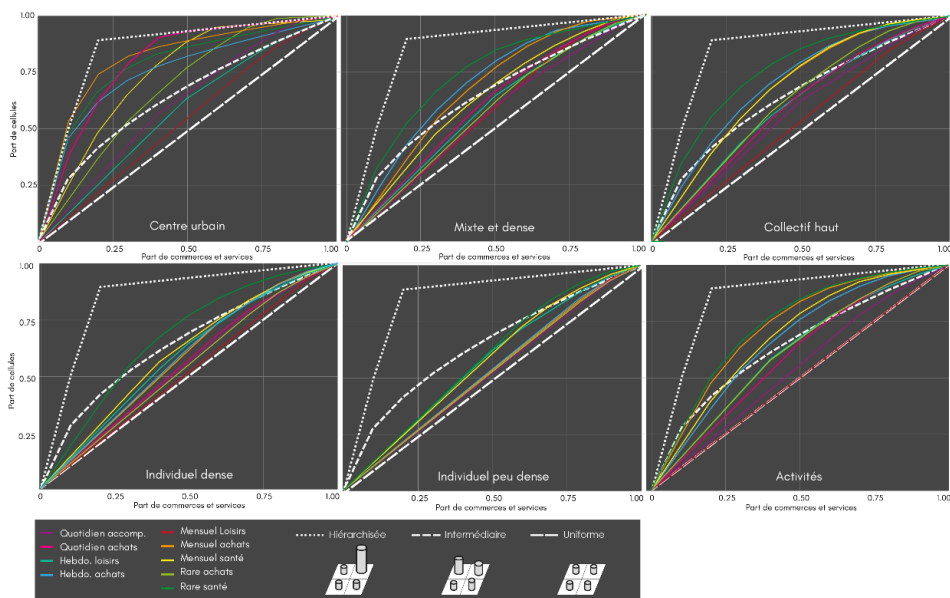


Figure 5-23 : Les écarts aux courbes de références pour l’indicateur de hiérarchie.

L'analyse fonctionnelle des tissus urbains ne nous fournit pas d'indications quant à leur localisation spatiale au sein des structures urbaines. L'analyse dans la section suivante de la répartition des tissus au sein des structures permet d'apporter les éléments manquants (voir partie 5.2.2).

5.2.2 La répartition des différents tissus urbains au sein des structures urbaines

5.2.2.1 Dans les villes monocentriques périurbaines

Les trois villes monocentriques périurbaines (Besançon, Amiens et Limoges) présentent des surfaces artificialisées proches, comprises entre 133 et 178 km². L'organisation en cercles concentriques est particulièrement marquée dans ces trois villes, même si elle est légèrement moins visible à Besançon (du fait de la topographie très marquée au sud-est de la ville). Les mailles de centre urbain sont situées au cœur des villes et représentent entre 1 et 3 % de la surface artificialisée totale. Les mailles de tissu mixte et dense ceinturent le centre urbain et forment la première couronne de la ville centre. Elles sont également légèrement présentes en dehors de la ville-centre et correspondent alors aux cœurs des plus importants villages de l'agglomération (ou petites villes), aussi appelés noyaux relais. Ces mailles représentent entre 6 et 12 % de la surface artificialisée totale. Les mailles de collectif haut discontinu forment des « *noyaux* » qui viennent s'insérer dans le tissu mixte et dense mais également individuel dense de la ville principale. Elles représentent entre 2 et 6 % du territoire urbanisé. Les mailles d'individuel dense apparaissent à une faible distance du centre (1 km) et constituent une deuxième couronne autour du tissu mixte et dense. Elles restent très présentes plus l'on s'éloigne du centre car elles constituent également les villages périurbains et la première couronne des noyaux relais. Selon la ville, la proportion de mailles de ce type est variable. Elles représentent 29 % de la surface urbanisée à Besançon, 30 % à Amiens contre seulement 14 % à Limoges. Concernant les mailles de tissu individuel peu dense, nous observons un gradient croissant du nombre de mailles en fonction la distance au centre. Elles forment ainsi une troisième couronne autour de la ville principale, mais sont également présentes autour de l'ensemble des villages périurbains. Ces mailles sont particulièrement présentes à Limoges, où elles représentent 75 % de la surface artificialisée totale. Cette agglomération présente en effet un nombre très important de villages périurbains. Enfin, les mailles du tissu d'activités forment des noyaux qui s'insèrent dans la couronne de tissu individuel peu dense ou même qui s'implantent à l'extérieur de la ville-centre. Les trois figures suivantes montrent la répartition spatiale des différents tissus urbains au sein des trois villes monocentriques périurbaines (Figure 5-24 à Figure 5-26).

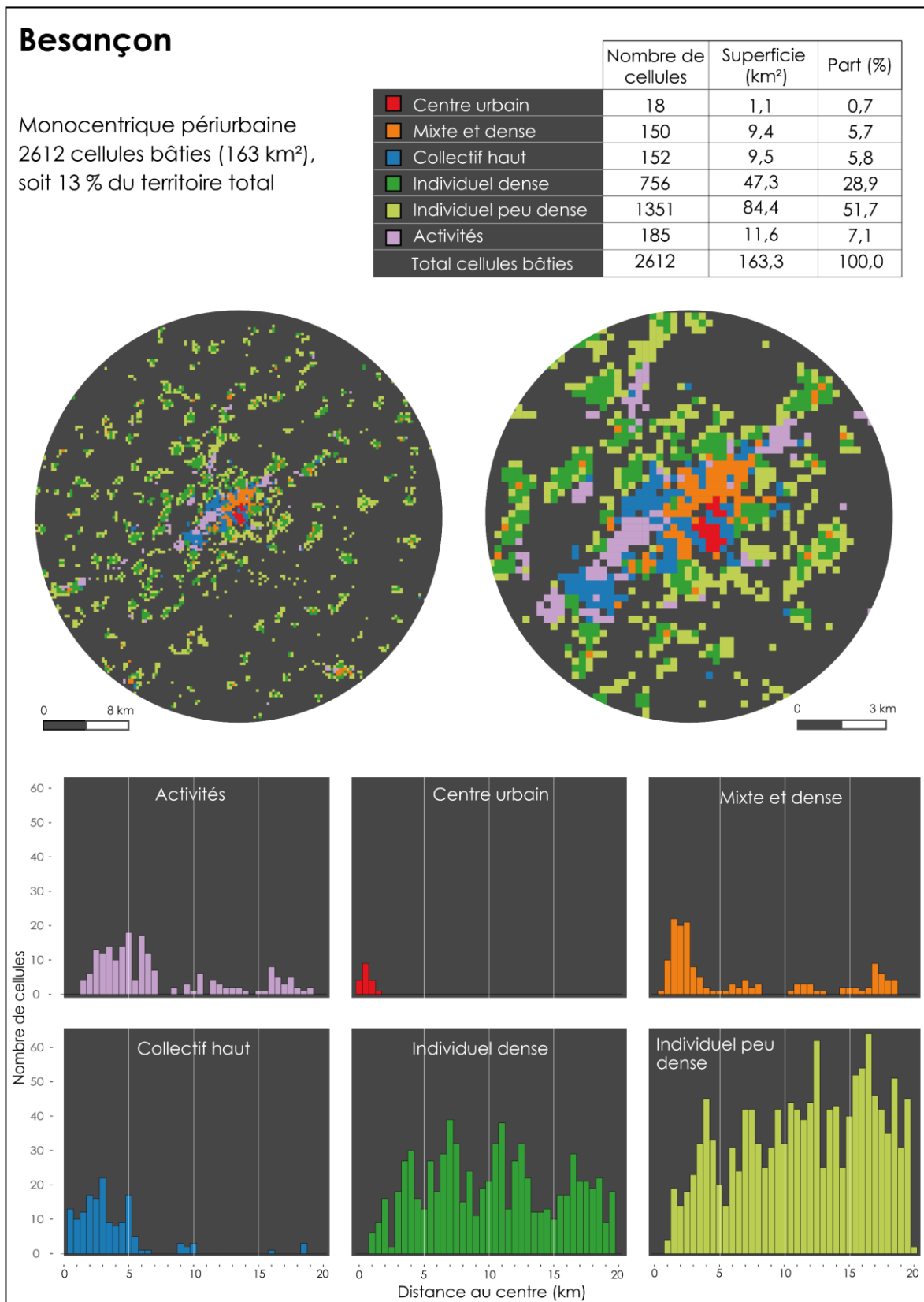


Figure 5-24 : Composition et répartition spatiale des mailles de tissus urbains à Besançon.

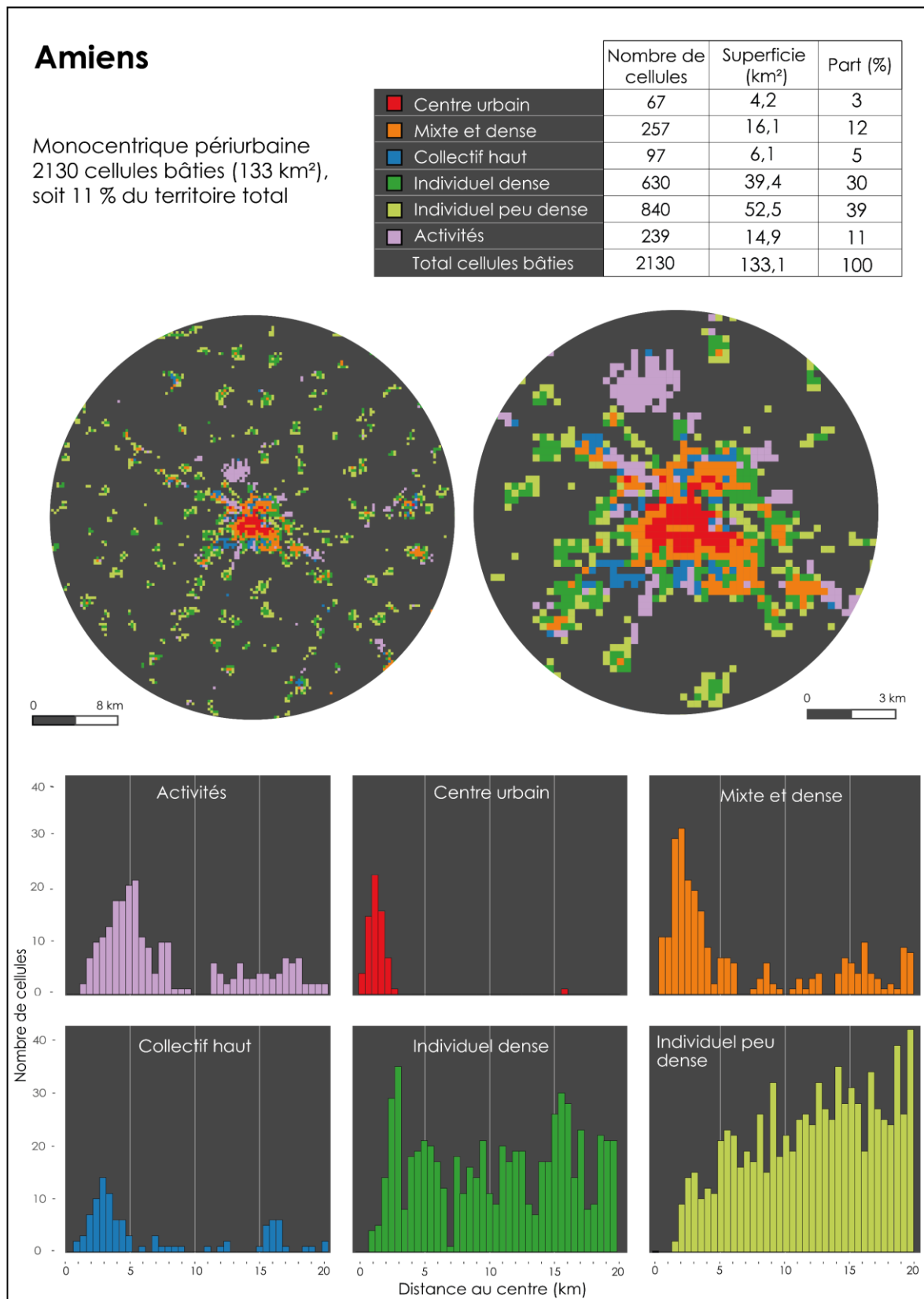


Figure 5-25 : Composition et répartition spatiale des mailles de tissus urbains à Amiens.

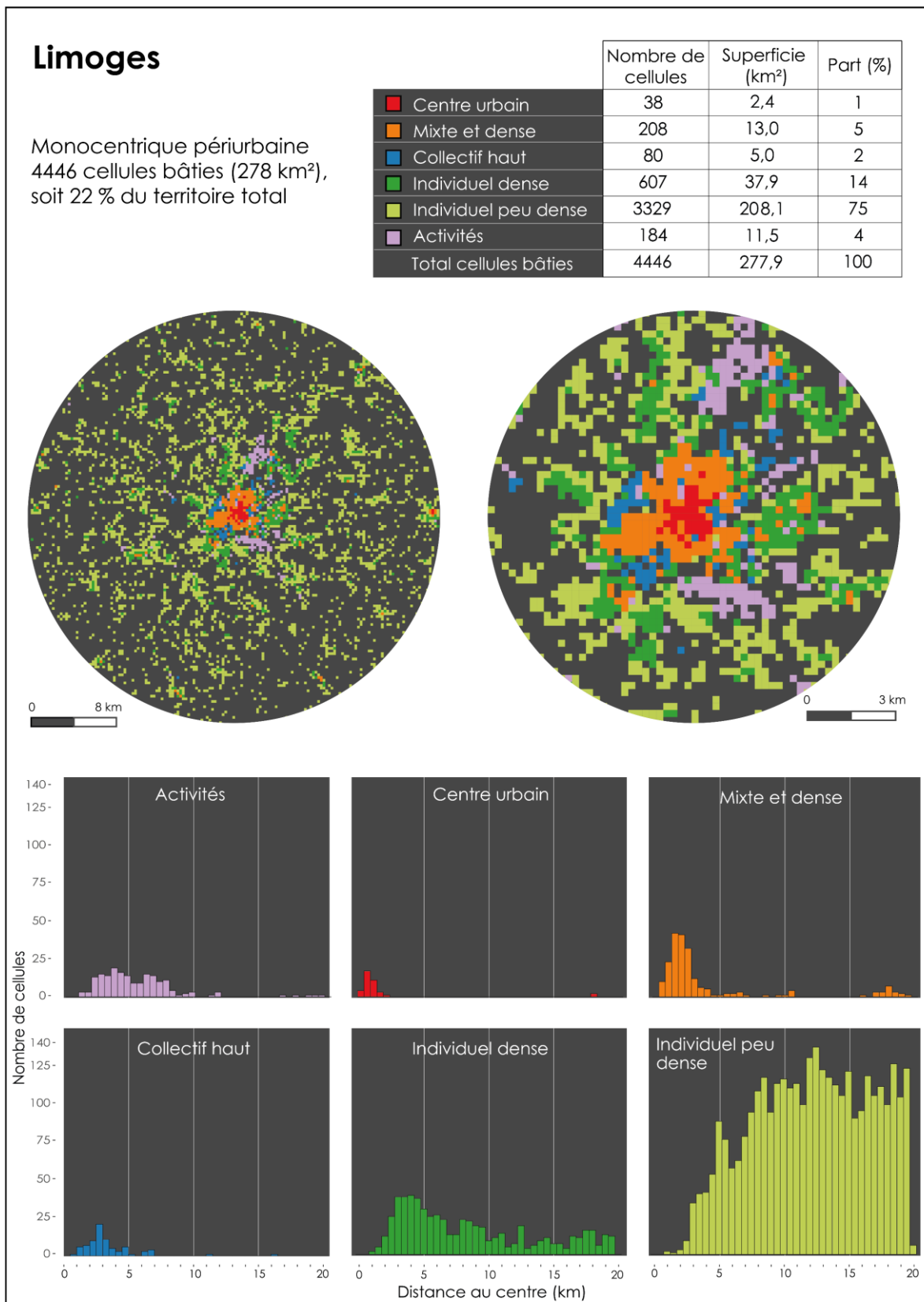


Figure 5-26 : Composition et répartition spatiale des mailles de tissus urbains à Limoges.

5.2.2.2 Dans les villes monocentriques axialisées

Les trois villes monocentriques axialisées (Mulhouse, Grenoble et Bordeaux) présentent des surfaces artificialisées variées, de par la taille plus importante de Bordeaux. Mulhouse et Grenoble comptent 17 et 18 % de surfaces artificialisées contre 39 % pour Bordeaux. Nous retrouvons dans la ville centre une organisation concentrique, identique à celle observée dans les villes monocentriques périurbaines. Au-delà de la ville centre, les agglomérations s'organisent principalement autour des axes de transports majeurs et forment des « *digitations* » ou des « *doigts de gant* ». Ce développement est particulièrement visible à Grenoble, car accentué par le relief très prononcé (l'agglomération s'étend dans les vallées). Les mailles de centre urbain sont situées au cœur de la ville-centre et représentent entre 1 et 3 % de la surface artificialisée totale. Les mailles de tissu mixte et dense ceinturent le centre urbain et forment la première couronne de la ville-centre. Cependant elles restent très nombreuses lorsque l'on s'éloigne du centre : elles s'étirent en effet le long des couloirs d'urbanisation ou forment les cœurs de petites villes « *satellites* », situées entre ces différents couloirs. Ces mailles représentent entre 10 et 18 % de la surface artificialisée totale. Les mailles de type collectif haut discontinu forment des noyaux au sein du tissu mixte et dense et du tissu individuel dense. Elles sont particulièrement importantes à Grenoble où elles représentent 10 % de la surface artificialisée, contre seulement 3 et 4 % pour Mulhouse et Bordeaux. Les mailles de type individuel dense augmentent avec la distance au centre, mais dans le cas de Grenoble et Bordeaux atteignent un palier autour des 10 km et diminuent ensuite légèrement. Ces mailles forment la deuxième couronne de la ville centre, mais ceinturent également le tissu mixte et dense des corridors d'urbanisation et des villes satellites. Les mailles de tissu individuel peu dense suivent la même logique, en formant la troisième couronne de la ville centre et en ceinturant également le tissu individuel peu dense des corridors et des villes satellites. Les mailles individuelles (denses et peu denses) constituent également des villages périurbains, notamment à l'est de Bordeaux. Elles représentent entre 65 et 70 % de la surface artificialisée totale. Enfin, les mailles d'activités s'insèrent au sein du tissu individuel peu dense de la ville centre, généralement dans l'alignement des corridors d'urbanisation. Elles se retrouvent également parfois le long des corridors d'urbanisation, notamment à Grenoble. Les trois figures suivantes montrent la répartition spatiale des différents tissus urbains au sein des villes monocentriques axialisées (Figure 5-27 à Figure 5-29).

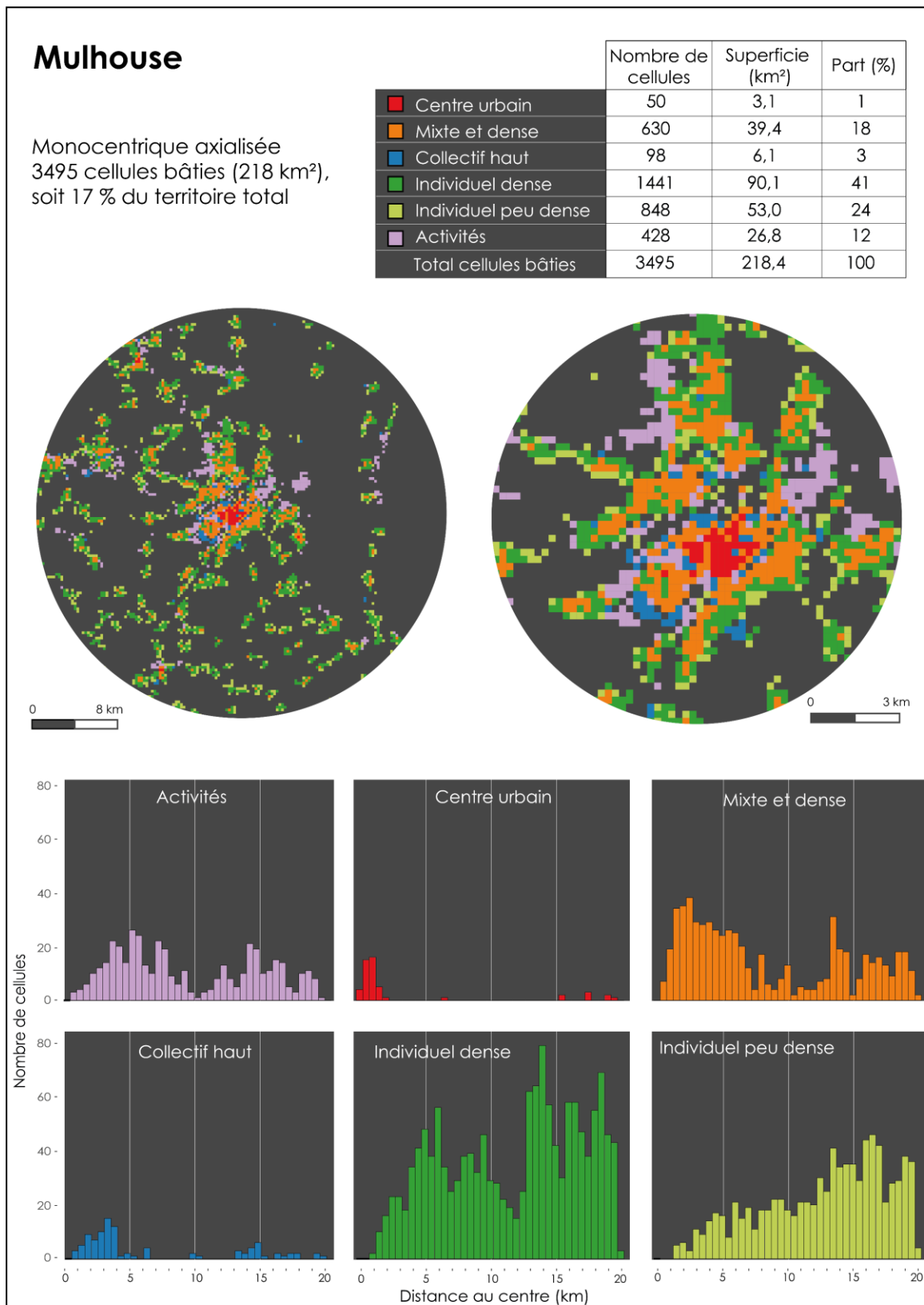


Figure 5-27 : Composition et répartition spatiale des mailles de tissus urbains à Mulhouse.

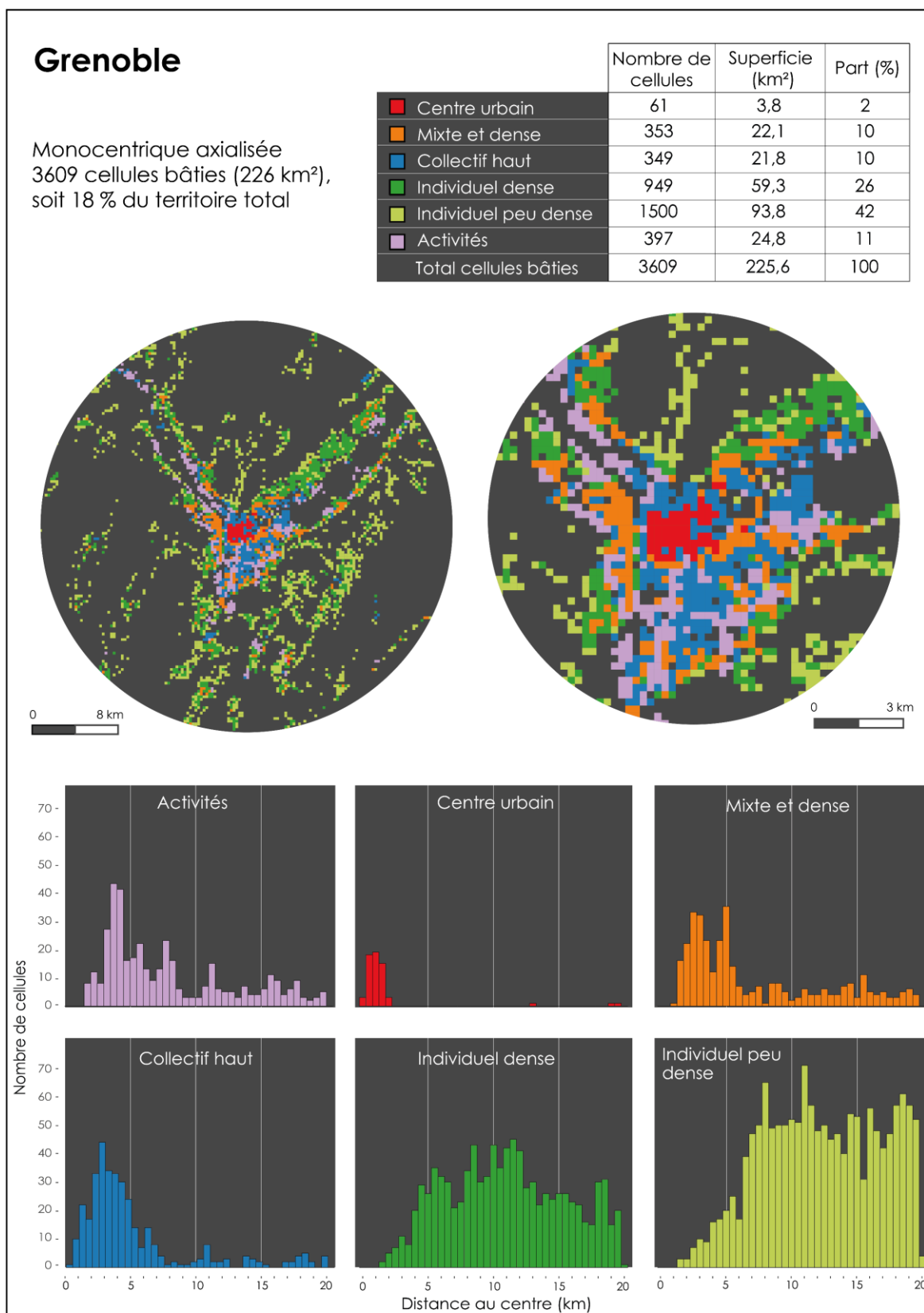


Figure 5-28 : Composition et répartition spatiale des mailles de tissus urbains à Grenoble.

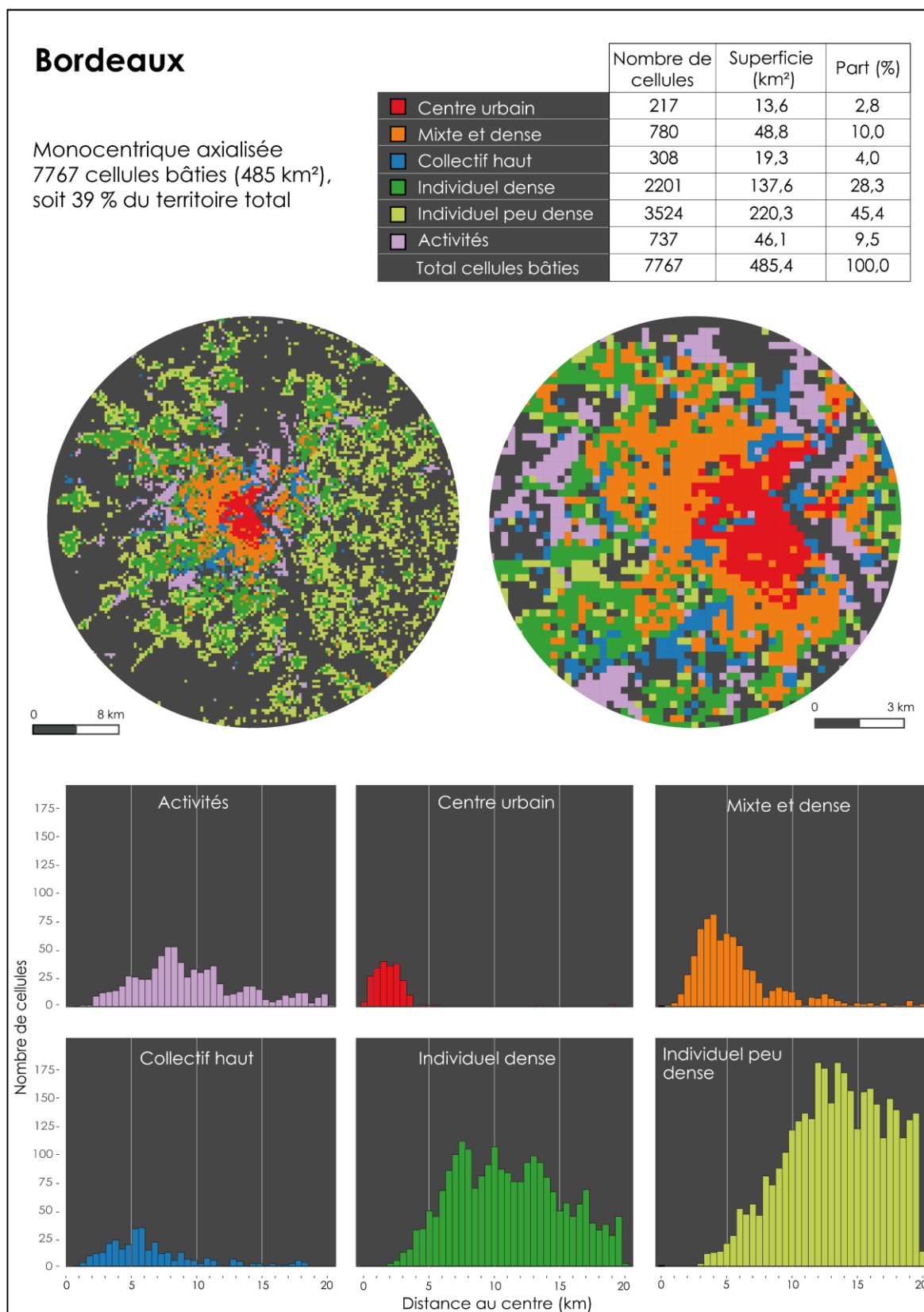


Figure 5-29 : Composition et répartition spatiale des mailles de tissus urbains à Bordeaux.

5.2.2.3 Dans les villes polycentriques hiérarchisées

Les trois villes polycentriques hiérarchisées (Chambéry, Clermont-Ferrand et Nîmes) présentent des surfaces artificialisées similaires, comprises entre 17 et 19 %. Comme pour les villes précédentes, nous retrouvons une organisation concentrique dans la ville centre principale, mais également dans les centres secondaires et tertiaires. Les cellules de type centre urbain sont ainsi présentes au cœur de la ville principale mais également au cœur de ces autres pôles urbains. Malgré la présence de plusieurs centres urbains, la surface couverte par les mailles de ce type reste globalement comparable à celles des autres structures de villes. Le centre urbain de la ville principale est en effet proportionnellement plus petit dans les villes polycentriques hiérarchisées que dans les autres types de villes. Les mailles de tissu urbain mixte et dense forment une première couronne autour des différents centres urbains. Elles représentent entre 6 et 14 % du territoire artificialisé. Elles sont également présentes en périphérie, où elles constituent les cœurs des villages ou des petites villes satellites. Les cellules de collectif haut discontinu représentent entre 3 et 4 % de la surface artificialisée totale. Elles forment des noyaux au sein du tissu mixte et dense des différents centres. Les mailles de tissu individuel (dense et peu denses) constituent la troisième et quatrième couronne des villes principales. Elles forment également des villages périurbains. Au total, elles représentent entre 75 et 85 % du territoire artificialisé. Les trois figures suivantes montrent la répartition spatiale des différents tissus urbains au sein des villes polycentriques axialisées (Figure 5-30 à Figure 5-32).

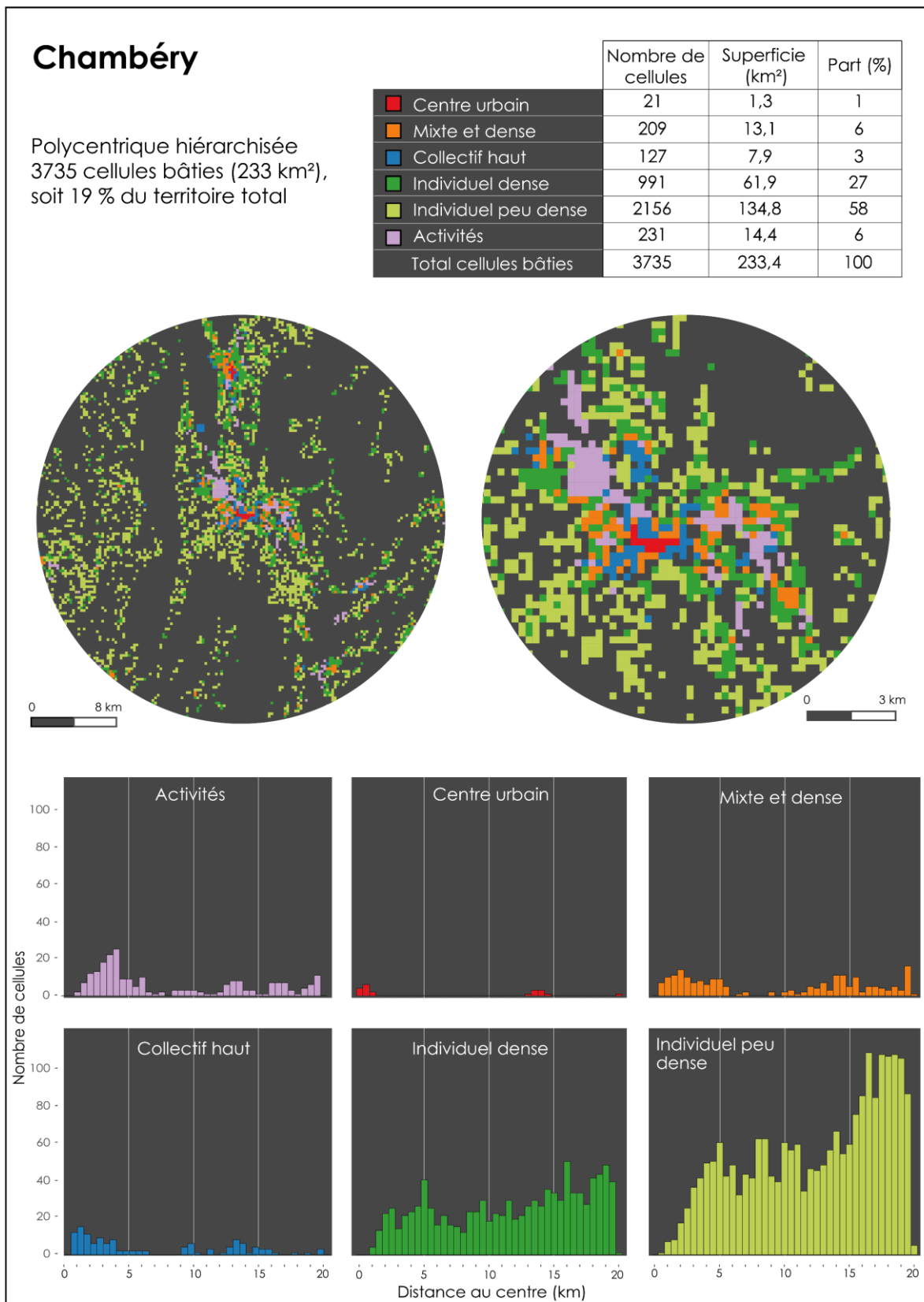


Figure 5-30 : Composition et répartition spatiale des mailles de tissus urbains à Chambéry.

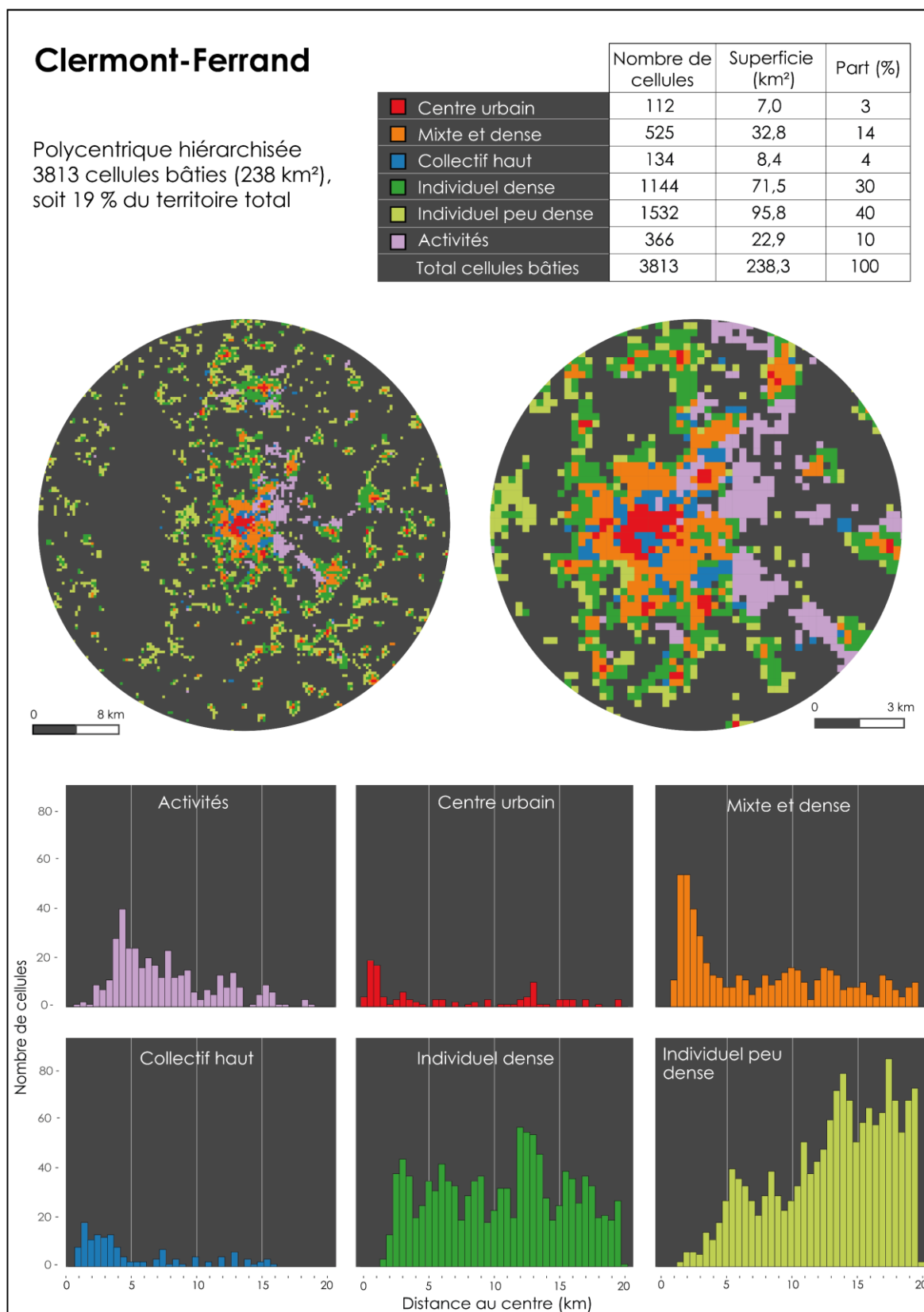


Figure 5-31 : Composition et répartition spatiale des mailles de tissus urbains à Clermont-Ferrand.

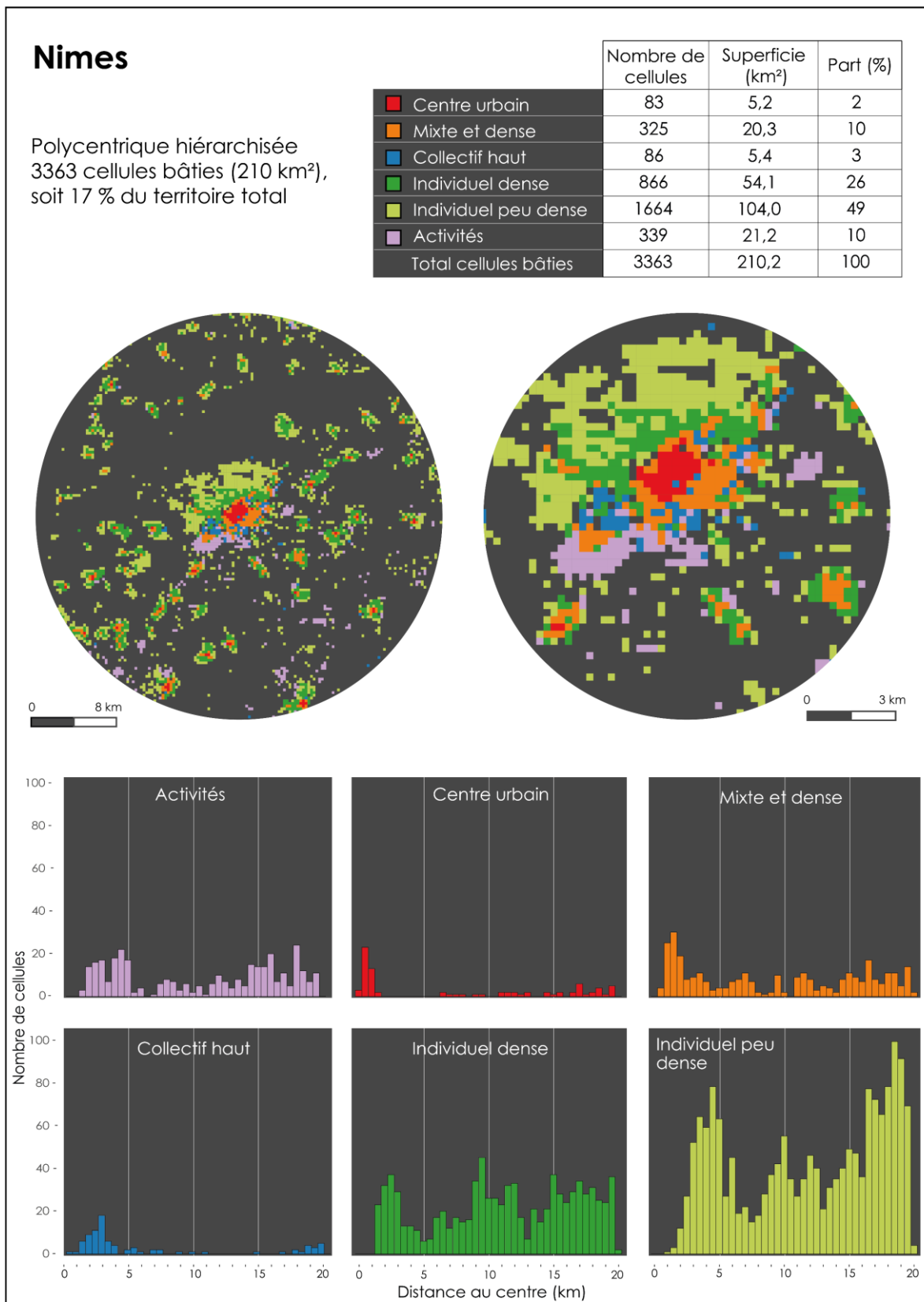


Figure 5-32 : Composition et répartition spatiale des mailles de tissus urbains à Nîmes.

5.2.3 La structure du réseau routier principal

L'identification des tissus urbains dans les différentes villes nous permet d'observer par une analyse cartographique la structure des réseaux routiers majeurs et leurs positionnements par rapport à ces tissus.

5.2.3.1 Les données utilisées

Afin d'analyser la structure des réseaux routiers principaux, nous utilisons les données de la BD-Topo produites par l'IGN. Dans cette base de données, les voies routières sont classées par niveaux d'importance en fonction des relations :

- Importance 6 : pas de circulation automobile ;
- Importance 5 : rue de desserte locale ;
- Importance 4 : rue structurant la circulation en agglomération ;
- Importance 3 : voies majeures d'une agglomération, connectant les différents espaces urbains.
- Importance 2 : voies qui assurent les liaisons à fort trafic et à caractère prioritaire entre agglomérations. Ce sont également les liaisons entre département et contournement des agglomérations.
- Importance 1 : liaisons principales entre métropoles, généralement de type autoroutier.

Ici, seules les voies routières d'importances 1 à 4 nous intéressent concernant les réseaux principaux, le réseau routier de desserte locale des villes archétypales étant déjà défini dans la partie comme un plan en damier avec un maillage régulier (voir partie 4.3.3).

5.2.3.2 Analyse des structures routières des villes étudiées

L'analyse cartographique des réseaux routiers principaux nous montre qu'il existe des points communs entre toutes les villes mais également des différences en fonction du type de structure urbaine.

Tout d'abord, concernant les points communs, nous constatons que toutes les villes étudiées présentent une structure de réseau radioconcentrique dans la ville-centre ou dans les pôles secondaires et tertiaires (dans le cas des villes polycentriques hiérarchisées). Nous observons tout d'abord un emboîtement de trois axes routiers circulaires :

- Un premier boulevard ceinture les mailles de type centre ancien. Cet axe correspond généralement aux anciens remparts. Cette voie est d'importance 4 et possède généralement une seule chaussée.
- Un second boulevard ceinture la première couronne composée de mailles mixte et dense et de collectifs hauts discontinus. Cette voie est d'importance 3, souvent à deux chaussées, en deux fois deux voies.
- Un troisième axe de contournement urbain ceinture la ville centre et permet également de connecter les différentes zones d'activités. Cette voie est d'importance 2, à deux chaussées et à deux fois deux voies (parfois plus).

Nous observons également des axes radiaux, qui viennent connecter les axes circulaires de la ville centre. Ces grandes artères urbaines apparaissent entre le premier et le second boulevard. Ce sont généralement des voies d'importance 4, à une seule chaussée. Elles se prolongent entre le second et le troisième axe circulaire : ce sont alors des voies d'importance 4 ou 3, à une chaussée. En dehors de la ou des villes-centres, des différences apparaissent selon le type de ville étudié :

- Dans les villes monocentriques périurbaines, des radiales se prolongent au-delà du troisième boulevard. Elles se dispersent en étoile autour de la ville centre pour desservir les territoires périphériques et en particulier les petites villes satellites. Ce sont des voies d'importance 3 ou 2, à une ou deux chaussées (en fonction de l'importance des villes desservies). Quelques axes tangentiels connectent les radiales entre elles, desservant généralement les villages périurbains les plus importants. Ces voies sont d'importance 4 à une seule chaussée. Enfin, nous observons également la présence d'un axe autoroutier (ou de type autoroutier), d'importance 1. Cette voie de desserte régionale traverse le territoire, passant généralement à proximité de la ville centre où sont localisés les échangeurs (entrées/sorties).
- Dans les villes monocentriques axialisées, des radiales se prolongent également au-delà du troisième boulevard dans les couloirs d'urbanisation. Ce sont des voies d'importance 3 ou 2, à une ou deux chaussées. Les axes tangentiels sont moins nombreux que dans les villes monocentriques périurbaines. Nous en observons surtout à Mulhouse qui permettent de connecter les villes satellites et les couloirs d'urbanisation. Enfin nous observons également la présence d'un axe autoroutier, qui se déploie en parallèle des autres axes, en bordure des couloirs d'urbanisation.
- Dans les villes polycentriques hiérarchisées, les radiales permettent de connecter la ville-centre aux autres pôles urbains. Ces radiales sont généralement doublées par un axe autoroutier. Des axes tangentiels existent également permettant de connecter des plus petites villes et des villages.

Les figures suivantes ont permis de réaliser l'analyse cartographique des réseaux routiers structurants des différentes villes (Figure 5-33 à Figure 5-35). L'épaisseur de tracé des axes traduit le niveau d'importance (de 1 à 4).

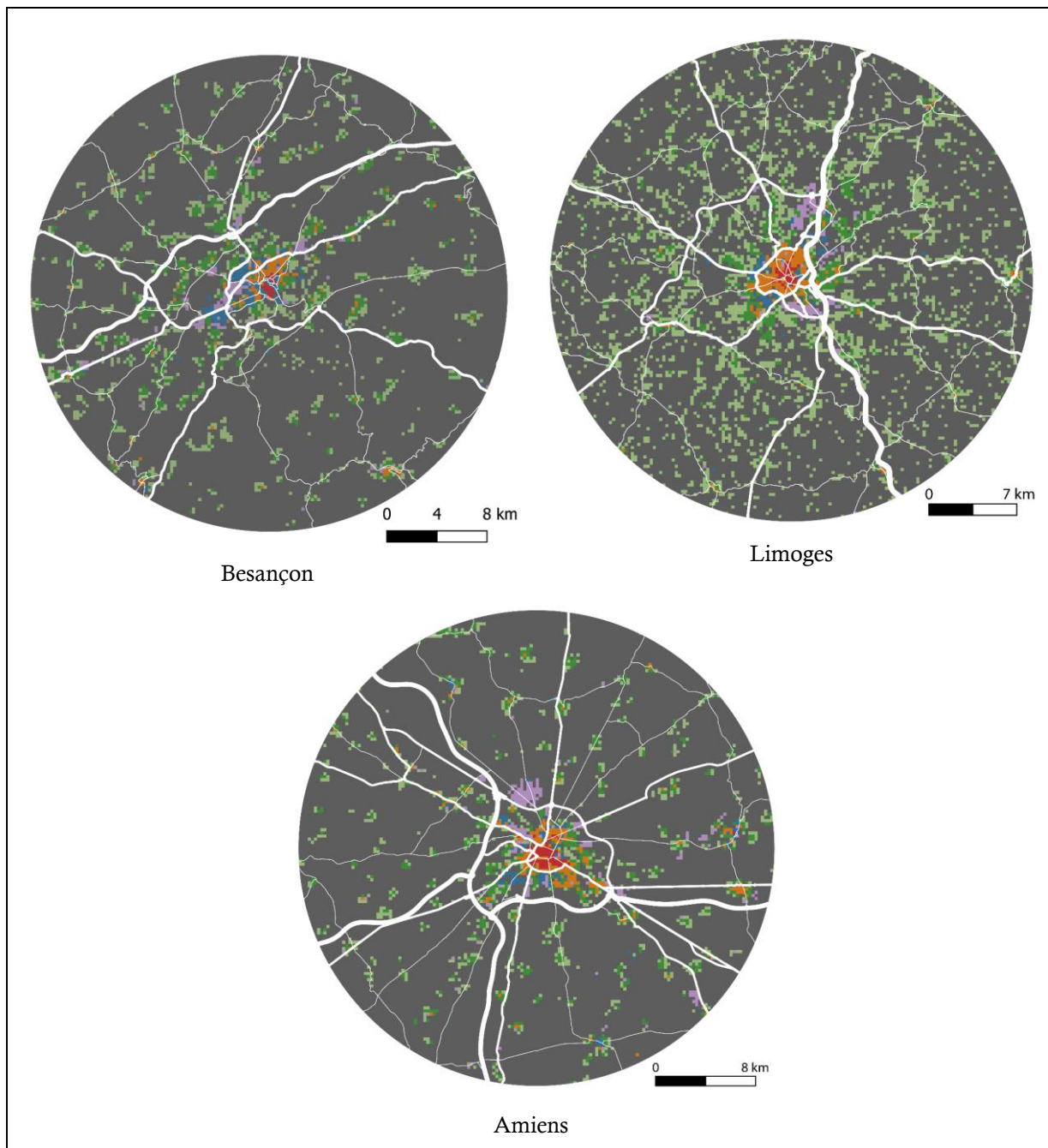


Figure 5-33 : Les réseaux routiers structurants des villes monocentriques périurbaines.

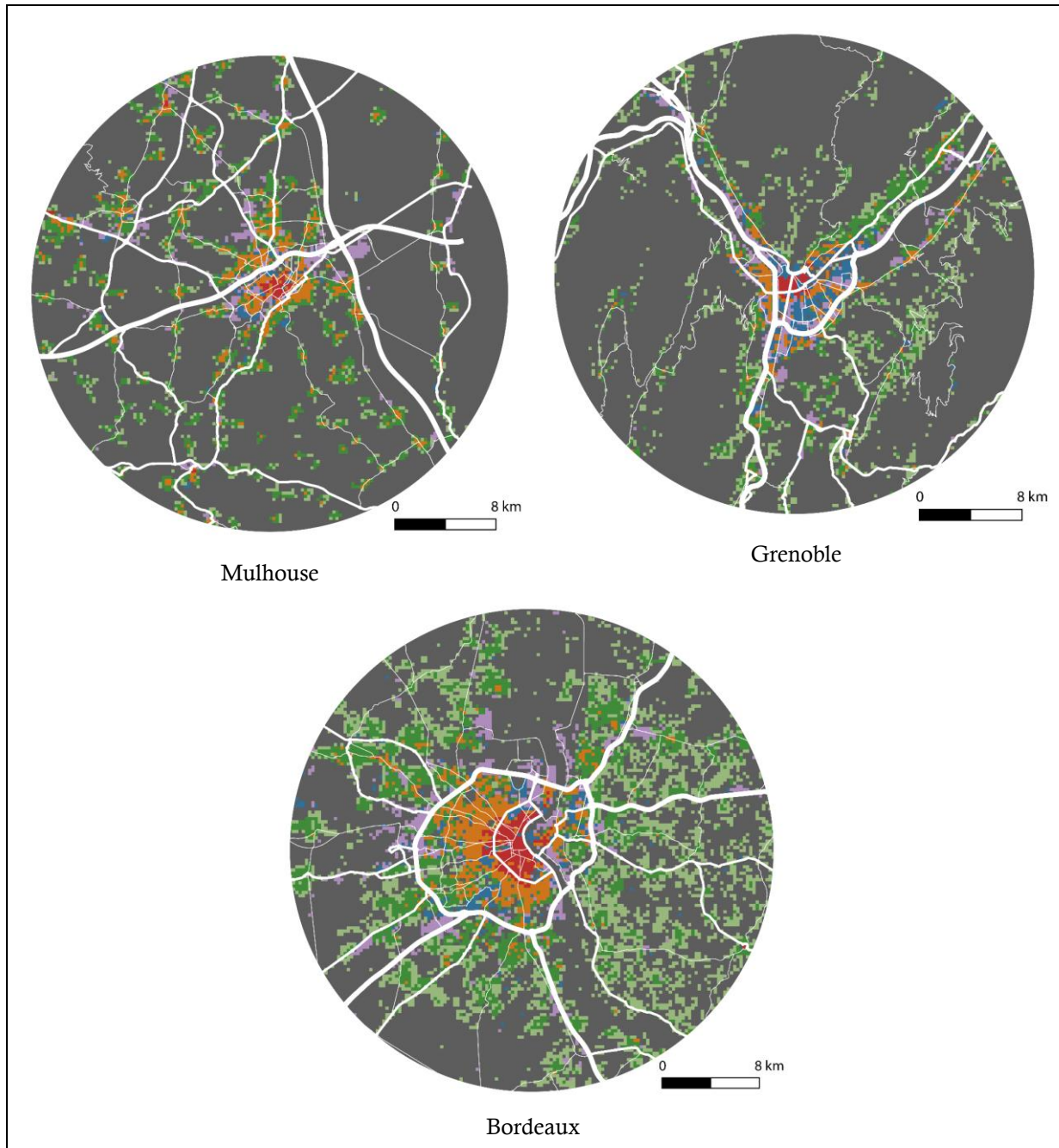


Figure 5-34 : Les réseaux routiers structurants des villes monocentriques axialisées.

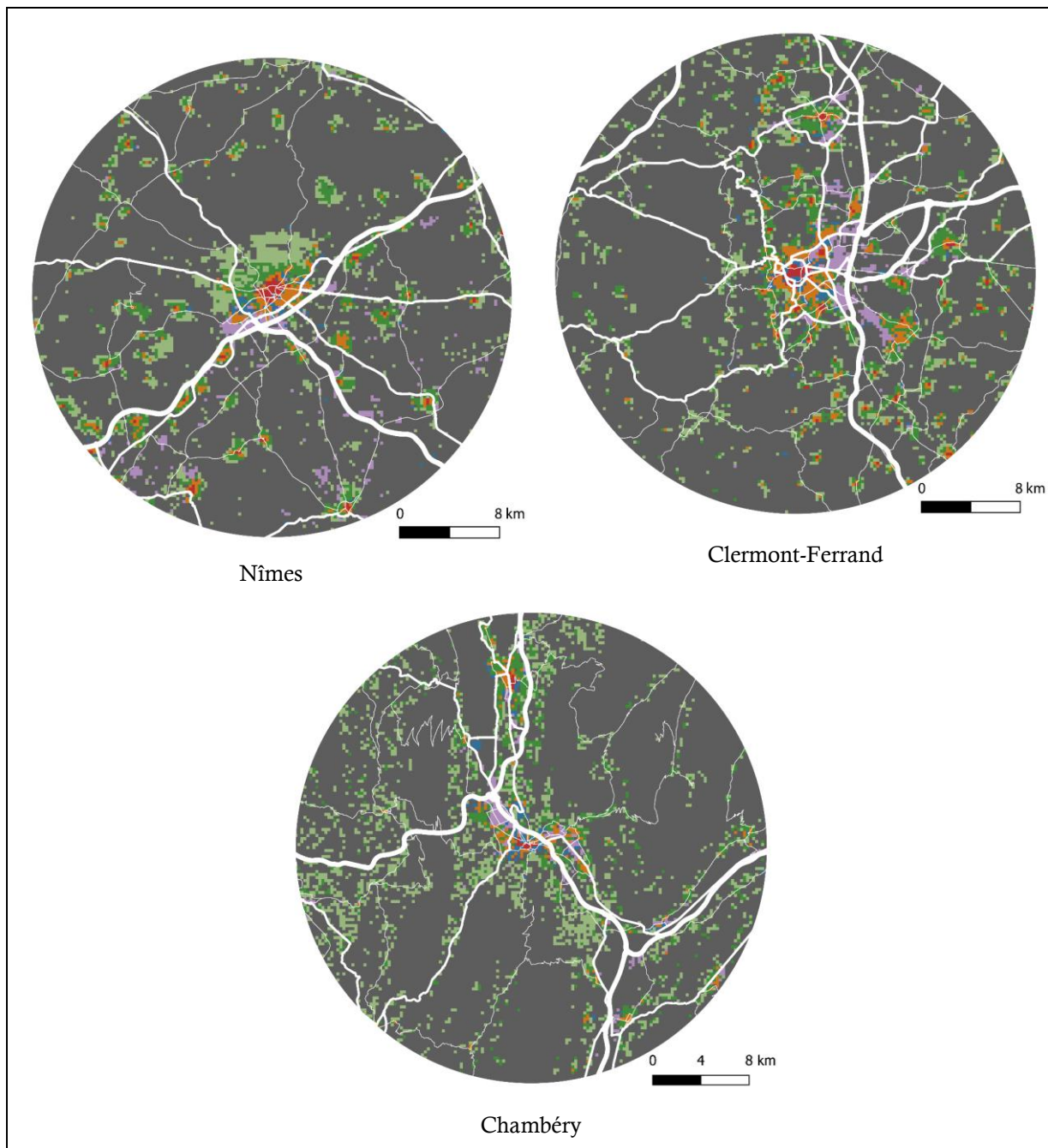


Figure 5-35 : Les réseaux routiers structurants des polycentriques hiérarchisées.

5.2.4 Les apports de l'analyse des tissus urbains et des structures urbaines des villes réelles

5.2.4.1 Les apports de l'analyse des tissus urbains des villes réelles

L'analyse des tissus urbains nous apporte différents éléments complémentaires pour leur modélisation. Tout d'abord, concernant la diversité de fonctions, l'analyse de l'organisation des équipements et des emplois nous permet de corriger et d'affiner nos hypothèses initiales sur les dimensions des tissus urbains (voir partie 4.2.1). Nous constatons en effet que les indicateurs d'organisation spatiale des commerces et services pour les tissus urbains collectif haut et mixte et dense sont quasiment identiques. De plus, le tissu collectif haut présente par une densité d'emplois et d'établissements universitaires plus importante. La diversité de fonction du tissu mixte et dense n'est ainsi pas supérieure à celle du tissu collectif haut discontinu.

Cette analyse des tissus urbains nous permet également de quantifier cette diversité, de connaître leur intensité, leur distribution et leur niveau de hiérarchie. La combinaison de ces trois indicateurs permettra par la suite la création de règles d'affectation des commerces, services et emplois selon le tissu urbain dans les villes archétypales. À titre d'exemple, les équipements de type « *mensuels achats* » dans les cellules de centre ancien seront denses, avec une distribution sur l'ensemble des cellules (très dispersée) de manière hiérarchisée.

Ensuite, la densité de bâti est maintenant connue. Nous utilisons la valeur moyenne du coefficient d'emprise au sol (gsi). À partir de cette densité, il nous est maintenant possible de connaître le nombre de bâtiments de chaque type à affecter dans les mailles de tissus urbains (Tableau 5-11). Il faut cependant noter que les bâtiments utilisés pour calculer l'indicateur de densité regroupent tout types de bâtiments, avec des bâtiments commerciaux, résidentiels, tertiaires, industriels, agricoles, etc. Seule une partie des bâtiments à affecter dans les mailles des tissus urbains est en réalité à usage résidentiel.

Formes de mailles	Tissu urbain	Architecture bâtie	Densité de bâtiment (gsi)	Nombre de bâtiments par maille
Forme 1	Centre ancien	Grand collectif mitoyen avec cour intérieure	40 %	100
Forme 2	Collectif haut	Grand collectif isolé	15 %	9
Forme 3	Mixte et dense	Maison individuelle mitoyenne	19 %	247
Forme 4	Mixte et dense	Petit collectif isolé	19 %	113
Forme 5	Mixte et dense	Petit collectif mitoyen	19 %	170
Forme 6	Mixte et dense	Grand collectif mitoyen	19 %	24
Forme 7	Individuel dense	Maison individuelle détachée	10 %	128
Forme 8	Individuel dense	Maison individuelle mitoyenne	10 %	130
Forme 9	Individuel peu dense	Maison individuelle détachée	3 %	38
Forme 10	Individuel peu dense	Villa	3 %	19

Tableau 5-11 : Densité de bâtiment des différentes mailles de tissus urbains.

5.2.4.2 Les apports de l’analyse des structures urbaines des villes réelles

L’analyse des structures urbaines des villes réelles nous apporte différents éléments nécessaires à la génération des villes archétypales. Tout d’abord, elle nous apporte des éléments chiffrés sur la surface bâtie des structures urbaines à modéliser. Cette surface est comprise entre 133 et 485 km², avec une moyenne de 243 km² (Annexe 6). À partir de ces valeurs, nous fixons des valeurs similaires de surfaces bâties aux villes archétypales. Nous répartissons également cette surface urbanisée entre les différentes « taches » de bâtiments (Tableau 5-12).

		Nombre d'entités	Surface d'une entité (km ²)	Surface totale (km ²)	Part de la surface totale (%)
Ville monocentrique périurbaine	Centre principal	1	154	154	59%
	Noyaux relais	4	10	38	15%
	Noyaux isolés	40	2	71	27%
	Total surface urbanisée	45	/	263	100 %
Ville monocentrique axialisée	Centre principal	1	95	95	32%
	Noyaux connectés	4	40	160	55%
	Noyaux satellites	4	10	38	13%
	Total surface urbanisée	9	/	294	100 %
Ville polycentrique hiérarchisée	Centre principal	1	154	154	59%
	Centre secondaire	1	79	79	30%
	Centre tertiaire	1	28	28	11%
	Total surface urbanisée	3	/	261	100 %

Tableau 5-12 : Les surfaces urbanisées des différentes taches bâties dans les villes théoriques.

L’analyse des structures urbaines réelles nous indique également la composition en tissus urbains des villes archétypales (Figure 5-36). Un tableau détaillé présentant les surfaces occupées par chaque tissu dans les villes réelles est également disponible en Annexe 7.

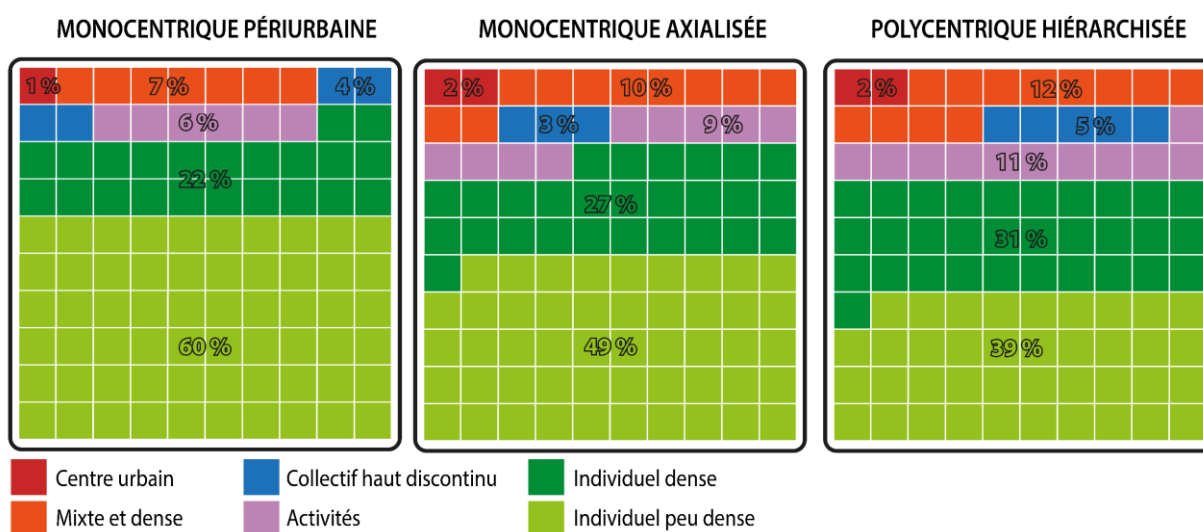


Figure 5-36 : Articulation des tissus urbains et des structures urbaines sélectionnés.

Les trois structures urbaines présentent des parts similaires de tissus de type centre urbain et collectif haut discontinu. Des différences apparaissent pour les autres types de tissus urbains. Les tissus mixte et dense et individuel dense représentent des parts plus importantes dans les villes monocentriques axialisées : ils représentent respectivement 12 % et 31 % de la surface bâtie (contre 10 % et 27 % pour les villes polycentriques hiérarchisées et 7 % et 22 % pour les monocentriques périurbaines). Le tissu individuel peu dense est majoritaire dans les villes monocentriques périurbaines (60 % de la surface bâtie totale).

Enfin, dernier point, l'analyse des structures urbaines des villes réelles nous renseigne sur la forme des réseaux routiers principaux. Ainsi, un plan radioconcentrique est retenu pour les trois villes archétypales, avec trois boulevards circulaires dans les pôles principaux et une rocade de contournement autour de ce pôle. Plusieurs radiales connectent les différents pôles et noyaux importants entre eux. Enfin des axes secondaires sont créés afin de connecter l'ensemble des villages périurbains. Ces différents axes sont hiérarchisés en quatre niveaux d'importance, du niveau 1 autoroutier (desserte régionale) au niveau 4 (desserte locale).

À partir de l'ensemble des éléments apportés ici, il est possible de proposer une représentation graphique des villes archétypales à modéliser, respectant les différentes proportions de tissus urbains (Figure 5-37).

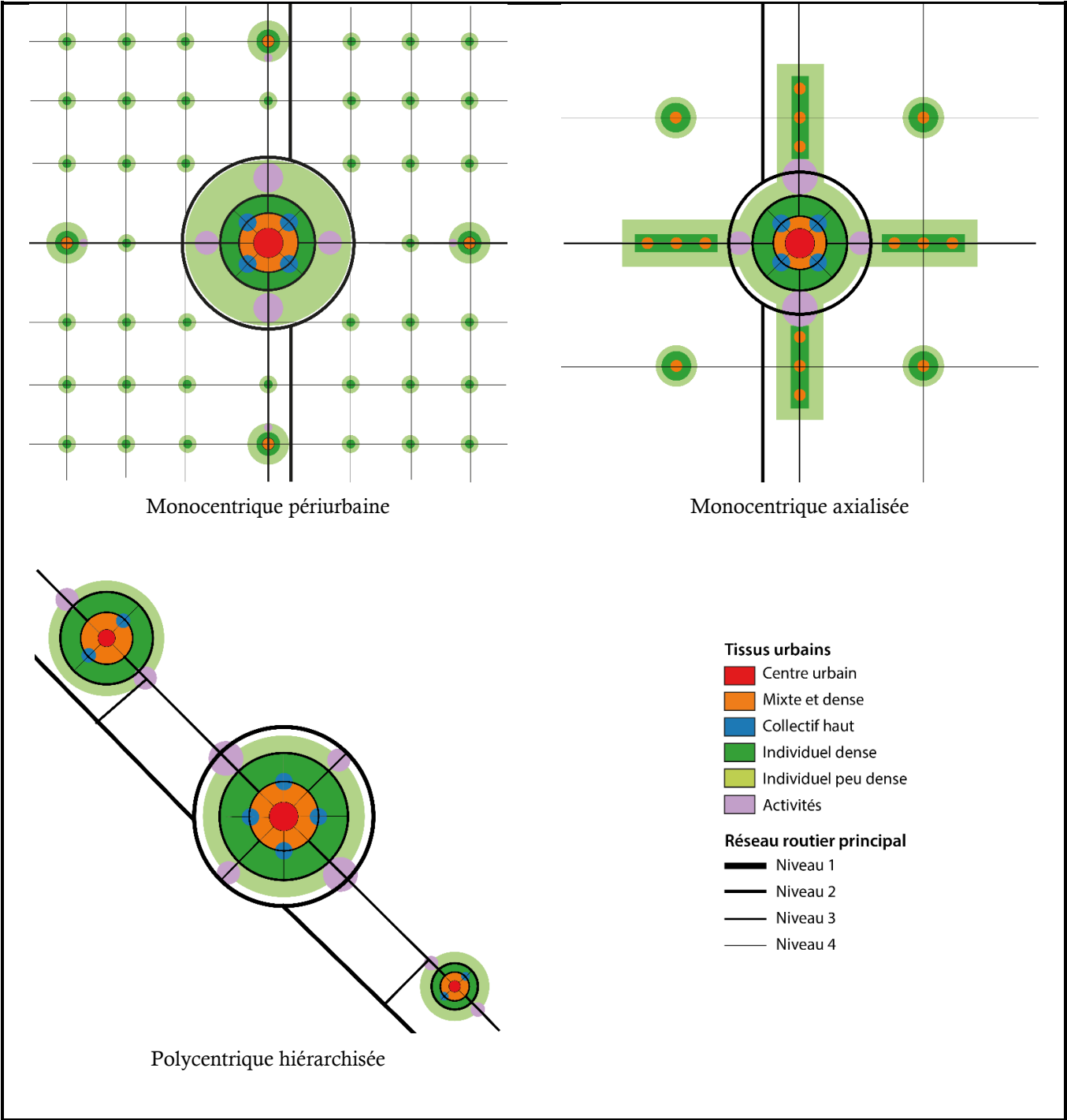


Figure 5-37 : Les villes archétypales à modéliser.

5.3 Synthèse du chapitre 5

Ce chapitre propose une identification et une quantification des modèles urbains conceptuels identifiés précédemment. Pour cela, neuf villes réelles ont été étudiées, trois avec une structure urbaine de type « *monocentriques périurbaines* », trois avec une structure de type « *monocentrique axialisées* » et trois avec une structure de type « *polycentrique hiérarchisée* ». À partir d'indicateurs morphologiques, une méthode de classification automatique a permis l'identification des six tissus urbains dans ces villes. Une analyse des caractéristiques fonctionnelles des différents tissus urbains est tout d'abord menée. Elle nous permet de connaître la densité des différentes aménités, leur distribution et leur niveau de hiérarchie. La combinaison de ces trois indicateurs permet la création de règles d'affectation des commerces, services et emplois selon le tissu urbain dans les villes archétypales. L'analyse des tissus urbains nous permet également de quantifier la densité de bâtiment de chaque maille de tissu. Dans un second temps, une analyse cartographique et statistique des structures urbaines permet de définir et de quantifier l'emprise spatiale des structures urbaines à modéliser ainsi que celles des différents tissus urbains qui les composent. Enfin, une analyse cartographique permet de définir l'organisation des réseaux de déplacement principaux. À partir de l'ensemble de ces éléments, il est maintenant possible de générer les trois villes archétypales qui constitueront nos terrains d'étude pour la suite de ce travail.

Chapitre 6

Génération de villes archétypales

Le chapitre précédent quantifie les différents modèles de structures de tissus urbains et de formes architecturales bâties. Ainsi, les caractéristiques fonctionnelles des tissus urbains, la densité de bâtiments des mailles, l'emprise spatiale des structures urbaines et leur composition en tissus urbains sont définies et quantifiées. À partir de l'ensemble de ces éléments, l'objectif de ce chapitre est maintenant de générer les trois villes archétypales aux trois échelles considérées. La première partie de ce chapitre présente les différentes étapes de cette génération, du cadre physique au cadre fonctionnel des villes archétypales. La seconde partie permet d'évaluer le réalisme de ces villes, par comparaison de différents temps d'accès avec des villes réelles.

6.1 Génération des villes archétypales

Dans cette section, l'objectif est de générer les trois villes archétypales aux différentes échelles et avec le niveau de résolution souhaité. Dans un premier temps, le cadre physique des villes est tout d'abord généré, puis dans un second temps les aménités fonctionnelles sont affectées à ce cadre.

6.1.1 Génération du cadre physique des villes archétypales

6.1.1.1 Les outils utilisés

Adobe Illustrator

Adobe Illustrator est un logiciel de dessin vectoriel, c'est-à-dire un programme spécialement conçu pour l'édition ou la création de graphisme vectoriel. Les dessins vectoriels sont organisés dans différents « *calques* », qui correspondent à des dossiers empilés permettant de gérer le contenu d'une illustration. Les données vectorielles produites peuvent être exportées dans différents formats et notamment en DWG (DraWinG) ou en DXF (Drawing eXchange Format), formats développés par Autocad pour permettre les échanges standard de plans. Ces formats permettent de stocker des données et métadonnées 2D et 3D, et sont gérés par les logiciels SIG (système d'information géographique).

Qgis

Un système d'information géographique ou SIG (en anglais, *geographic information system* ou GIS) est un système d'information conçu pour recueillir, stocker, traiter, analyser, gérer et présenter tous les types de données spatiales. Une caractéristique fondamentale des SIG est leur capacité à associer des informations (données non géographiques) à des lieux (données géographiques). Ils sont aujourd'hui largement utilisés par différentes disciplines, notamment pour de la cartographie, de la gestion de territoire ou encore pour des analyses spatiales. Il existe aujourd'hui de nombreux logiciels SIG et notamment Qgis. Ce logiciel se distingue par son caractère open source multi-plateforme (publié sous licence publique générale GNU (GPL)) et par sa communauté d'utilisateurs et de développeurs qui enrichissent ses capacités via le développement d'extensions, les plug-ins. Il prend également en charge un grand nombre de formats de données vectorielles et matricielles.

6.1.1.2 La méthode

Structures urbaines, tissus urbains et architectures bâties

Les villes archétypales et leur composition en tissus urbains sont tout d'abord dessinées dans un logiciel de création graphique vectorielle, Adobe Illustrator. Ces dessins respectent les proportions réelles et des métadonnées indiquent l'échelle (1 cm est équivalent à 1 km). Ces données sont ensuite importées dans Qgis, sous forme de données vectorielles. Pour chaque polygone de tissus urbains dessiné dans Illustrator, un

polygone vectoriel est ainsi créé. À l'aide de différents outils de Qgis, nous passons de polygones de tissus urbains à un maillage de cellules de 250 mètres. Cette transformation entraîne une légère modification des surfaces (et des parts) de chaque type de tissu urbain (Figure 6-1).

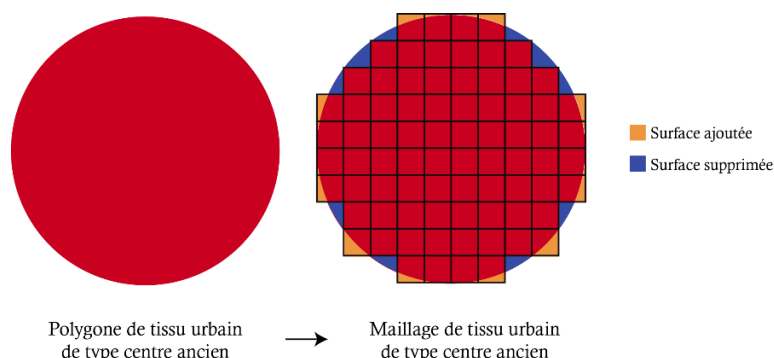


Figure 6-1 : Modification des surfaces par transformation d'un polygone en un maillage de cellules.

À ces différentes mailles de tissus urbains est affecté un type d'architecture bâtie. Cette affectation respecte les différentes proportions établies dans la partie 4.2.2.2. Ainsi, dans le tissu individuel dense par exemple, 50 % des mailles sont des maisons individuelles détachées, 50 % des maisons individuelles mitoyennes. Chaque maille générée dans Qgis est ainsi caractérisée par trois éléments qui sont son tissu urbain, sa structure urbaine et son architecture bâtie (Figure 6-2).

	id	Structure	Tissu	Architectu
1	1	Monocentrique...	5	10
2	2	Monocentrique...	5	9
3	3	Monocentrique...	5	10
4	4	Monocentrique...	5	10
5	5	Monocentrique...	5	9
6	6	Monocentrique...	5	9
7	7	Monocentrique...	5	9
8	8	Monocentrique...	5	9
9	9	Monocentrique...	5	9
10	10	Monocentrique...	5	9
11	11	Monocentrique...	5	9
12	12	Monocentrique...	5	10
13	13	Monocentrique...	5	9
14	14	Monocentrique...	5	9

Figure 6-2 : Table attributaire des mailles constituant les villes théoriques dans Qgis.

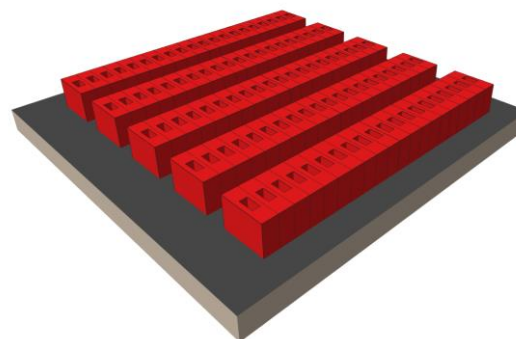
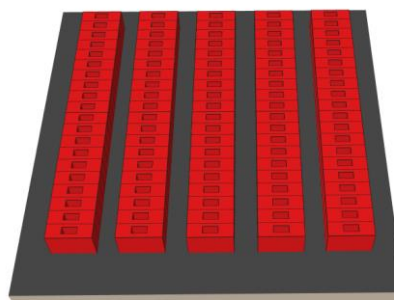
En parallèle de cette attribution, les architectures bâties sont également générées spatialement. Afin de modéliser les consommations énergétiques résidentielles, il est nécessaire de disposer de données vectorielles avec une résolution fine (voir partie 3.1.2.2). La plateforme de simulation CEA nécessite en effet en entrée un fichier de forme vectoriel contenant les bâtiments dont la consommation sera simulée. Une maille de chaque

forme architecturale est ainsi générée, en suivant la même méthode que celle des tissus urbains (dessin vectoriel importé dans Qgis). Le tableau suivant rappelle les principales caractéristiques des différentes architectures bâties et propose une représentation 3D obtenue grâce à l'extension Qgis2threejs²².

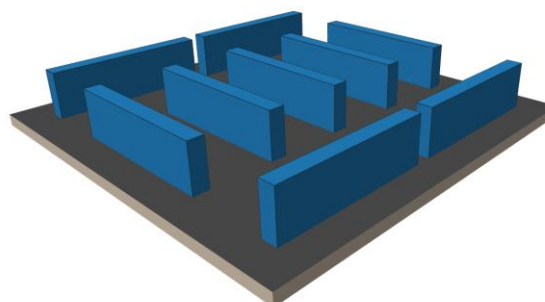
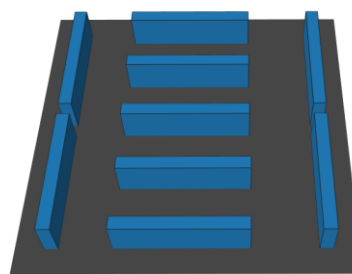
²² <https://plugins.qgis.org/plugins/Qgis2threejs/>

Forme 1 : grand collectif mitoyen ancien avec cour intérieure– Tissu centre urbain

Bâtiment	
Volumétrie	R+6
Nombre de logements	>10
Hauteur totale (m)	21
Volume (m ³)	5250
Surface au sol (m ²)	250
Longueur (côté rue) (m)	10
Largeur (m)	30
Surface de l'enveloppe (m ²)	1340
Compacité du bâti (surface de l'enveloppe / volume)	0,3
Taux de façade mitoyenne	75%
Surface passive (m ²)	64
Surface active (m ²)	186
Ratio surface passive / surface active	0,34
Maille	
Densité de bâtiments	0,4
Nombre de bâtiment par maille	100

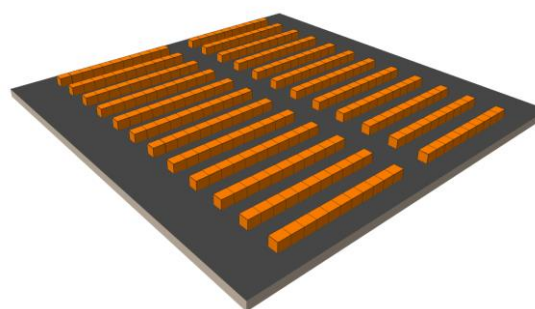
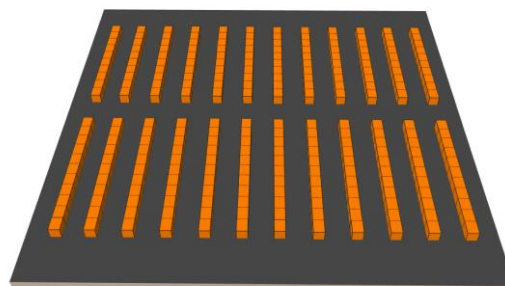

Forme 2 : Grand collectif isolé – Tissu collectif haut

Bâtiment	
Volumétrie	R+10
Nombre de logements	>10
Hauteur totale (m)	30
Volume (m ³)	30000
Surface au sol (m ²)	1000
Longueur (côté rue) (m)	100
Largeur (m)	10
Surface de l'enveloppe (m ²)	5300
Compacité du bâti (surface de l'enveloppe / volume)	0,2
Taux de façade mitoyenne	0%
Surface passive (m ²)	216
Surface active (m ²)	784
Ratio surface passive / surface active	0,28
Maille	
Densité de bâtiments	0,15
Nombre de bâtiment par maille	9



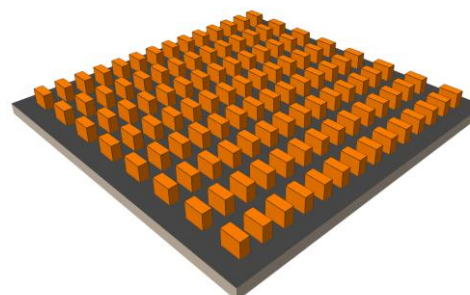
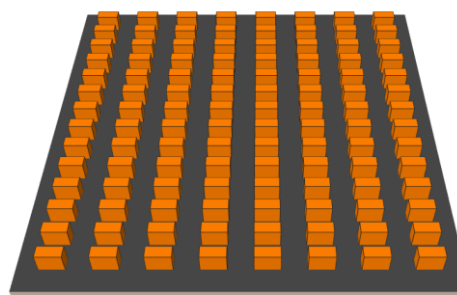
Forme 3 : Maison individuelle mitoyenne– Tissu mixte et dense

Bâtiment	
Volumétrie	R+1
Nombre de logements	1
Hauteur totale (m)	6
Volume (m ³)	288
Surface au sol (m ²)	48
Longueur (côté rue) (m)	8
Largeur (m)	6
Surface de l'enveloppe (m ²)	180
Compacité du bâti (surface de l'enveloppe / volume)	0,6
Taux de façade mitoyenne	43%
Surface passive (m ²)	20
Surface active (m ²)	28
Ratio surface passive / surface active	0,71
Maille	
Densité de bâtiments	0,19
Nombre de bâtiment par maille	247



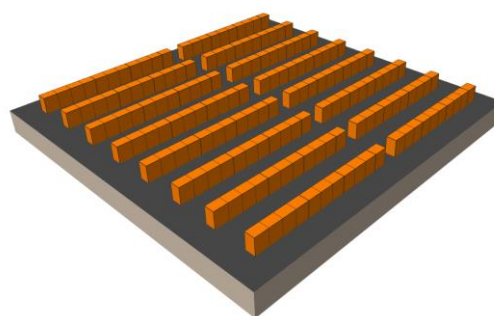
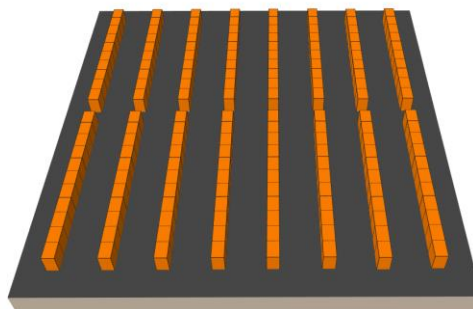
Forme 4 : petit collectif isolé (<10 logements) – Tissu mixte et dense

Bâtiment	
Volumétrie	R+3
Nombre de logements	< 10
Hauteur totale (m)	12
Volume (m ³)	1260
Surface au sol (m ²)	105
Longueur (côté rue) (m)	15
Largeur (m)	7
Surface de l'enveloppe (m ²)	474
Compacité du bâti (surface de l'enveloppe / volume)	0,4
Taux de façade mitoyenne	0%
Surface passive (m ²)	40
Surface active (m ²)	65
Ratio surface passive / surface active	0,62
Maille	
Densité de bâtiments	0,19
Nombre de bâtiment par maille	113



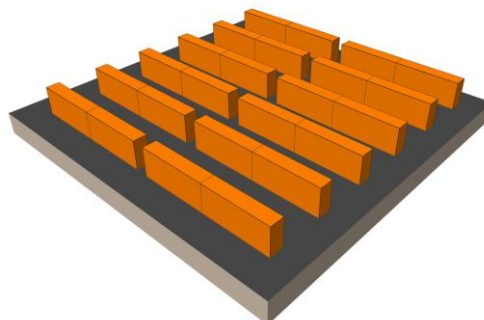
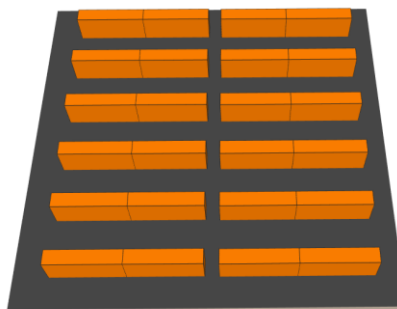
Forme 5 : petit collectif mitoyen (<10 logements) – Tissu mixte et dense

Bâtiment	
Volumétrie	R+3
Nombre de logements	<10
Hauteur totale (m)	12
Volume (m ³)	840
Surface au sol (m ²)	70
Longueur (côté rue) (m)	10
Largeur (m)	7
Surface de l'enveloppe (m ²)	344
Compacité du bâti (surface de l'enveloppe / volume)	0,4
Taux de façade mitoyenne	41%
Surface passive (m ²)	30
Surface active (m ²)	40
Ratio surface passive / surface active	0,75
Maille	
Densité de bâtiments	0,19
Nombre de bâtiment par maille	170



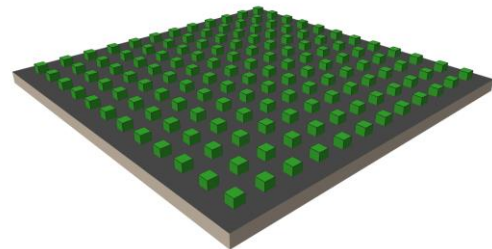
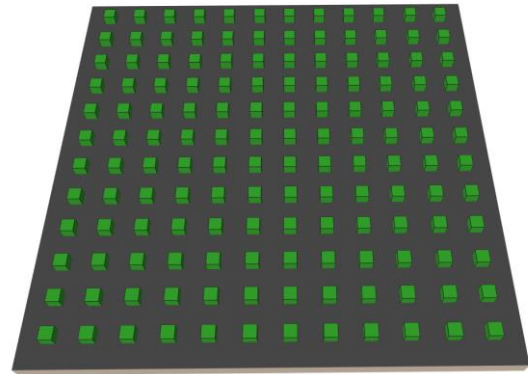
Forme 6 : grand collectif mitoyen (>10 logements) – Tissu mixte et dense

Bâtiment	
Volumétrie	R+6
Nombre de logements	> 10
Hauteur totale (m)	21
Volume (m ³)	10500
Surface au sol (m ²)	500
Longueur (côté rue) (m)	50
Largeur (m)	10
Surface de l'enveloppe (m ²)	2260
Compacité du bâti (surface de l'enveloppe / volume)	0,2
Taux de façade mitoyenne	8%
Surface passive (m ²)	108
Surface active (m ²)	392
Ratio surface passive / surface active	0,28
Maille	
Densité de bâtiments	0,19
Nombre de bâtiment par maille	24



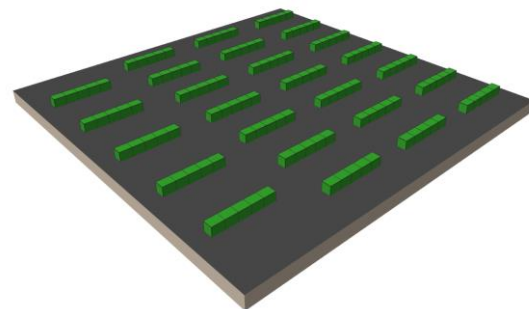
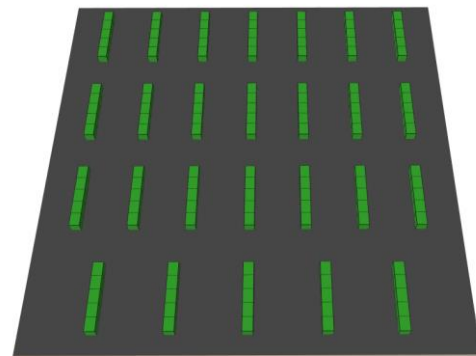
Forme 7 : Maison individuelle détachée – Tissu individuel dense

Bâtiment	
Volumétrie	R+1
Nombre de logements	1
Hauteur totale (m)	6
Volume (m ³)	294
Surface au sol (m ²)	49
Longueur (côté rue) (m)	7
Largeur (m)	7
Surface de l'enveloppe (m ²)	182
Compacité du bâti (surface de l'enveloppe / volume)	0,6
Taux de façade mitoyenne	0%
Surface passive (m ²)	24
Surface active (m ²)	25
Ratio surface passive / surface active	0,96
Maille	
Densité de bâtiments	0,10
Nombre de bâtiment par maille	128



Forme 8 : Maison individuelle mitoyenne – Tissu individuel dense

Bâtiment	
Volumétrie	R+1
Nombre de logements	1
Hauteur totale (m)	6
Volume (m ³)	288
Surface au sol (m ²)	48
Longueur (côté rue) (m)	8
Largeur (m)	6
Surface de l'enveloppe (m ²)	180
Compacité du bâti (surface de l'enveloppe / volume)	0,6
Taux de façade mitoyenne	43%
Surface passive (m ²)	20
Surface active (m ²)	28
Ratio surface passive / surface active	0,71
Maille	
Densité de bâtiments	0,10
Nombre de bâtiment par maille	130



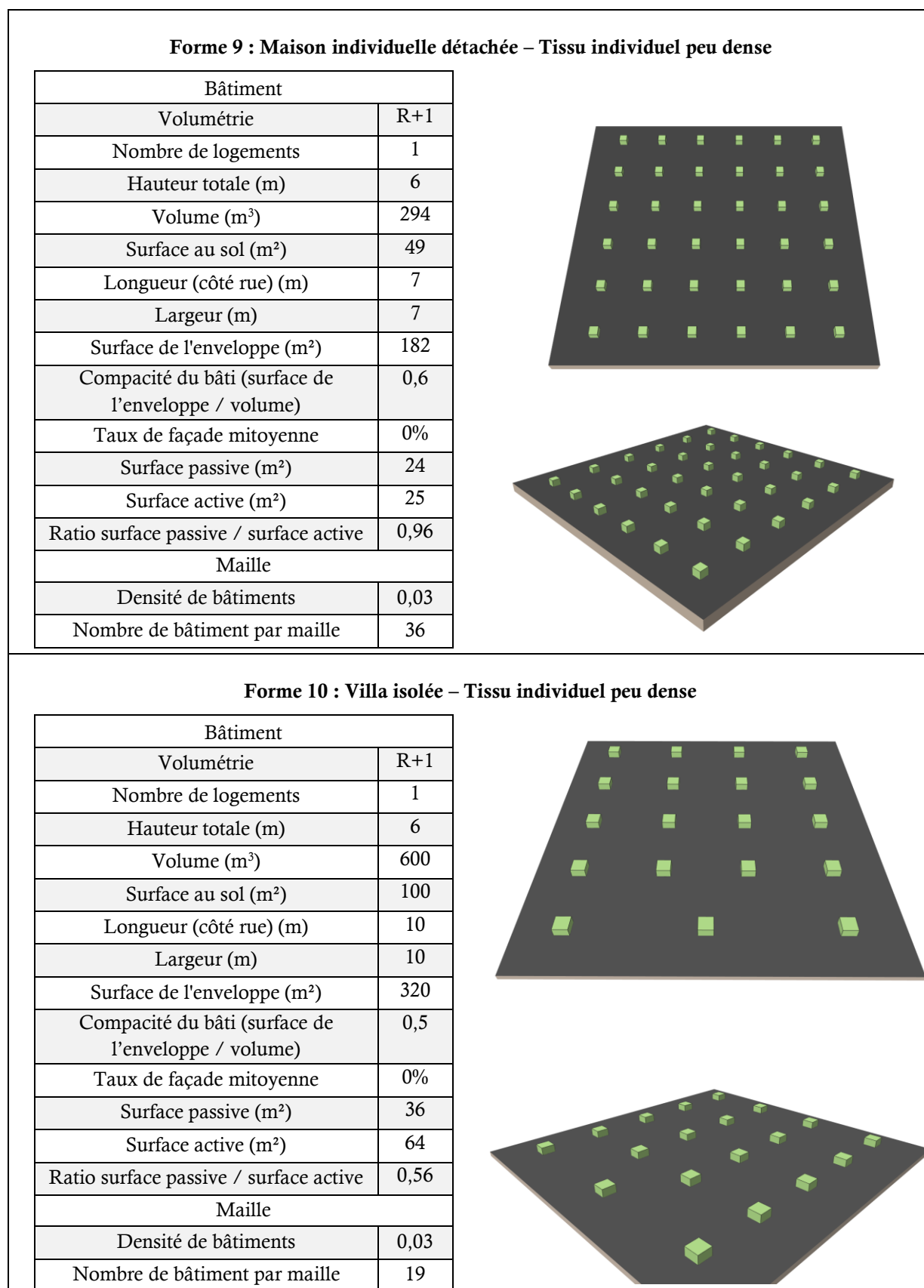


Figure 6-3 : Caractéristiques principales et représentations 3D des différentes mailles d'architectures bâties générées.

Les réseaux de transports

La génération du réseau routier principal suit la même méthode que celle des structures urbaines et des tissus urbains. Il est tout d’abord dessiné avec Adobe Illustrator avant d’être importé dans Qgis. Le réseau routier secondaire est généré directement dans Qgis, par la création d’une grille de 250 mètres de résolution calée sur le maillage en tissus urbains des villes. Afin de pouvoir par la suite simuler les pratiques de mobilités quotidiennes, il est ensuite nécessaire d’attribuer des vitesses de circulation à ces différents axes de déplacements. Quatre modes différents sont modélisés avec la plateforme de simulation Mobisim (voir partie 3.3.1.2), la marche à pied, le vélo, les transports collectifs et la voiture. Le réseau peut être utilisé indifféremment par tous les modes, seules les autoroutes (Niveau 1) sont exclusivement dédiées aux voitures. Pour l’attribution des vitesses, nous distinguons les axes principaux par leur niveau d’importance mais également par leur localisation (dans une zone urbanisée ou non). Les axes routiers secondaires (grille de 250 mètres de résolution) sont décomposés en cinq catégories, selon le type de tissu urbain dans lequel ils sont situés. Les vitesses routières automobiles sont établies au regard du travail de Hilal (2010), qui propose une base routière codifiée avec des vitesses standardisées. Pour les transports collectifs, un coefficient de réduction de 0,25 est affecté aux vitesses routières automobiles (Tableau 6-1). Pour la marche à pied et le vélo, des vitesses uniques sont choisies, de respectivement 4 km/h et 17 km/h.

Environnement	Type de voie	Niveau	Vitesse (km/h)	
			Voiture	TC
Zones non urbanisées	Principal	1 - Autoroutes	130	NC
		2 - Régionales	85	64
		3 - Locales	70	53
Zones urbanisées	Principal	2 – Régionales urbaines	60	49
		3 – Locales urbaines	45	34
		4 – Desserte urbaine	35	26
	Secondaire (maillage)	Centre urbain	10	8
		Mixte et dense	15	11
		Collectif haut	20	15
		Individuel dense	20	19
		Individuel peu dense	25	15
		Activités	25	19

Tableau 6-1 : Vitesses de circulation selon l’environnement géographique et le type de voie (d’après Hilal, 2010).

6.1.1.3 Les villes archétypales générées

La figure suivante représente les trois villes archétypales générées dans Qgis, avec leurs différentes compositions en tissus urbains (nombre de cellules et surfaces) (Figure 6-4). La ville monocentrique périurbaine archétypale compte 4150 mailles de 250 mètres de résolution, soit une surface totale bâtie de 259 km². 2 % de cette surface est de type centre urbain, 5 % de type mixte et dense, 3 % de type collectif haut, 20 % de type individuel dense et 63 % de type individuel peu dense. Enfin, les zones d’activités représentent également 7 % du territoire. La ville monocentrique axialisée archétypale compte 4590 mailles soit une surface totale bâtie de 287 km². Elle présente globalement la même répartition en tissu urbain que la ville archétypale

monocentrique périurbaine mais présente cependant une part plus importante de maille de tissus individuel peu dense (54 %), au détriment des mailles de tissu individuel dense (27 %). Enfin, la ville polycentrique hiérarchisée se démarque par des parts quasi similaires des mailles de tissu individuel dense (38 %) et individuel peu dense (32 %), ainsi que par une forte représentation du tissu mixte et dense (7 %).

	Monocentrique périurbaine		
	Centre urbain	Nombre de cellules	78
		Surface (km ²)	5
		%	2%
	Mixte et dense	Nombre de cellules	228
		Surface (km ²)	14
		%	5%
	Collectif discontinu haut	Nombre de cellules	112
		Surface (km ²)	7
		%	3%
Individuel dense	Nombre de cellules	824	
	Surface (km ²)	52	
	%	20%	
Individuel peu dense	Nombre de cellules	2632	
	Surface (km ²)	165	
	%	63%	
Activités	Nombre de cellules	276	
	Surface (km ²)	17	
	%	7%	
Total	Nombre de cellules	4150	
	Surface (km ²)	259	
	%	100%	
	Monocentrique axialisée		
	Centre urbain	Nombre de cellules	79
		Surface (km ²)	5
		%	2%
	Mixte et dense	Nombre de cellules	342
		Surface (km ²)	21
		%	7%
	Collectif discontinu haut	Nombre de cellules	112
		Surface (km ²)	7
		%	2%
Individuel dense	Nombre de cellules	1236	
	Surface (km ²)	77	
	%	27%	
Individuel peu dense	Nombre de cellules	2499	
	Surface (km ²)	156	
	%	54%	
Activités	Nombre de cellules	322	
	Surface (km ²)	20	
	%	7%	
Total	Nombre de cellules	4590	
	Surface (km ²)	287	
	%	100%	

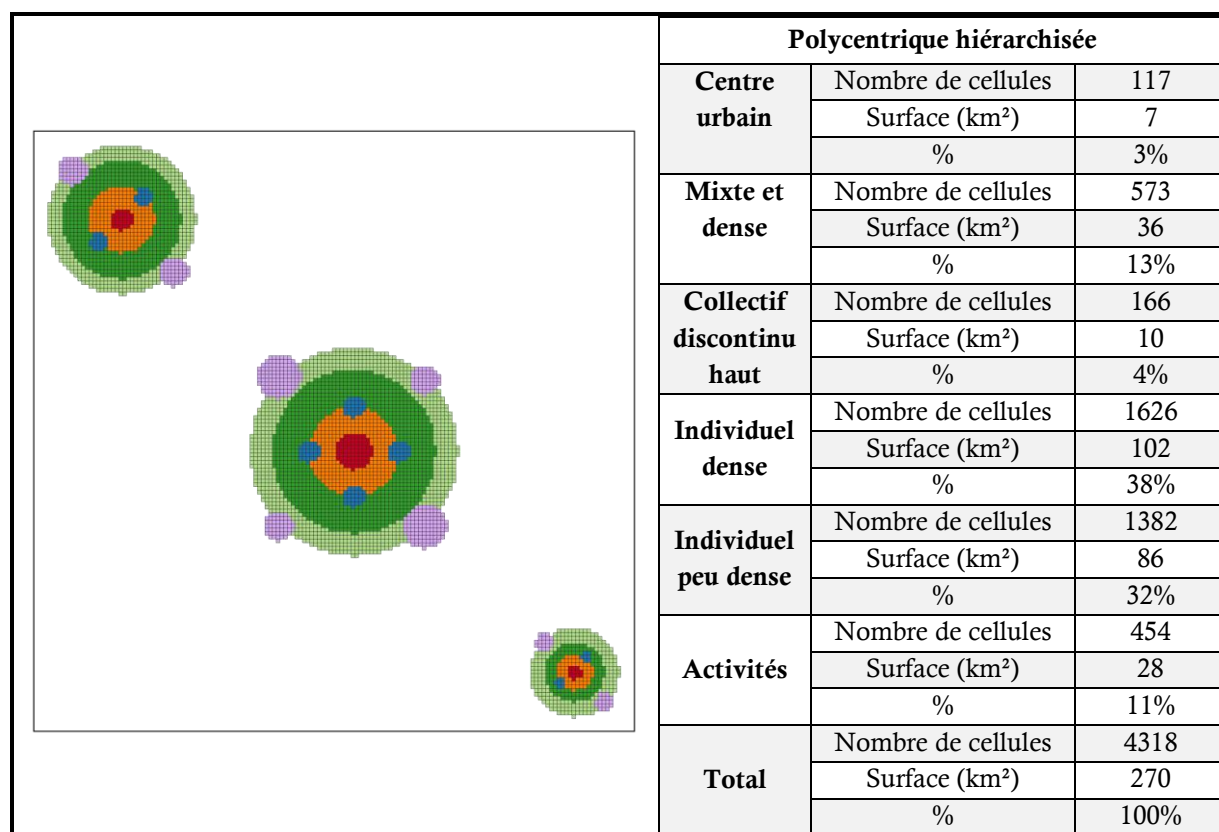


Figure 6-4 : Les trois villes archétypales générées et leur composition en mailles de tissus urbains.

Les réseaux de transports

La ville archétypale monocentrique périurbaine présente le réseau principal de desserte locale le plus important. Il est ainsi d'environ 350 km en zone urbanisée et de 172 km en zone urbanisée, représentant au total 11 % des réseaux de la ville. Le nombre important de noyaux isolés ainsi que leur répartition sur l'ensemble de l'agglomération explique cette longueur élevée. C'est ainsi la ville archétypale qui présente le réseau le plus important, toutes catégories confondues avec près de 4860 km d'axes de transports. La ville polycentrique axialisée présente le réseau de déplacement le plus court avec seulement 3201 km d'axes. À l'inverse de la ville monocentrique périurbaine, cette ville présente un réseau principal de desserte locale très court avec seulement 37 km de réseau. Cela s'explique par l'absence de noyaux isolés sur ce territoire. Le réseau de desserte régionale urbain est par contre le plus développé des trois villes, du fait de la présence de trois pôles urbains sur le territoire. De par sa méthode de construction (maillage régulier autour des cellules de tissus urbains), le réseau secondaire traduit la composition en tissus urbains des différentes villes. Les longueurs de réseaux générés sont présentées dans le tableau suivant (Tableau 6-2).

Environnement	Type de voie	Niveau	Monocentrique périurbaine		Monocentrique axialisée		Polycentrique hiérarchisée	
			Longueur (km)	%	Longueur (km)	%	Longueur (km)	%
Zones non urbanisées	Principal	1- Autoroutes	72,5	1%	48	1%	65,5	2%
		2 – Desserte régionale	33,2	1%	15,6	0%	23,9	1%
		3 – Desserte métropolitaine	352,1	7%	83,5	2%	0	0%
Zones urbanisées	Principal	Niveau 2 – Desserte régionale	25,1	1%	17,3	1%	63,6	2%
		Niveau 3 – Desserte métropolitaine	53,7	1%	45	1%	34,7	1%
		Niveau 4 – Desserte locale	172,2	4%	43,6	1%	37,1	1%
	Secondaire	Centre urbain	78	2%	54,4	2%	80,6	3%
		Mixte et dense	228	5%	235,7	7%	394,93	12%
		Collectif haut	112	2%	77,2	2%	114,4	4%
		Individuel dense	824	17%	851,8	25%	1120,7	35%
		Individuel peu dense	2632	54%	1722,1	50%	952,4	30%
		Activités	276	6%	221,9	6%	312,9	10%
		Total	4859	100%	3416	100%	3201	100%

Tableau 6-2 : Les réseaux de transports générés dans les villes archétypales.

6.1.2 Génération du cadre fonctionnel des villes archétypales

6.1.2.1 La localisation des aménités

La création de règles simplifiées de localisation des aménités

Dans la partie 5.2.1 nous avons identifié les caractéristiques fonctionnelles des différents tissus urbains dans les villes réelles. Concernant les aménités de type « *quotidien enseignement* », nous avons calculé un unique indicateur de densité d'aménité par maille. Nous utilisons ces valeurs moyennes de densité pour localiser les équipements de ce type dans les villes théoriques. Leur répartition est ainsi uniforme au sein des tissus urbains. Concernant les emplois, nous utilisons les différentes valeurs de densité et de distribution produites par l'analyse des villes réelles, ainsi que la courbe de distribution correspondante (indicateur de hiérarchie). Concernant les autres commerces et services, afin de produire des règles simples d'affectation des aménités, nous substituons aux valeurs de densité réelles une valeur moyenne de densité pour chaque classe, qui correspond à la moyenne des valeurs de densité des aménités appartenant à cette classe (tout tissu confondu). Le même procédé est appliqué pour les valeurs de distribution. Les valeurs moyennes affectées aux différentes classes sont présentées dans le tableau suivant (Tableau 6-3).

Densité	Très peu dense	Peu dense	Dense	Très dense
		0,04	0,38	1,67
Distribution	Très dispersé	Dispersé	Concentré	Très concentré
	0,11	0,61	0,87	0,98

Tableau 6-3 : Les valeurs moyennes de densité et de diversité affectées à chaque classe.

Les règles de localisation obtenues sont présentées dans la figure suivante (Figure 6-5).

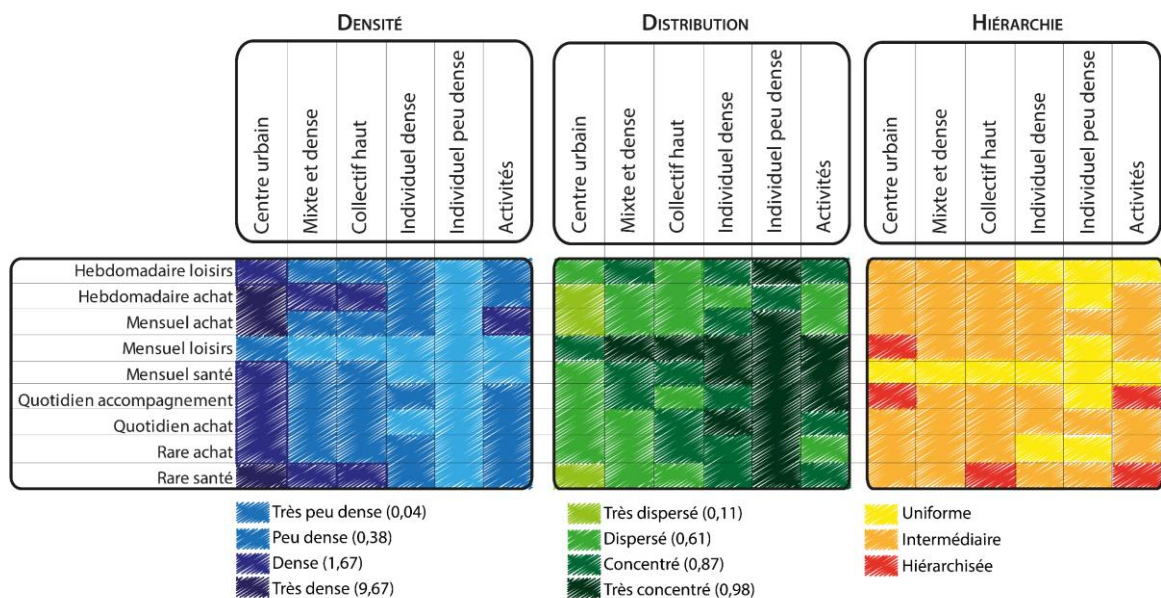


Figure 6-5 : Les règles de localisation des différentes aménités dans les villes théoriques.

Par exemple, dans le centre urbain, les mailles contiendront en moyenne 1,67 aménité de type « *quotidien accompagnement* » et ces aménités seront réparties dans 39 % des mailles avec une hiérarchie intermédiaire.

La localisation des aménités

La ventilation des commerces, services et emplois (équipements) dans les mailles de tissus urbains est réalisée à l'aide de Qgis et d'une routine d'automatisation en SQL. Cette ventilation se déroule en trois étapes successives qui utilisent les règles de construction précédemment construites :

- La création d'un « *réservoir* » d'équipements de chaque catégorie en fonction du nombre de mailles de chaque type de tissu et de l'indicateur de densité ;
- La sélection aléatoire des mailles contenant au moins un équipement (indicateur de distribution) ;
- La répartition au sein de ces mailles des équipements du « *réservoir* » (indicateur de hiérarchie).

Cette méthode de ventilation des équipements est en partie aléatoire et il est donc nécessaire de la réaliser plusieurs fois afin de vérifier qu'il n'existe pas de différences majeures entre les différents résultats obtenus. Dix ventilations des équipements pour les trois villes archétypales ont ici été réalisées. Deux méthodes sont utilisées pour vérifier les écarts entre ventilation, avec tout d'abord une méthode graphique (distribution

directionnelle) puis une méthode numérique (distance standard), appliquées dans Qgis. La méthode de distribution directionnelle crée des ellipses de l'écart type de chaque ventilation permettant de récapituler les caractéristiques spatiales d'entités géographiques (tendance centrale, dispersion et tendance directionnelle). L'écart type permet en effet de mesurer la dispersion autour de la moyenne statistique. Si les ellipses sont parfaitement superposées, cela signifie que les dix ventilations sont très similaires. Au contraire, si les ellipses ne sont pas bien superposées, cela signifie qu'il existe des écarts entre les dix ventilations. Dans la figure explicative suivante (Figure 6-6), les deux ventilations ont une tendance centrale et une dispersion globalement similaire mais une tendance directionnelle différente.

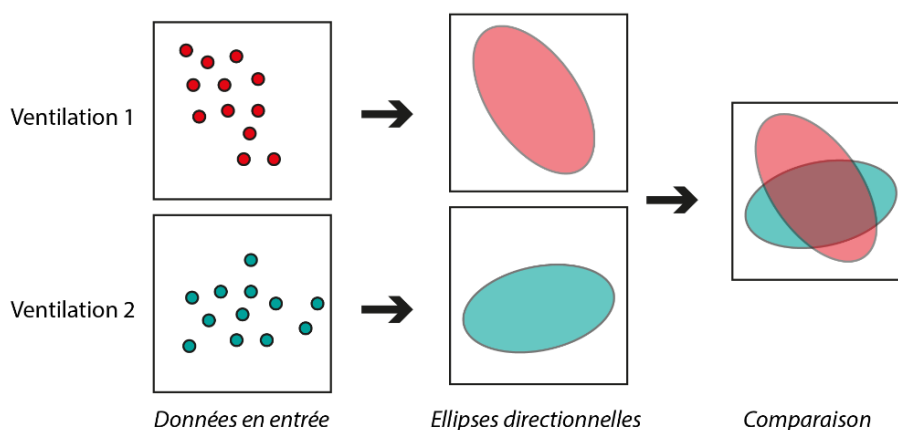


Figure 6-6 : Méthode de distribution directionnelle.

Ces ellipses sont ici pondérées en fonction du nombre d'équipements et sont construites pour chaque type de tissu urbain et chaque type d'équipement. La seconde méthode est le calcul de la distance standard, qui mesure le degré de dispersion ou de concentration des entités autour du centre moyen géométrique. Plus les écarts entre distances standards seront importants, plus les ventilations seront différentes et inversement.

Sélection d'une ventilation unique

Pour les trois villes archétypales, l'observation des ellipses directionnelles et des valeurs de distances standards pour chaque ville nous indique plusieurs éléments :

- Globalement, les ventilations des aménités par tissu urbain présentent une forte similarité. Les ellipses directionnelles sont en effet très similaires, dans leurs formes comme dans leurs tailles, et les valeurs de distances standards sont très proches. À titre d'exemple, les distances standards des ventilations d'aménités de type « *quotidien accompagnement* » dans le centre urbain sont toutes comprises entre 805 et 945 mètres.
- Les ventilations des équipements de type « *mensuel loisirs* », « *rare santé* » et « *mensuel santé* » présentent les plus fortes variations, notamment pour les tissus urbains mixte et dense et collectif haut. Cela s'explique par le faible nombre d'équipements de ce type et par leur concentration élevée.

La figure et le tableau suivants correspondent aux ellipses directionnelles et aux distances standards de la ville monocentrique périurbaine (Figure 6-7 et Tableau 6-4). Les écarts entre ventilations étant globalement faibles,

nous sélectionnons une ventilation unique d'aménités pour chaque ville. Cette ventilation correspond à la ventilation ayant le plus faible écart avec la valeur moyenne des distances standards des dix ventilations. Pour les aménités de type « *quotidien accompagnement* » dans le centre urbain par exemple, la valeur moyenne des distances standards est de 853 mètres, et nous sélectionnons donc la ventilation 5 qui présente la distance standard la plus proche de cette valeur moyenne (856 mètres). La comparaison graphique des ellipses directionnelles ainsi que le tableau de comparaison des distances standards est disponible en Annexe 8 et Annexe 10 pour les villes monocentriques axialisées et en Annexe 9 et Annexe 11 pour les villes polycentriques hiérarchisées. La sélection d'une ventilation unique s'effectue sur le même principe dans ces deux autres villes archétypales.

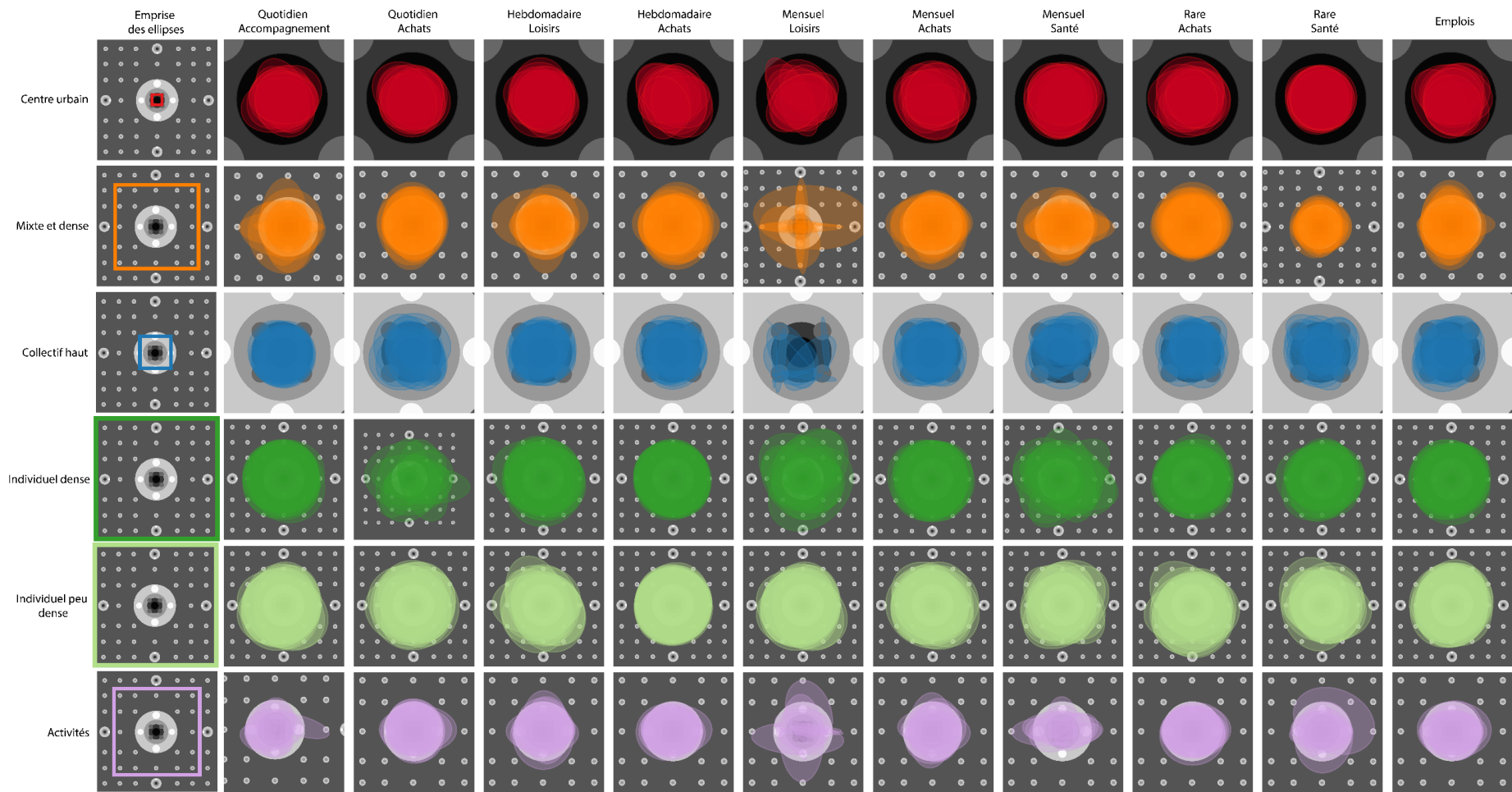


Figure 6-7 : Ellipses directionnelles des ventilations des différents équipements dans la ville archétypale monocentrique périurbaine.

	Quotidien Accomp.	Quotidien Achats	Hebdo. Loisirs	Hebdo. Achats	Mensuel Loisirs	Mensuel Achats	Mensuel Santé	Rare Achats	Rare Santé	Emplois	
Centre urbain	1	826	826	789	852	863	908	872	861	776	869
	2	888	869	932	828	874	954	827	877	912	881
	3	825	867	817	820	834	880	867	865	907	834
	4	816	823	846	907	898	874	861	915	847	880
	5	856	911	849	734	817	887	886	822	852	851
	6	879	894	854	635	888	891	830	812	923	866
	7	832	881	816	798	909	915	858	843	849	915
	8	945	823	892	850	730	986	876	856	897	889
	9	805	848	863	811	817	881	864	883	827	848
	10	862	908	701	824	850	928	833	896	845	899
Mixte et dense	1	7015	7469	8887	9745	8498	7166	8044	8327	8353	8692
	2	6008	6572	8546	7126	6889	6952	5728	7273	7825	8429
	3	7305	6413	6978	1817	8115	6909	5634	7664	7065	8147
	4	7522	7015	7970	6622	8531	5092	6122	7160	7540	9056
	5	8243	6977	8919	6609	7545	7631	8510	8954	7496	8299
	6	7503	5727	7881	10808	5205	6863	5567	6702	8475	8820
	7	8992	9507	8286	6878	8559	7479	8104	8117	8110	7227
	8	7458	6816	7017	14722	7090	8002	7108	7627	8156	6790
	9	7290	6257	7282	7020	7377	7008	7351	7200	7881	7328
	10	6743	7509	7934	6801	6985	9228	8318	8271	8914	6519
Collectif haut	1	2475	2467	2402	1878	2598	2165	2593	2623	2581	2254
	2	2574	2434	2624	1339	2500	2168	2504	2401	2459	2432
	3	2377	2497	2502	1637	2459	2104	2532	2459	2437	2302
	4	2491	2608	2463	2192	2656	2276	2528	2418	2342	2271
	5	2571	2570	2437	2339	2511	2510	2479	2215	2464	2480
	6	2274	2498	2506	2357	2431	2335	2381	2534	2616	2503
	7	2305	2509	2504	1550	2429	2256	2474	2372	2403	2334
	8	2313	2482	2532	1624	2446	2303	2540	2560	2545	2449
	9	2541	2347	2502	527	2516	2540	2528	2536	2320	2358
	10	2391	2494	2451	2170	2571	2310	2470	2570	2306	2511
Individuel dense	1	11880	12249	12545	12035	13069	12537	12800	12695	13524	12077
	2	11950	12287	12667	13564	13749	10885	13136	13154	11843	11846
	3	11841	12056	12136	11833	12466	13208	12797	12385	13296	12217
	4	11848	12624	12724	12118	13365	12467	12025	14086	12278	12306
	5	12682	12569	12522	12976	13111	11950	12951	12475	13387	12304
	6	12012	11480	12455	13121	12284	11278	12626	12642	13590	9332
	7	11587	12781	12544	14075	11958	11702	12794	13625	12349	12623
	8	11999	12737	12677	12186	13020	13933	12530	11698	13321	12117
	9	11565	13141	12791	12405	12561	13057	14001	13123	13106	12237
	10	13549	11796	12765	11363	12790	12374	13433	12297	11260	11764
Individuel peu dense	1	12590	12850	12572	12613	12303	12955	11964	11830	12177	10613
	2	13243	12776	12043	8231	11623	13969	11915	12209	11925	11851
	3	12290	12633	11669	7512	12885	9808	12419	12788	12455	12870
	4	13027	12350	11887	11380	11962	11032	12163	12784	11138	11435
	5	12666	12289	12420	10277	11815	13932	13297	11274	12271	11285
	6	12733	10751	12325	13411	12126	10719	12646	6260	12293	11748
	7	12468	12997	12342	12524	12400	11692	12530	11180	12523	12019
	8	13599	13046	11754	9437	12422	12857	12231	11840	11694	12131
	9	12961	12298	12941	13892	13525	12151	11205	10798	12004	12303
	10	12759	13166	12303	12851	12568	12659	12475	15301	11081	12884
Activités	1	5457	6673	6188	5190	6303	4126	5060	6347	6768	5908
	2	6724	7522	7138	6624	7276	5061	5313	6531	6377	5194
	3	6355	6619	6206	3955	6112	4689	5497	6009	6099	8755
	4	7704	6352	6113	4917	5980	4887	5089	5925	7066	5280
	5	6446	6045	6647	5109	6209	4454	5284	6950	6524	5217
	6	5716	6122	6751	8105	5500	4805	5929	6567	6685	5689
	7	5540	7179	6238	4581	6547	7211	4640	5891	6487	5027
	8	5398	6546	6991	8101	6584	5092	5723	6228	6314	5707
	9	6720	5692	6596	4263	6278	5961	4038	7065	6527	5464
	10	5921	5594	6051	5069	6374	4324	4992	7065	7376	7615

* En hachurée : valeur ayant le plus faible écart avec la valeur moyenne des dix ventilations

Tableau 6-4 : Comparaison des distances standards (en mètres) de chaque ventilation par type de tissus et type d'équipements pour la ville monocentrique périurbaine.

6.1.2.2 Les résultats

Les trois villes archétypales générées ne possèdent pas le même nombre d'aménités, et celles-ci ne sont pas réparties de la même manière (Tableau 6-5). Un tableau détaillé par type de commerces et services est disponible en Annexe 12.

		Monocentrique axialisée		Monocentrique périurbaine		Polycentrique hiérarchisée	
		Commerces et services	Emplois	Commerces et services	Emplois	Commerces et services	Emplois
Centre urbain	Nombre	2981	20873	2944	20608	4416	30913
	%	28%	21%	33%	24%	30%	22%
Mixte et dense	Nombre	1936	16098	1290	10732	3243	26971
	%	18%	16%	14%	13%	22%	19%
Collectif haut	Nombre	634	16192	634	16192	940	23999
	%	6%	16%	7%	19%	6%	17%
Individuel dense	Nombre	2966	13021	1978	8681	3902	17130
	%	28%	13%	22%	10%	26%	12%
Individuel peu dense	Nombre	900	4852	948	5111	498	2683
	%	8%	5%	11%	6%	3%	2%
Activités	Nombre	1298	27140	1112	23263	1830	38266
	%	12%	28%	12%	28%	12%	27%
Total	Nombre	10 715	98 177	8 906	84 587	14 828	139 963

Tableau 6-5 : Répartition des aménités dans les villes théoriques en fonction des tissus urbains.

La ville polycentrique hiérarchisée présente le nombre le plus important d'aménités, avec 14 828 commerces et services et près de 140 000 emplois. Cela s'explique principalement par la composition en tissu urbain de cette ville. Les tissus centre urbain, mixte et dense, collectif haut discontinu et activités, qui présentent les plus grandes densités et la plus grande mixité d'usage occupent en effet une part plus importante dans cette ville. À l'inverse, la ville monocentrique périurbaine, qui présente une part moindre de tissus urbains denses et mixtes, a le nombre d'aménités le moins important, avec 8906 commerces et services et près de 85000 emplois. La ville monocentrique axialisée, dont la composition en tissus urbains denses et mixtes est intermédiaire à celles des deux autres villes, compte 10 715 commerces et services et plus de 98 000 emplois. Concernant la répartition des commerces et services au sein des villes, ils sont majoritairement localisés dans le centre urbain mais également dans le tissu individuel dense. Cela est particulièrement accentué dans la ville monocentrique périurbaine, où le centre urbain contient près d'un tiers (33 %) des commerces et services du territoire. Le centre urbain est en effet le tissu où la majorité des aménités présentent des règles d'affectation avec une densité « *intense* » ou « *très intense* ». Le tissu individuel dense présente des règles d'affectation avec des densités plus faibles, mais qui sont compensées par un nombre très important de maille

de ce type. À titre d'exemple, la ville monocentrique axialisée compte autant de commerces et services dans l'individuel dense que dans le centre urbain (28 % dans chaque tissu) car le tissu individuel dense représente 54 % de la surface bâtie de la ville. Enfin, les emplois sont localisés majoritairement dans le tissu d'activités, quelle que soit la ville considérée, avec des parts comprises entre 27 et 28 %. La cartographie par ville de la densité d'aménités nous permet de mieux visualiser la concentration des aménités dans les tissus centraux mais également dans celui d'activités (Figure 6-8 et Figure 6-9).

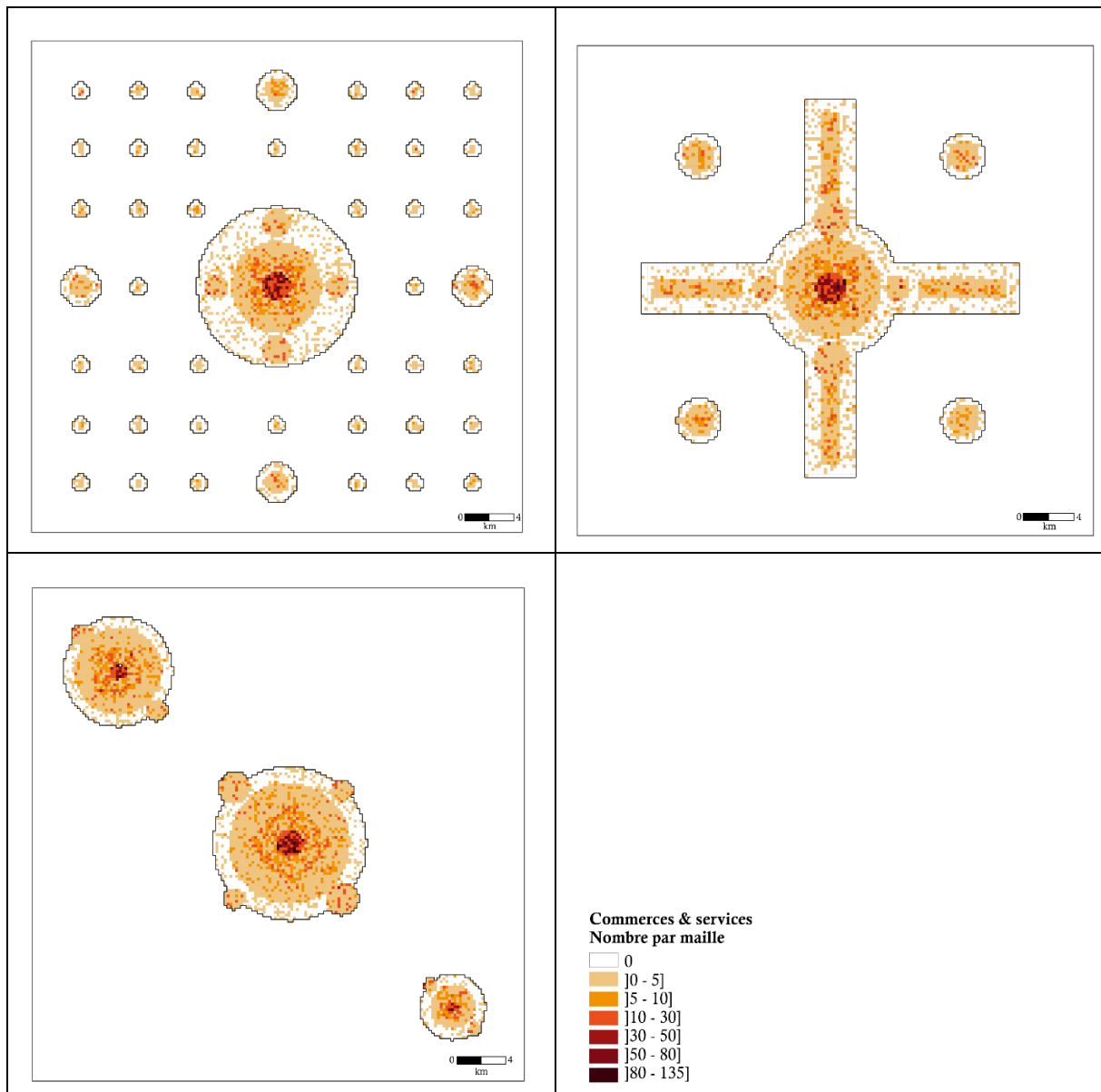


Figure 6-8 : Densité de commerces et services dans les trois villes archétypales.

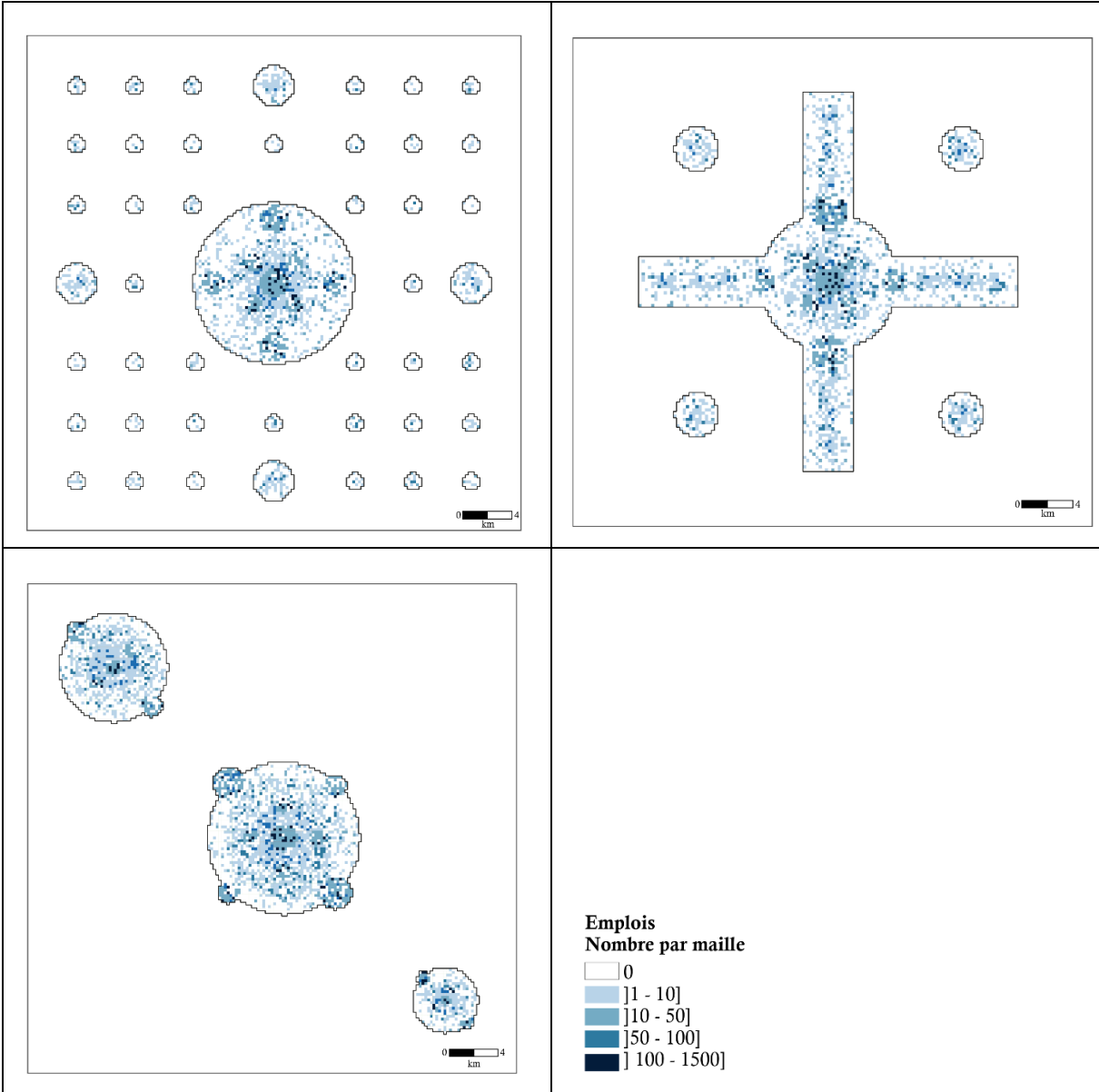


Figure 6-9 : Densité d’emplois dans les trois villes archétypales.

6.2 Évaluation des résultats : des villes réalistes ?

Dans la section précédente, nous avons généré trois villes archétypales. Nous souhaitons maintenant évaluer ces cadres théoriques. Pour cela, différents temps d'accès routiers sont calculés et comparés aux temps d'accès similaires calculés dans les neuf villes réelles. S'il est certain que des différences existent entre ces accessibilités de par les simplifications de nos modèles urbains, l'objectif est de vérifier que ces temps sont globalement comparables et donc réalistes.

6.2.1 Méthode et outil

Afin d'évaluer le réalisme des trois villes archétypales modélisées, nous utilisons une approche des réseaux des villes archétypales par leur configuration (voir partie 3.2.1.3). Ce niveau d'abstraction qui se concentre sur la topologie du réseau permet de rendre compte du service que les réseaux rendent en termes d'accessibilité. Dans une optique d'évaluation, nous souhaitons ainsi comparer différentes accessibilités. Cette notion d'accessibilité se définit comme étant « *la possibilité d'atteindre un lieu dans le but d'y effectuer une activité* » (L'Hostis & Conesa, 2010). La mesure d'accessibilité d'un lieu dépend de deux facteurs principaux qui sont la position dans l'espace de référence et la performance du réseau de transport (Vickerman, 1995). Cette performance dépend elle-même d'autres facteurs comme la structure géométrique du réseau et le type de voirie impactant la vitesse de déplacement. La première accessibilité étudiée ici est celle du centre-ville des agglomérations. La seconde accessibilité évaluée est celle des différentes aménités. Les temps d'accès sont calculés en minutes et correspondent aux trajets les plus rapides sur le réseau en voiture. Afin de réaliser ces différents calculs d'accessibilités, nous utilisons le logiciel Modaccess²³. Ce logiciel est développé au Laboratoire ThéMA à Besançon et est open source et distribué sous licence GPL. Le programme est développé en Java et fonctionne sur n'importe quel ordinateur supportant Java 8 ou plus (PC sous Linux, Windows, Mac...). En entrée du logiciel, il est nécessaire d'avoir une couche de points de départ au format shapefile, une couche de points d'arrivée, une couche de lignes correspondant au réseau avec des temps de parcours en minutes pour chacun des tronçons. Modaccess produit en sortie une matrice de temps origine-destination (Tableau 6-6).

²³ <https://sourcesup.renater.fr/www/modaccess/fr.html#intro>

Origine	Destination	Distance	Rang
1	1	4.29	1
17	1	5.15	2
2	1	8.59	3
3	1	9.02	4
18	1	9.02	5
33	1	9.45	6
4	1	9.40	7
19	1	9.55	8
34	1	9.45	9
49	1	9.88	10
...

Tableau 6-6 : Un exemple de matrice origine-destination produite par Modaccess.

Dans notre cas, la couche de points de départ correspond aux centroïdes des mailles ; les points d'arrivée correspondent soit aux centres des villes (mairie pour les villes réelles, centre géométrique pour les villes archétypales) soit aux centroïdes des mailles contenant des équipements. Enfin les réseaux correspondent aux réseaux routiers générés dans la partie 6.1 pour les villes théoriques et aux réseaux réels pour les autres villes. Dans ces neuf villes, nous utilisons les voies routières fournies dans les données de la BD Topo. Le niveau d'importance de la voirie est utilisé pour affecter des vitesses similaires à celles affectées dans les villes théoriques (Tableau 6-7).

Environnement	Nature	Importance (BD Topo)	Vitesse attribuée (km/h)
Non urbanisées	Principal	1	130
		2	85
		3	85
	Secondaire	4	70
Urbaines	Principal	1	65
		2	65
		3	45
		4	35
	Secondaire	Centre urbain	10
		Mixte et dense	15
		Collectif haut	20
		Individuel dense	20
		Individuel peu dense	25
		Activités	25

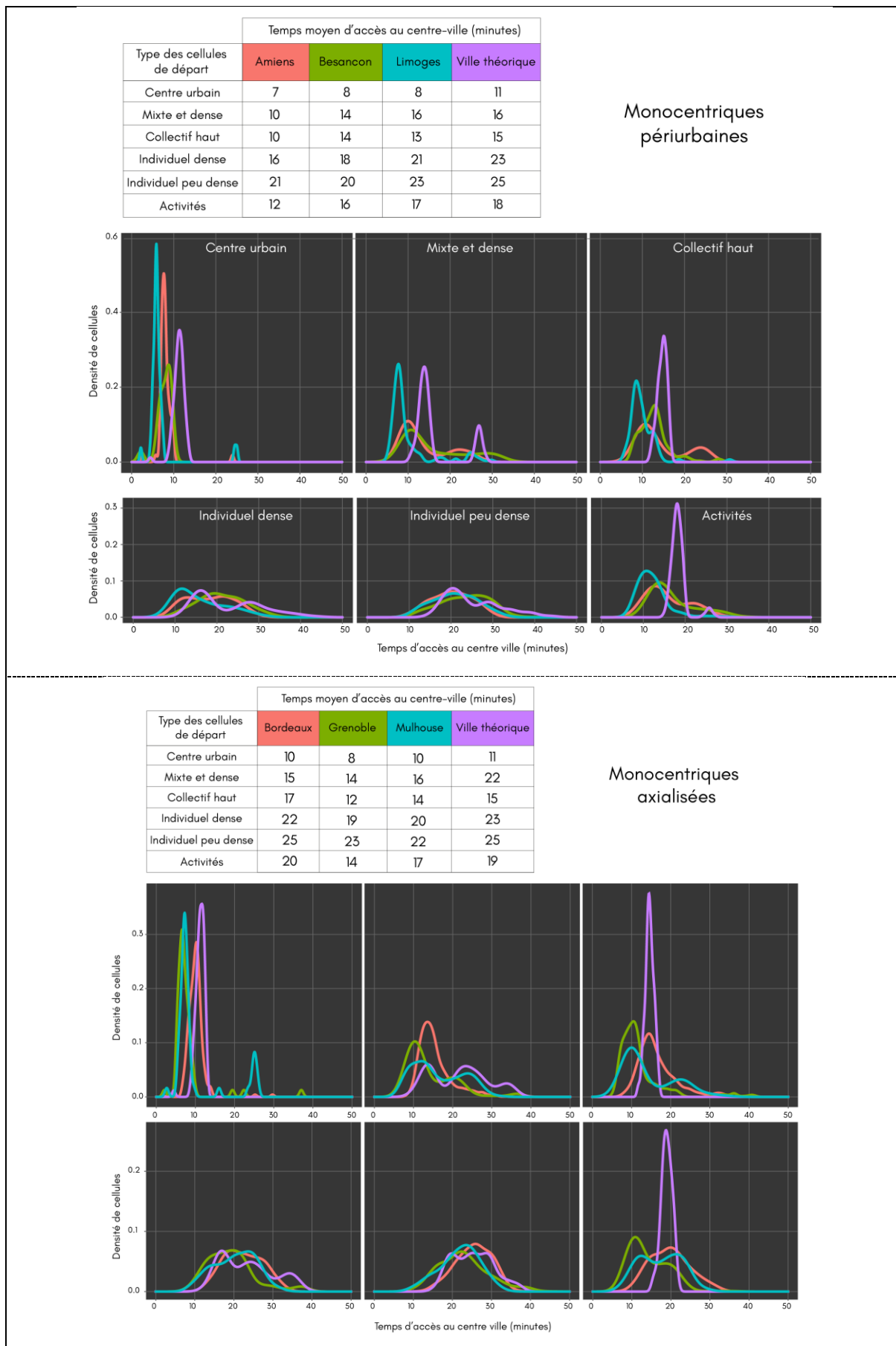
Tableau 6-7 : Les vitesses attribuées au réseau routier des villes réelles.

6.2.2 Les résultats

6.2.2.1 Accessibilité au centre-ville

L'analyse des graphiques et des tableaux suivants montre que les temps d'accès au centre-ville sont globalement plus longs dans les trois villes archétypales (Figure 6-10). Dans les deux villes monocentriques archétypales, ces temps d'accès sont compris entre 11 et 25 minutes en moyenne par tissu urbain. Si ces temps

sont plus élevés, ils restent cependant comparables à ceux des villes réelles, les écarts restant relativement faibles. L'ordre entre tissus est également conservé : les cellules du centre urbain présentent les temps d'accès les plus faibles ; les cellules du tissu mixte et dense, collectif haut et d'activités présentent des temps légèrement plus élevés ; et les tissus individuels ont les temps d'accès les plus longs. Les temps moyens d'accès au centre sont plus élevés pour la ville polycentrique hiérarchisée, compris entre 18 et 25 minutes et les écarts entre tissus sont plus faibles que dans les autres villes théoriques. Cela s'explique par la présence de plusieurs pôles urbains : un nombre important de mailles de centre urbain par exemple se trouvent loin du centre géométrique de l'agglomération étant localisées dans les pôles de niveaux 2 et 3.



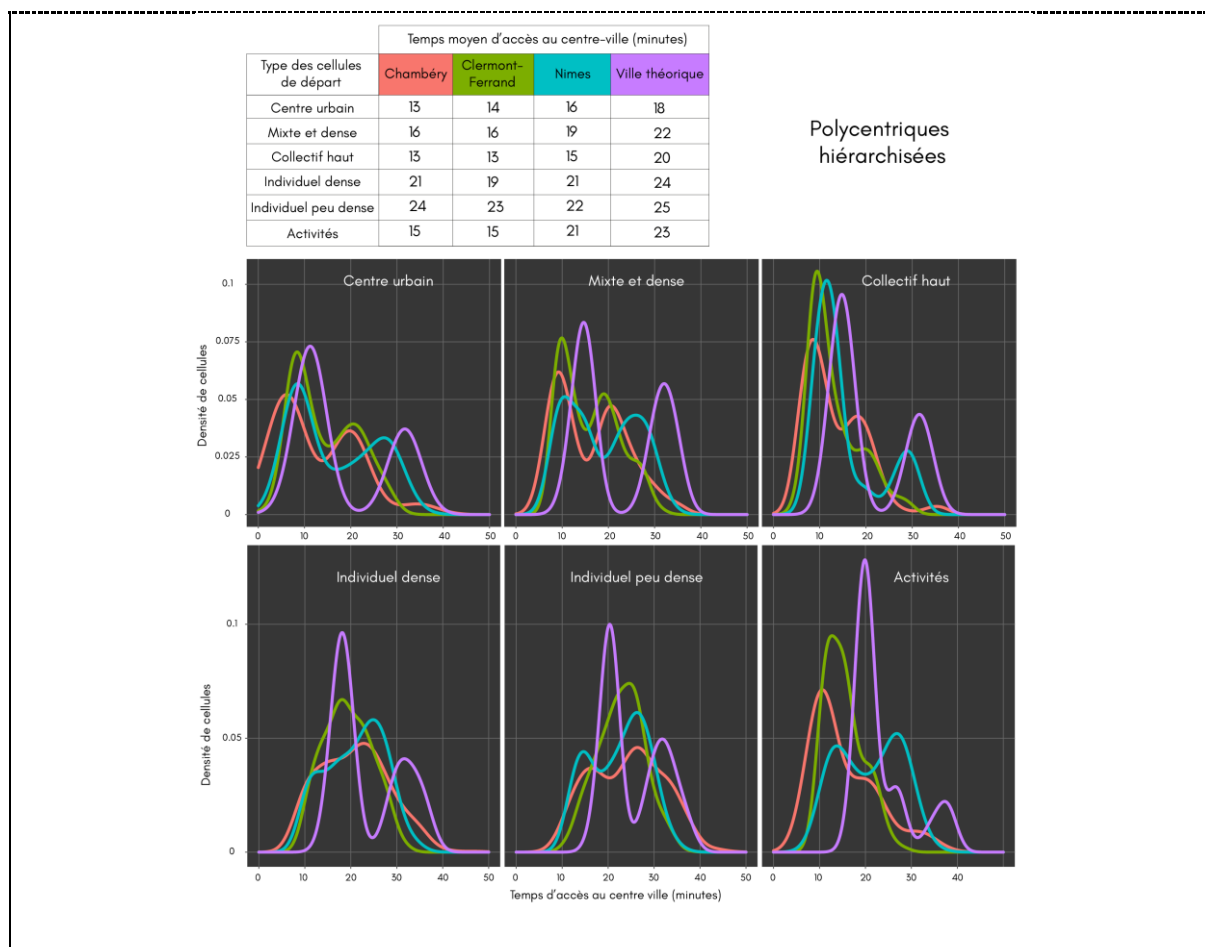


Figure 6-10 : Comparaison des temps d'accès au centre-ville dans les différentes structures urbaines.

6.2.2.2 Accessibilité aux commerces, services et emplois

Concernant les villes monocentriques périurbaines, les temps d'accès aux différentes aménités sont légèrement plus longs dans la ville archétypale que dans les villes réelles, avec un écart moyen entre les deux de 1,6 minute soit de 7 % (Tableau 6-8). Des différences apparaissent entre les tissus urbains. Le centre urbain présente les écarts de temps les plus importants, que ce soit pour l'accès aux commerces et services (4 minutes d'écart) ou pour l'accès aux emplois et lieux d'études (3 minutes d'écart). Ces différences sont plus faibles dans les autres tissus urbains et notamment dans le tissu individuel peu dense.

Concernant les villes monocentriques axialisées, les temps d'accès moyens aux différentes aménités sont globalement très similaires avec seulement 1 % d'écart moyen global entre la ville archétypale et les villes réelles (Tableau 6-9). Dans le détail, des disparités apparaissent entre tissus urbains. Le centre urbain est comme pour les villes monocentriques périurbaines le tissu qui présente les plus forts écarts entre villes réelles et ville théorique. Le tissu collectif haut est le tissu qui présente les plus faibles écarts (moins de 4 % de différence). Ce tissu et les trois autres tissus les moins centraux (individuel dense, peu dense et activités) sous-estiment tous légèrement ces temps d'accès (entre une et trois minutes de moins dans la ville archétypale).

Enfin, la ville archétypale polycentrique hiérarchisée présente un temps d'accès aux aménités moyen légèrement plus élevé que celui des villes réelles (22,5 minutes contre 24 minutes) (Tableau 6-10). Ces temps

sonst supérieurs à ceux observés pour les villes monocentriques. On observe une plus forte amplitude de temps d'accès dans les villes réelles que dans la ville théorique. Les écarts les plus importants concernent les tissus centre urbain et collectif haut (entre 12 et 16 % d'écart), tandis que les écarts les plus faibles concernent le tissu individuel dense (1 % d'écart).

De manière générale, la comparaison des temps d'accès moyens aux différentes aménités montre de très faibles différences entre les villes théoriques et les villes réelles. Nous constatons une légère surestimation des temps d'accès depuis le tissu centre urbain pour les trois villes théoriques. Les différences observées peuvent s'expliquer par la structure simplifiée et maillée du réseau. En effet, seul le réseau principal a été modélisé dans les espaces non urbanisés des villes archétypales. Le réseau secondaire, qui correspond aux axes routiers communaux par exemple dans les villes réelles, n'apparaît pas dans les villes archétypales, entraînant des possibles « détours » et un allongement des distances et temps de déplacements. Le recours à un réseau quadrillé comme réseau secondaire urbain dans les villes archétypales peut également expliquer les différences observées. Un tableau détaillé de la comparaison des temps d'accès aux différents types d'équipements pour chaque type de structure urbaine est disponible en Annexe 13, Annexe 14 et Annexe 15.

Aménités	Tissus urbains	Temps moyen trois villes réelles (minutes)	Temps ville archétypale (minutes)	Écart absolu (minutes)	Écart relatif (%)
Commerces et services	Centre urbain	15	19	4	23%
	Mixte et dense	18	20	2	10%
	Collectif haut	17	19	1	7%
	Individuel dense	22	23	2	8%
	Individuel peu dense	24	25	0	2%
	Activités	19	20	1	5%
Emplois et études	Centre urbain	17	20	3	20%
	Mixte et dense	19	21	2	9%
	Collectif haut	18	19	1	6%
	Individuel dense	22	24	1	6%
	Individuel peu dense	25	25	0	0%
	Activités	20	20	1	3%
Total		19,4	21,0	1,6	8%

Tableau 6-8 : Comparaison des temps d'accès aux aménités par tissus urbains dans les villes monocentriques périurbaines.

Aménités	Tissus urbains	Temps moyen trois villes réelles (minutes)	Temps ville archétypale (minutes)	Écart absolu (minutes)	Écart relatif (%)
Commerces et services	Centre urbain	17	20	3	20%
	Mixte et dense	20	22	2	12%
	Collectif haut	19	19	0	-2%
	Individuel dense	24	23	-1	-4%
	Individuel peu dense	26	24	-3	-10%
	Activités	21	19	-2	-10%
Emplois et études	Centre urbain	18	21	3	15%
	Mixte et dense	21	22	1	6%
	Collectif haut	21	20	-1	-4%
	Individuel dense	25	23	-2	-7%
	Individuel peu dense	27	24	-3	-12%
	Activités	22	19	-3	-13%
	Total	21,2	21,1	-0,1	-1%

Tableau 6-9 : Comparaison des temps d'accès aux aménités par tissus urbains dans les villes monocentriques axialisées.

Aménités	Tissus urbains	Temps moyen trois villes réelles (minutes)	Temps ville archétypale (minutes)	Écart absolu (minutes)	Écart relatif (%)
Commerces et services	Centre urbain	20	24	3	15%
	Mixte et dense	22	24	2	10%
	Collectif haut	20	23	3	16%
	Individuel dense	24	24	0	1%
	Individuel peu dense	27	26	-1	-5%
	Activités	21	24	2	10%
Emplois et études	Centre urbain	21	24	3	13%
	Mixte et dense	23	24	2	8%
	Collectif haut	21	23	3	12%
	Individuel dense	25	25	0	-1%
	Individuel peu dense	27	26	-2	-7%
	Activités	22	24	1	6%
	Total	22,5	24,0	1,5	7%

Tableau 6-10 : Comparaison des temps d'accès aux aménités par tissus urbains dans les villes polycentriques hiérarchisées.

6.3 Synthèse du chapitre 6

Dans ce chapitre nous avons généré trois villes archétypales, monocentrique périurbaine, monocentrique axialisée et polycentrique hiérarchisée. Le cadre physique de chacune de ces villes a tout d'abord été construit, formant un espace cellulaire de résolution 250 mètres. À chacune des mailles de cet espace est affecté un type de tissu urbain et une architecture bâtie. Afin de connecter les différents espaces des villes entre eux, des réseaux de transports ont également été générés. Ces réseaux sont caractérisés par différentes vitesses selon le mode de déplacements (voiture, transports collectifs, marche à pied et vélo) et selon leur importance. Différentes aménités ont ensuite été générées dans ces mailles, constituant le cadre fonctionnel des villes théoriques. Ces villes cellulaires constituent les terrains d'études pour la modélisation des consommations énergétiques liées aux mobilités quotidiennes. En parallèle, des mailles des différentes architectures bâties ont été générées avec une résolution au bâtiment, fournissant la base de la modélisation des consommations énergétiques résidentielles. Dans une seconde partie de ce chapitre, les villes archétypales générées ont été évaluées en fonction d'un critère d'accessibilité routière. Les temps d'accès en voiture à différents lieux ont été calculés pour les villes théoriques et pour les neuf villes réelles sélectionnées dans le chapitre précédent. Leur comparaison montre que les villes archétypales sont relativement proches des villes réelles du point de vue de leur accessibilité. Elles constituent donc des terrains d'études réalistes et disposent de l'ensemble des éléments nécessaires à la modélisation des consommations énergétiques individuelles.

Conclusion de la partie 2

Après la présentation du contexte, des principaux concepts mobilisés ainsi que le positionnement méthodologique de la recherche dans la première partie, cette deuxième partie a consisté à modéliser et à générer plusieurs villes archétypales qui constitueront les terrains d'études pour l'évaluation des consommations énergétiques individuelles dans la troisième partie.

En nous appuyant sur une analyse des modèles urbains existants dans la littérature, nous avons tout d'abord identifié et sélectionné des modèles urbains aux trois échelles de la forme urbaine, permettant de proposer un cadre conceptuel pour nos villes archétypales. Ces modèles de structures urbaines, de tissus urbains et d'architectures bâties sélectionnés présentent tous des caractéristiques variées et sont représentatifs des villes françaises. Nous avons ensuite montré l'intérêt d'analyser statistiquement et cartographiquement plusieurs villes réelles, nous permettant de préciser la définition des modèles urbains conceptuels en apportant notamment des éléments quantitatifs. Nous avons ainsi mis en place une méthode statistique d'identification des tissus urbains dans des villes réelles à partir d'indicateurs morphologiques. Cette méthode générique, qui constitue un bon compromis entre la quantité de données nécessaires et la pertinence morphologique, a permis d'apporter l'ensemble des éléments nécessaires à la génération des villes mais également les éléments nécessaires à la modélisation des consommations énergétiques. Nous avons notamment pu produire des règles d'affectation des aménités fonctionnelles en fonction des tissus urbains, éléments essentiels à une modélisation des consommations énergétiques liées aux mobilités quotidiennes. Ainsi, nous avons pu générer le cadre physique et fonctionnel de trois villes archétypales. Le réalisme de ces villes a également pu être vérifié par une comparaison des temps d'accès routiers à différents lieux.

Les trois villes archétypales constituent le socle sur lequel nous pourrions nous appuyer pour la suite de ce travail. Suite à cette génération de terrains d'études affranchis de spécificités locales, entièrement paramétrables, représentatifs des villes françaises et présentant des formes urbaines variées, la partie suivante proposera une modélisation des consommations énergétiques résidentielles et des consommations énergétiques liées aux mobilités quotidiennes. Nous pourrions ainsi tester les hypothèses émises dans le début de ce travail.

Troisième partie

Analyse statistique du lien entre forme urbaine et consommations énergétiques individuelles

Introduction de la partie 3

La forme urbaine est un des déterminants des consommations énergétiques individuelles, qu'elles concernent les mobilités quotidiennes ou le secteur résidentiel. Dans la deuxième partie, nous avons proposé un protocole méthodologique permettant de modéliser et de générer trois villes archétypales aux trois échelles de la forme urbaine considérées. Notre démarche s'est fondée sur le besoin de disposer de terrains d'étude entièrement paramétrables, représentatifs des villes françaises et présentant des formes urbaines variées. À présent, il s'agit de répondre aux questions posées au début de ce travail. Nous chercherons dans cette troisième partie à savoir quels sont les impacts de la forme urbaine (à toutes ses échelles) sur les consommations énergétiques des individus en incluant à la fois le secteur des transports et celui du bâtiment. Cette problématique est d'autant plus importante à aborder que nous avons souligné l'absence de consensus dans les recherches existantes.

Le chapitre 7 proposera une analyse statistique des déplacements de plusieurs grandes villes françaises. Cette approche exploratoire permettra d'acquérir une première compréhension des effets de la forme urbaine sur les pratiques de mobilités quotidiennes des individus. Nous proposerons ensuite dans le chapitre 8 une modélisation et une simulation des pratiques de mobilités quotidiennes à l'aide de Mobisim-Soft dans les trois villes archétypales. Les résultats des simulations seront analysés et permettront de répondre à plusieurs de nos sous-hypothèses, spécifiques aux mobilités quotidiennes. Enfin, le chapitre 9 proposera de simuler les consommations énergétiques résidentielles afin de mettre en évidence le rôle de la forme urbaine sur ces consommations. Nous croiserons également les résultats de ces simulations avec les résultats des simulations des mobilités quotidiennes, afin d'identifier des possibles effets de compensation entre ces consommations énergétiques.

Chapitre 7

Analyse préalable des déplacements quotidiens dans les grandes aires urbaines françaises

Dans le chapitre précédent, trois villes archétypales ont été modélisées et générées, constituant des territoires d'étude réalistes et adaptés à l'analyse des liens entre la forme urbaine et les consommations énergétiques. En effet, ces villes correspondent à des agglomérations françaises « *standardisées* », affranchies des spécificités territoriales, mais relativement réalistes ; elles disposent de l'ensemble des éléments nécessaires à une modélisation des consommations énergétiques individuelle ; elles présentent des formes urbaines variées à toutes les échelles identifiées ; et enfin elles sont entièrement paramétrables. Il est maintenant possible d'évaluer les consommations énergétiques individuelles au sein de ces territoires par une approche de modélisation désagrégée. La première étape de cette modélisation consiste à modéliser et à simuler les pratiques de mobilités quotidiennes. Cependant avant cela, nous souhaitons tout d'abord acquérir une première compréhension des effets de la forme urbaine sur les pratiques de mobilités quotidiennes des individus en étudiant plusieurs grandes villes françaises, ce qui fait l'objet de ce chapitre. Les données utilisées pour répondre à cet objectif sont tout d'abord présentées dans une première partie. Un ensemble d'analyses statistiques sur les différentes villes françaises est ensuite réalisé, permettant de montrer le rôle majeur des caractéristiques sociodémographiques des individus ainsi que le rôle de la forme urbaine sur les pratiques de mobilités quotidiennes. Ces différentes analyses sur des villes réelles permettront dans le chapitre suivant de calibrer le modèle de simulation des mobilités quotidiennes sélectionné, Mobisim-Soft.

7.1 Les enquêtes déplacements : des photographiques des déplacements quotidiens

Dans cette section, les enquêtes déplacements utilisées sont présentées et une sélection des déplacements est également effectuée.

7.1.1 Les différentes enquêtes déplacements utilisées

Les Enquêtes Ménages Déplacements (EMD) servent de base à l'ensemble du travail de modélisation des mobilités quotidiennes. Cette enquête est l'outil de connaissance des pratiques de mobilités à l'échelle la plus locale disponible. Développées dans les années 70 par le CEREMA (ex-CERTU), elles ont pour objectifs de qualifier et quantifier les déplacements réalisés par les habitants d'un territoire. Depuis 1976, près de 160 enquêtes ont été réalisées sur plus de 80 territoires. Elles sont réalisées selon une méthode dite « *standard CERTU* », fixant des règles qui balisent le processus d'enquête permettant d'obtenir des données objectives, fiables et comparables dans le temps et l'espace. Les EMD sont conduites par les collectivités territoriales, le plus souvent par l'autorité organisatrice de transports urbains. L'aire d'étude est à minima le périmètre de transport urbain, mais est généralement plus étendue. Ce périmètre est divisé en secteurs, qui correspondent à l'unité spatiale minimale pour la diffusion des résultats (zones fines). Leur superficie varie en fonction de la densité de population, ces secteurs correspondent à des grands quartiers dans les villes centres et à des communes dans les espaces périphériques. Ces enquêtes sont menées auprès d'un échantillon de ménages représentatif de la population du territoire, par entretien en face à face ou téléphoniques. Elles fournissent des informations détaillées sur les caractéristiques du ménage et des individus ainsi que sur leurs pratiques de mobilité (heures et lieux de départ et d'arrivée, distance, durée, motif et mode(s) de transport...). Quatre volets composent les résultats de l'EMD. Le volet « *Ménage* » renseigne sur le logement et l'équipement en véhicule de chaque ménage. Le volet « *Personne* » décrit les caractéristiques socio-économiques de chacune des personnes de plus de 5 ans du ménage. Le volet « *Déplacement* » relève l'ensemble des caractéristiques des déplacements réalisés la veille du jour de l'enquête par chacune des personnes de plus de 5 ans du ménage. Enfin, le volet « *Opinion* » interroge sur la perception générale des différents modes de transport (une personne de plus de 16 ans tirée au sort par ménage). En complément des EMD, nous utiliserons également les enquêtes déplacements villes moyennes (EDVM) et les enquêtes déplacements grands territoires (EDGT) élaborées également par le CEREMA. Les EDVM sont construites sur le même modèle que les EMD mais la méthode est adaptée aux villes moyennes (agglomérations dont le pôle urbain ne dépasse pas 100 000 habitants). Les EDGT à l'inverse sont basées sur une méthode pour des périmètres élargis.

Les villes théoriques modélisées dans la partie précédente correspondent à des grandes aires urbaines françaises. Dans un souci de cohérence, les EMD des grandes urbaines françaises disponibles ont donc été sélectionnées ici, soit 19 EMD (Tableau 7-1). Trois d'entre elles sont accessibles en open data (Nantes, Lille, Montpellier), 15 sont disponibles via l'Adisp (Archives de Données Issues de la Statistique Publique) et le

réseau Quetelet-Progedo Diffusion. Enfin, l'EMD de Besançon a été fournie directement par le Grand Besançon. Ces différentes EMD peuvent être catégorisées en fonction de la structure urbaine des villes. Pour cela nous utilisons la typologie de Baro (2015) , classant les aires urbaines françaises selon le type de leur structure urbaine (voir partie 4.1.2). Au total, nous disposons ainsi d'une base de données comprenant 99 940 ménages, 183 519 personnes et 695 614 déplacements.

Dénomination de l'EMD	Code commune	Année	Type "CERTU"	Population	Tranche aire urbaine Insee	Structure urbaine	Périmètre de l'étude			Échantillons de l'enquête		
							Nb. de communes	Population	Division en secteurs	Ménages	Personnes	Déplacements
VILLE CENTRE Territoire												
AMIENS Grand Amiénois	80021	2010	EDGT	133 891	08	Monocentrique périurbaine	381	334200	45	5103	8262	30933
ANGERS Pays Loire Angers	49007	2012	EDGT	154 508	08	Macrocéphale hiérarchisée	68	315000	28	2700	4722	18399
BESANÇON Grand Besançon Métropole	25056	2018	EMD	116 775	08	Monocentrique périurbaine	68	193200	75	3054	4556	17574
BORDEAUX Grande agglomération bordelaise	33063	2009	EDGT	257 068	09	Monocentrique axialisée	96	993000	76	6011	12612	48462
CAEN Calvados	14118	2011	EDGT	105 512	08	Monocentrique périurbaine	635	665600	67	7525	11103	43194
CLERMONT-FERRAND Val d'Allier	63113	2012	EDGT	146 734	08	Polycentrique hiérarchisée	343	654000	56	5840	9181	34182
DOUAI Grand Douaisis	59178	2012	EMD	39 634	09	Conurbation peu dense	67	250000	38	2803	6358	23883
GRENOBLE Grande région grenobloise	38185	2010	EMD	157 650	09	Monocentrique axialisée	354	799000	97	7603	16641	63336
LA ROCHELLE Agglomération rochelaise	17300	2011	EDVM	76 114	08	Monocentrique axialisée	18	143000	19	2615	3115	12203
LILLE Métropole européenne de Lille	59350	2016	EMD	233 098	09	Conurbation	85	1109082	57	4539	9479	38180

MONTPELLIER Aire métropolitaine montpelliéraine	34172	2014	EDGT	290 053	09	Macrocéphale hiérarchisée	190	746000	80	6986	13306	52387
NANCY Sud 54	54395	2013	EDGT	104 885	08	Macrocéphale hiérarchisée	476	557219	68	6788	11144	40664
NANTES Loire-Atlantique	44109	2015	EDGT	314 138	09	Macrocéphale hiérarchisée	230	1375900	123	12722	20779	81924
NICE Alpes-Maritimes	6088	2009	EDGT	341 032	09	Polycentrique hiérarchisée	172	1105500	104	9000	17213	58239
SAINT-ÉTIENNE Bassin de vie stéphanois	42218	2010	EMD	173 089	09	Polycentrique hiérarchisée	161	582500	52	4700	10163	38576
STRASBOURG Bas-Rhin	67482	2009	EMD	284 677	09	Conurbation	526	1057000	67	5399	12016	46935
VALENCE Grand Rovaltain	26362	2014	EDGT	64 726	07	Macrocéphale hiérarchisée	141	345000	36	3548	6072	23230
VALENCIENNES Valenciennois	59606	2011	EMD	43 405	08	Conurbation peu dense	82	346000	41	3004	6797	23313

Tableau 7-1 : Présentation des différentes enquêtes déplacements utilisées dans ce travail.

7.1.2 Préparation des données

7.1.2.1 Sélection des déplacements

Dans un souci de cohérence avec les villes théoriques, nous faisons le choix de sélectionner uniquement les déplacements effectués dans un rayon de 20 km depuis le centre de chaque ville (l'origine et la destination du déplacement sont dans ce périmètre). Nous faisons également le choix de sélectionner les déplacements ayant les motifs de destination suivants : le travail, les études, le recours à des commerces ou services, les loisirs, le réseau social, l'accompagnement, les soins et le retour au domicile. Ces huit motifs principaux sont subdivisés en 19 sous-motifs de déplacements (Tableau 7-2).

Motif principal	Sous-motifs
Accompagnement	Nourrice, crèche
	École maternelle ou primaire
	Aller chercher quelqu'un
	Accompagner quelqu'un
Commerces et services	Restauration hors du domicile
	Multi-motifs en centre commercial
	Démarches
	Achats en petit et moyen commerce
	Achats en marché couvert ou de plein vent
	Achats en grand magasin, supermarché et hypermarché
Études	Université
	Lycée
	Collège
Loisirs	Promenade, lèche-vitrine
	Loisirs, activité sportive, culturelle ou associative
Réseau social	Visiter des parents ou des amis
	Résidence secondaire
Soin	Santé
Travail	Télétravail
	Travail
	Recherche d'un emploi

Tableau 7-2 : Les différents motifs de déplacements sélectionnés dans les enquêtes déplacements.

Les déplacements réalisés avec l'un des cinq modes principaux sont conservés (Tableau 7-3). Ces modes sont la marche à pied (MAP), le vélo, la moto, la voiture personnelle (VP) et les transports collectifs (TC).

Mode principal	Sous-modes
MAP	Marche à pied
VÉLO	Bicyclette
MOTO	Conducteur ou passager de deux roues < 50 cm ³
	Conducteur ou passager de deux roues > 50 cm ³
VP	Conducteur ou passager de véhicule particulier
	Fourgon, camionnette, camion
	Passager taxi
TC	Passager bus urbain
	Passager tramway
	Passager métro
	Passager SNCF
	Passager car interurbain
	Transport scolaire

Tableau 7-3 : Les différents modes des déplacements conservés dans les enquêtes déplacements.

Les déplacements effectués en moto représentant seulement 1% de notre échantillon, nous regroupons ce mode avec le mode voiture. Après ces différentes sélections des déplacements, nous obtenons un total de 364 080 déplacements pour 96 395 personnes et 59 012 ménages (Tableau 7-4).

Ville-centre / territoire	Ménages	Personnes	Déplacements
AMIENS / Grand Amiénois	2993	4743	19308
ANGERS / Pays Loire Angers	1856	2652	8461
BESANÇON / Grand Besançon Métropole	2540	3418	13259
BORDEAUX / Grande agglomération bordelaise	5254	9231	35275
CAEN / Calvados	2550	3846	13221
CLERMONT-FERRAND / Val d'Allier	2396	3743	14148
DOUAI / Grand Douaisis	2107	3377	12395
GRENOBLE / Grande région grenobloise	4583	8496	33692
LA ROCHELLE / Agglomération rochelaise	2063	2392	9018
LILLE / Métropole européenne de Lille	3974	6830	26630
MONTPELLIER / Aire métropolitaine montpelliéraine	4567	7419	27760
NANCY / Sud 54	3242	4662	15278
NANTES / Loire-Atlantique	5178	8619	34801
NICE / Alpes-Maritimes	4817	8252	29176
SAINT-ÉTIENNE / Bassin de vie stéphanois	3220	5849	23551
STRASBOURG / Bas-Rhin	3064	5738	22558
VALENCE / grand Rovaltain	2319	3317	12400
VALENCIENNES / Valenciennois	2289	3811	13149
Total	59012	96395	364080

Tableau 7-4 : Nombre de ménages, personnes et déplacements par villes sélectionnées.

7.1.2.2 Affectation d'un type de tissu urbain dominant aux zones fines des EMD

À partir de la classification établie dans le chapitre 5, nous identifions pour l'ensemble des territoires des EMD sélectionnés les différents tissus urbains. Nous utilisons également un maillage avec une résolution de 250 mètres. La logique d'affectation d'un tissu urbain à une zone fine est la suivante : si un tissu urbain est majoritaire au sein d'une zone fine (>50 %) alors le type est affecté à la zone fine ; s'il n'y a pas de tissu urbain majoritaire alors le type « *Indifférencié* » est affecté à la zone fine (Figure 7-1).

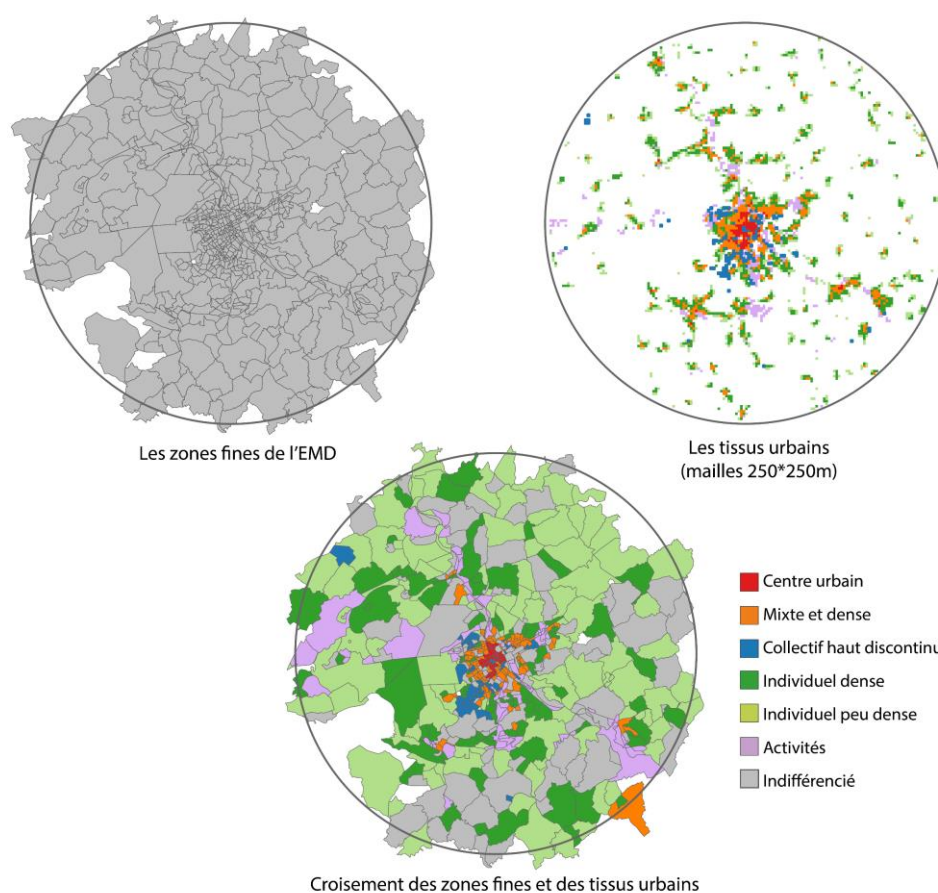


Figure 7-1 : Exemple du croisement entre les zones fines et les tissus urbains à Nancy (cercle de rayon 20 km).

Ainsi 266 108 déplacements sont réalisés depuis des zones fines à dominantes résidentielles (non indifférenciées), comptant 43 192 ménages et 70244 personnes enquêtée (Tableau 7-5). Ce sont ces déplacements que nous allons ensuite analyser.

Tissus urbains	Ménages	Personnes	Déplacements
Centre urbain	7184	10990	42907
Mixte et dense	12069	19442	73659
Collectif haut discontinu	6436	10544	39770
Individuel dense	7779	13387	50654
Individuel peu dense	9724	15881	59118
Total résidentiel	43192	70244	266108
Activités	1097	1783	6787
Indifférencié	14723	24368	91185
Total général	59012	96395	364080

Tableau 7-5 : Nombre de ménages, personnes et déplacements étudiés après préparation des données.

7.2 Le rôle majeur des caractéristiques sociodémographiques des individus sur les pratiques de mobilités quotidiennes

Les déterminants des mobilités quotidiennes relèvent à la fois de facteurs techniques (caractéristiques des modes de transports), des caractéristiques sociodémographiques des ménages, des déterminants socio-psychologiques plus individuels et enfin des caractéristiques du territoire (voir partie 2.2.2.1). Les études portant sur les pratiques de mobilités quotidiennes soulignent l'importance des caractéristiques sociodémographiques telles que l'âge, le genre, le revenu, le niveau d'éducation, l'occupation ou encore la composition des ménages. Ainsi, afin d'analyser de manière rigoureuse l'impact des formes urbaines sur les pratiques de mobilités, il faut avant tout analyser les liens entre les caractéristiques sociodémographiques et les pratiques de mobilités.

7.2.1 Préparation des données

Les enquêtes déplacements fournissent différentes variables sociodémographiques pouvant être corrélées entre-elles (Tableau 7-6).

Variable sociodémographique	Code	Modalités
Âge	Numériques	
Nombre d'enfants (nbenf)	Numériques	
Nombre de personnes dans le ménage (nbpers)	Numériques	
Genre	1	Masculin
	2	Féminin
Occupation	1	Travail à plein temps
	2	Travail à temps partiel
	3	Étudiant ou en alternance
	4	Scolaire jusqu'au bac
	5	Chômeur, recherche un emploi
	6	Retraité
	7	Reste au foyer
	8	Autre
Professions et catégories socioprofessionnelles (PCSC)	1	Agriculteurs exploitants
	2	Artisans, commerçants et chefs d'entreprise
	3	Cadres et professions intellectuelles supérieures
	4	Professions Intermédiaires
	5	Employés
	6	Ouvriers
	7	Élèves, étudiants
	8	Inactifs et chômeurs n'ayant jamais travaillé

Tableau 7-6 : Les différentes variables sociodémographiques des enquêtes déplacements.

Les agriculteurs sont regroupés avec les artisans, représentant une part trop faible des effectifs totaux (0,6 %).

7.2.1.1 Corrélation des variables sociodémographiques quantitatives

Nous souhaitons dans un premier temps vérifier la corrélation des trois variables sociodémographiques quantitatives qui sont l'âge de l'individu, le nombre de personnes du ménage d'appartenance de l'individu et le nombre d'enfants dans ce ménage (Tableau 7-7). Les différents coefficients montrent une très forte corrélation entre le nombre d'enfants et le nombre de personnes du ménage. La corrélation entre l'âge et les deux autres variables est également assez forte.

Pearson	Âge	nbpers	nbenf
Âge	1	-0.43	-0.41
nbpers		1	0.84
nbenf			1

Tableau 7-7 : Test de la corrélation des variables sociodémographiques quantitatives.

Nous créons une nouvelle variable qui qualifie la structure du ménage de référence, combinaison des

variables nombre de personnes et nombre d'enfants (Tableau 7-8).

Structure du ménage	Nombre d'adultes	Nombre d'enfants
Personne seule	1	0
Famille monoparentale	1	> 0
Couple sans enfants	2	0
Couple avec enfants	2	> 0
Autres	-	

Tableau 7-8 : Création d'une variable unique à partir des variables sociodémographiques quantitatives.

7.2.1.2 Corrélation des variables sociodémographiques qualitatives

Nous souhaitons également vérifier la corrélation entre les variables sociodémographiques qualitatives : le genre, l'occupation et la PCSC. Nous ajoutons également l'âge en créant différentes classes d'âges et la structure du ménage, variable créée précédemment. Pour chaque couple de variables, nous calculons la valeur du chi2 et le coefficient V de Cramer (Tableau 7-9). Ce coefficient intègre l'effectif et le nombre de degrés de liberté du tableau de contingence. Il est plus lisible que la probabilité associée au chi2 et fournit une mesure absolue de l'intensité de la relation entre deux variables qualitatives, indépendamment du nombre de leurs modalités et de l'effectif de la population.

Variable 1	Variable 2	Chi-squared X ²	Chi-squared df	Chi-squared p-value	V Cramer	Relation
Âge	Occupation	531122	35	< 2.2e-16	0.63	Très forte
Âge	PCSC	211177	30	< 2.2e-16	0.40	Forte
Âge	Structure du ménage	87812	20	< 2.2e-16	0.29	Moyenne
Occupation	PCSC	378732	42	< 2.2e-16	0.49	Très forte
Occupation	Structure du ménage	86752	28	< 2.2e-16	0.29	Moyenne
Genre	Âge	895	5	< 2.2e-16	0.06	Très faible
Genre	PCSC	35613	6	< 2.2e-16	0.37	Forte
Genre	Occupation	23767	7	< 2.2e-16	0.30	Forte
Genre	Structure du ménage	3793.3	4	< 2.2e-16	0.12	Faible

Tableau 7-9 : Test de la corrélation des variables sociodémographiques qualitatives des enquêtes déplacements.

Il apparaît ainsi que les variables Âge, Occupation, PCSC et Genre sont très corrélées. Il existe plusieurs solutions pour contourner ce problème. La méthode la plus courante consiste à combiner les variables corrélées entre elles en créant une typologie. Pour cela nous réalisons une analyse des correspondances multiples (ACM) entre ces variables fortement corrélées (Figure 7-2).

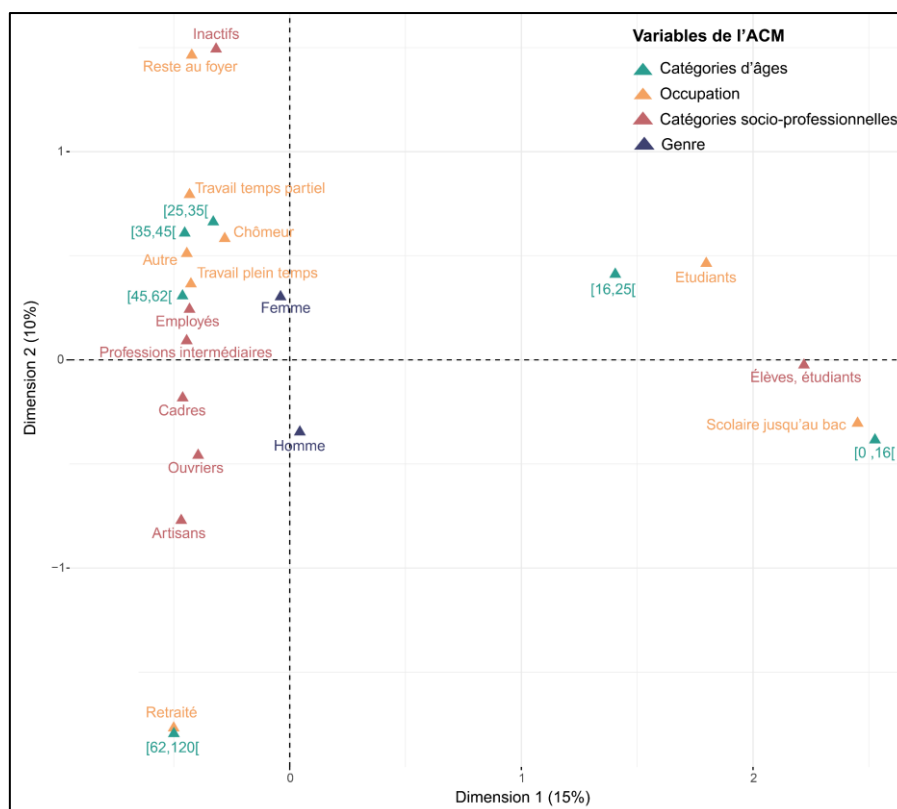


Figure 7-2 : Représentation des variables dans les dimensions 1 et 2 de l'ACM.

La lecture graphique de cette ACM nous permet de dégager cinq grandes catégories d'individus bien distinctes :

- Les scolaires de moins de 16 ans ;
- Les étudiants de plus de 16 ans ;
- Les retraités de plus de 62 ans ;
- Les inactifs non retraités ;
- Les actifs.

Parmi les actifs, nous conservons les cinq PCSC : ouvriers, artisans, cadres, employés et professions intermédiaires. Nous obtenons ainsi une typologie d'individus en cinq catégories principales et en neuf catégories détaillées. Le genre n'apparaît pas discriminant dans cette analyse, nous conservons la variable indépendamment de la catégorie d'individu.

7.2.2 L'impact des variables sociodémographiques sur les pratiques de mobilités

Concernant les pratiques de mobilités, nous disposons de quatre variables : le mode, le motif, la distance et la durée de déplacement. Nous créons des classes de distances et de durées de déplacement afin de disposer de variables qualitatives uniquement. Les trois variables sociodémographiques étudiées ici sont la catégorie d'individu, la structure du ménage et le genre. L'analyse deux à deux de ces variables avec le test du chi² et

le coefficient V de Cramer nous montre que les relations entre les variables sociodémographiques et les variables des pratiques de mobilités sont peu corrélées entre elles (Tableau 7-10). Seule la catégorie d'individu présente une corrélation moyenne avec le mode et le motif de déplacement.

Variable à expliquer	Variable explicative	Chi-squared X ²	Chi-squared df	Chi-squared p-value	V Cramer	Relation
Mode	Catégorie d'individu	60546	24	< 2.2e-16	0.28	Moyenne
Mode	Structure du ménage	6560	12	< 2.2e-16	0.09	Très faible
Mode	Genre	2533	3	< 2.2e-16	0.10	Faible
Motif	Catégorie d'individu	102537	56	< 2.2e-16	0.24	Moyenne
Motif	Structure du ménage	24237	28	< 2.2e-16	0.15	Faible
Motif	Genre	1875	7	< 2.2e-16	0.08	Faible
Distance	Catégorie d'individu	17632	48	< 2.2e-16	0.11	Faible
Distance	Structure du ménage	3013	24	< 2.2e-16	0.05	Très faible
Distance	Genre	2102	6	< 2.2e-16	0.09	Très faible
Durée	Catégorie d'individu	5224.6	96	< 2.2e-16	0.05	Très faible
Durée	Structure du ménage	1820	48	< 2.2e-16	0.04	Très faible
Durée	Genre	620	12	< 2.2e-16	0.05	Très faible

Tableau 7-10 : Test de la corrélation entre les variables sociodémographiques et les variables de mobilités.

Nous allons observer plus en détail les corrélations moyennes et faibles.

7.2.2.1 Catégories d'individus et pratiques de mobilités

Nous présentons ici une synthèse des pratiques de mobilités des différents types d'individus (Tableau 7-11), construite à partir de l'analyse de graphiques disponibles en annexe (Annexe 16, Annexe 17 et Annexe 18). Les catégories d'individus aux pratiques de mobilités similaires ont été analysées conjointement.

Catégories d'individus	Classement des modes	Motif principal	Distance moyenne parcourue par jour par personne (km)
Actifs	VP>MAP>TC>Vélo	Travail	Entre 15,6 et 16,6
Scolaires	MAP>TC>Vélo>VP	Accompagnement	3,7
Étudiants	MAP>TC>VP>Vélo	Études	9,4
Retraités	MAP>VP>TC>Vélo	Commerces et services	8,3
Inactifs	MAP>VP>TC>Vélo	Commerces et services	9,4

Tableau 7-11 : Synthèse des pratiques de mobilités des différentes catégories d'individus.

Les pratiques de mobilités quotidiennes des actifs

Les actifs se déplacent majoritairement en voiture, ce sont d'ailleurs les individus qui l'utilisent le plus.

Parmi les actifs, les artisans sont ceux qui ont le plus souvent recours à la voiture (76 % de leurs déplacements) tandis que les employés sont ceux qui l'utilisent le moins (67 % de leurs déplacements). Les motifs principaux de déplacements sont le travail (40 à 44 % de leurs déplacements) mais également le recours aux commerces et services (21 ou 22 %). Cette catégorie d'individu est celle qui présente les distances moyennes journalières de déplacement les plus importantes, comprises entre 15,6 km et 16,6 km.

Les pratiques de mobilités quotidiennes des scolaires

Les scolaires sont la population qui utilise le moins la voiture, étant mineur et ne possédant ainsi par le permis de conduire. Ils se déplacent principalement à pied (72 % de leurs déplacements) et en TC (21 %). Le motif accompagnement est le principal motif de déplacements, suivi par le motif études. Ils parcourent des distances relativement courtes, la distance moyenne journalière de déplacement étant de seulement 3,7 km.

Les pratiques de mobilités quotidiennes des étudiants

Les étudiants utilisent également très peu la voiture (seulement 21 % de leurs déplacements), cette population ne possédant pas forcément un véhicule. La MAP et les TC sont leurs principaux modes de déplacement, représentant respectivement 42 % et 32 % de leurs déplacements. Les déplacements sont réalisés majoritairement pour le motif études (42 %) et la distance moyenne journalière de déplacement est de 9,4 km.

Les pratiques de mobilités quotidiennes des retraités et des inactifs

Les retraités et les inactifs présentent des pratiques de mobilités quotidiennes très similaires. Ils utilisent à part quasi égale la MAP et la voiture. Le recours aux commerces et services est leur principal motif de déplacement, ainsi que l'accompagnement pour les inactifs (30 %) et les loisirs pour les retraités (22 %). Cette différence s'explique par l'âge des individus de chacune des catégories, les retraités n'ayant généralement pas d'enfants mineurs à accompagner quotidiennement. Leurs déplacements journaliers sont de 8,3 et 9,4 km en moyenne, distance comparable à celle des étudiants.

7.2.2.2 Structure du ménage et pratiques de mobilités

La structure du ménage de référence de l'individu semble impacter légèrement les motifs de déplacements (Figure 7-3). Les couples sans enfants et les personnes seules se déplacent majoritairement pour le recours aux commerces et services (37 et 38 % de leurs déplacements totaux), ainsi que pour le travail (23 et 21 %), les loisirs (16 et 15 %) et le réseau social (10 et 12 %). Les couples avec enfants et les familles monoparentales se déplacent essentiellement pour le motif accompagnement (34 % et 28 % de leurs déplacements totaux), ce qui s'explique aisément par la présence d'enfants. Ils se déplacent également pour le travail (25 et 20 %) et le recours aux commerces et services (18 et 21 %), mais beaucoup moins pour les loisirs (8 et 9 %) ou le réseau social (6 et 9 %).

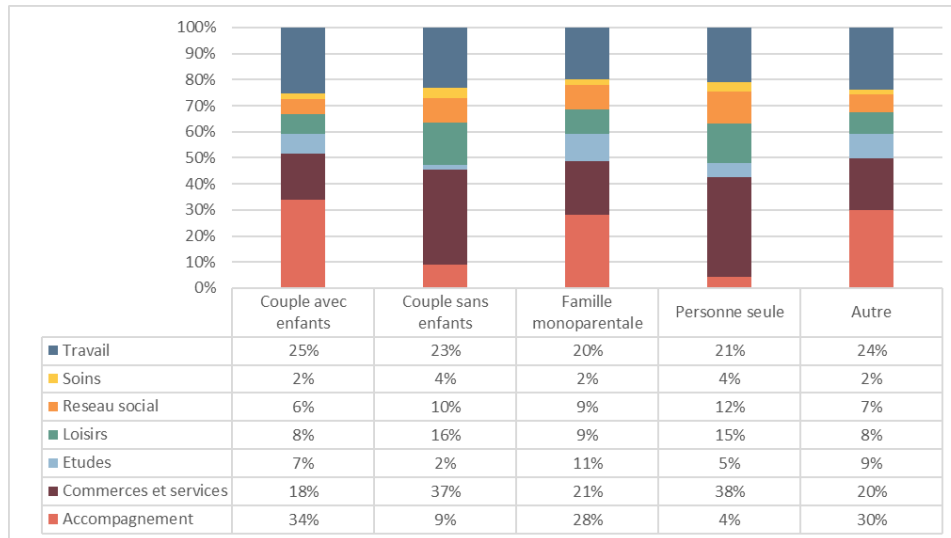


Figure 7-3 : Motifs de déplacements en fonction de la structure des ménages dans les différents territoires sélectionnés.

7.2.2.3 Genre et pratiques de mobilités

Le genre impacte également légèrement les pratiques de mobilités (Figure 7-4). Concernant la répartition modale, il apparaît que les hommes utilisent plus la voiture et le vélo que les femmes (respectivement 54 % contre 47 % et 4 % contre 2 %). Les femmes utilisent ainsi plus la MAP et les TC. Au niveau des motifs de déplacements, une différence significative apparaît au niveau du motif travail et du motif accompagnement. Les hommes se déplacent plus pour aller au travail (27 % chez les hommes contre 21 % chez les femmes), tandis que le motif accompagnement est plus fréquent chez les femmes (17 % chez les hommes contre 25 % chez les femmes).

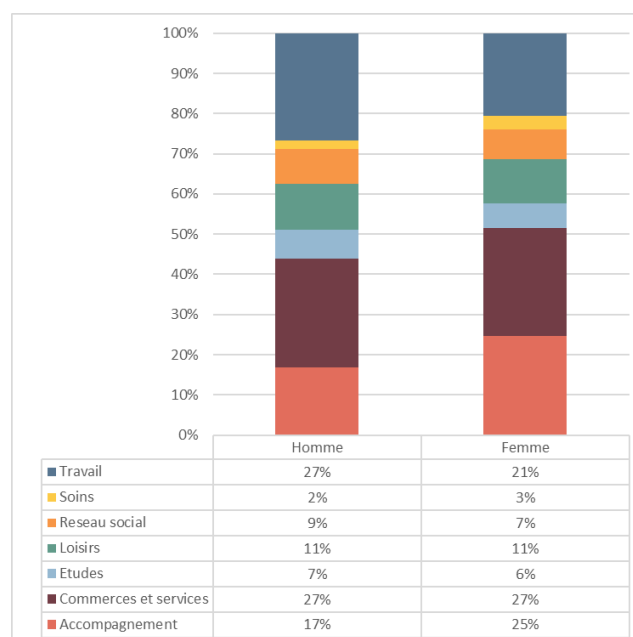


Figure 7-4 : Motifs de déplacements en fonction du genre dans les différents territoires sélectionnés.

7.3 Les enjeux liés à la localisation résidentielle des ménages

Nous avons vu dans la sous-partie précédente que les caractéristiques sociodémographiques jouent un rôle sur les pratiques de mobilités quotidiennes. L'objectif de cette sous-partie est d'analyser les liens existants entre la forme urbaine et les pratiques de mobilités quotidiennes. La forme urbaine est en effet un des déterminants majeurs des pratiques de mobilités, qu'elle soit considérée à l'échelle locale ou plus globale (voir partie 2.3.1).

7.3.1 L'impact de la forme urbaine locale sur les pratiques de mobilités

À l'échelle des tissus urbains, nous allons dans un premier temps réaliser une analyse globale pour un individu « moyen ». Une analyse systématique sera ensuite réalisée pour les cinq classes principales d'individus construites précédemment. Cela permettra d'analyser les variations observées entre les catégories d'individus, ces individus ne se localisant en effet pas de manière homogène dans les différents tissus urbains (Figure 7-5). Le tissu individuel peu dense présente par exemple une forte part d'actifs (61%), supérieure à celles des autres tissus.

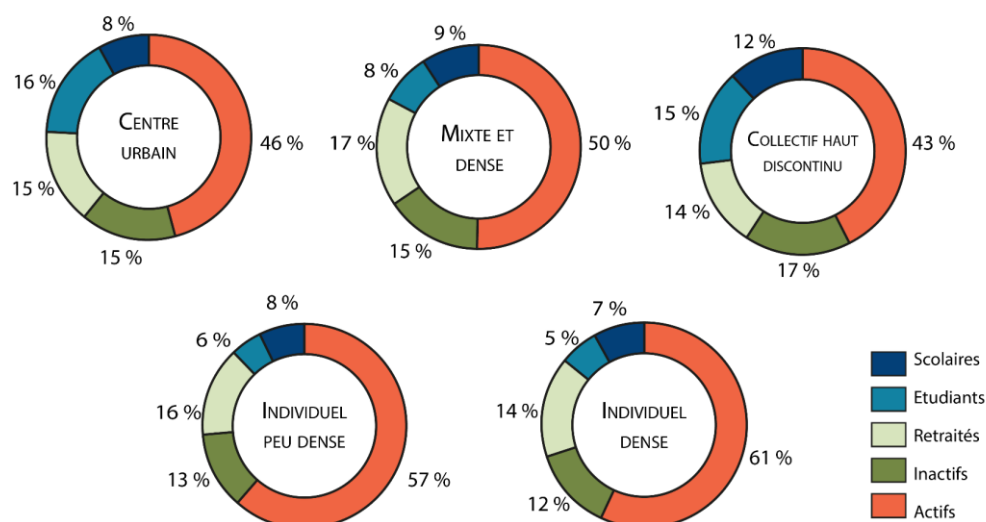


Figure 7-5 : Composition des différents tissus urbains en fonction des catégories d'individus.

7.3.1.1 Analyse générale des liens entre les tissus urbains et les pratiques de mobilités

L'analyse deux à deux des variables de mobilités et du tissu urbain avec le test du χ^2 et le coefficient V de Cramer nous indique qu'il existe une relation moyenne entre le mode de déplacement et le tissu urbain. Il existe également une relation, moins forte, entre la distance de déplacement et le tissu urbain (Annexe 19). L'analyse des parts modales pour les différents tissus urbains confirme l'existence d'une relation entre la

localisation résidentielle et les pratiques de mobilités (Tableau 7-12). Ainsi, des variations très importantes sont visibles entre les parts modales des différents tissus. Le centre urbain présente la plus faible utilisation de l'automobile avec seulement 26 %, tandis que l'individuel dense et l'individuel peu dense présentent des taux bien supérieurs (66 et 71 %). À l'inverse, le vélo et la MAP sont très utilisés dans le centre urbain (62 %), tandis qu'ils sont moins utilisés dans les tissus individuels denses et peu denses (27 et 23 %). Les TC représentent une part supérieure à 10 % dans les trois tissus urbains les plus centraux qui sont le centre urbain, le mixte et dense et le collectif haut discontinu.

	Centre urbain	Mixte et dense	Collectif haut	Individuel dense	Individuel peu dense	Global
Nombre de déplacements par jour et par personne	3,9	3,8	3,8	3,8	3,7	3,8
Parts modales						
VP	26%	49%	31%	66%	71%	51%
TC	13%	10%	17%	7%	6%	10%
MAP	57%	37%	48%	25%	21%	36%
VÉLO	5%	4%	4%	2%	2%	3%
Distance moyenne parcourue par personne par jour par personne						
Accompagnement	4,7	6,4	4,7	9,0	12,1	8,0
Commerces et services	3,5	5,0	4,3	7,4	10,1	6,1
Études	5,2	6,5	4,9	10,4	14,8	8,0
Loisirs	4,7	5,4	4,9	6,9	8,0	6,1
Réseau social	5,2	6,2	5,5	8,1	10,0	7,1
Soins	3,4	4,9	4,4	8,3	11,0	6,4
Travail	9,6	12,3	10,2	17,8	21,9	15,1
Tous motifs	7,1	9,0	7,6	13,3	17,2	11,2

Tableau 7-12 : Données de mobilité par personne en fonction du tissu urbain dans les différents territoires sélectionnés.

En regardant plus en détail ces parts modales en fonction du motif principal de déplacement, nous constatons globalement la même tendance, quel que soit le motif (Annexe 20). Concernant les distances de déplacements, elles sont en moyenne de 7,1 km par personne par jour pour les personnes résidant dans le centre urbain. Cette distance est quasi-similaire dans le tissu collectif haut discontinu (7,6 km/jour/personne). Dans le mixte et dense, cette distance augmente à 9 km, pour passer à plus de 13 et 17 km pour les tissus individuels dense et peu dense. Ces importantes variations sont observables quel que soit le motif de déplacement.

7.3.1.2 Analyse détaillée des liens entre les tissus urbains et les pratiques de mobilités pour les différentes catégories d'individus

Un tableau détaillé des distances moyennes parcourues par jour par personne pour chaque motif de

déplacement et pour chaque catégorie d'individu est disponible en annexe (Annexe 22).

Les scolaires

Quel que soit le tissu urbain, les scolaires sont les individus qui utilisent le plus la MAP. Cet usage est plus important au centre-ville et diminue dans les autres tissus au profit des TC. Un écart important apparaît entre les parts modales des tissus plus centraux (centre urbain, mixte et dense et collectif haut) et celle des tissus plus périphériques (individuels dense et peu dense). Les scolaires se déplacent peu : ils effectuent en moyenne 2,7 déplacements par jour par personne. Concernant les distances de déplacements, elles augmentent au fur et à mesure de l'éloignement au centre. Pour le motif accompagnement, qui est le motif principal de déplacement des scolaires, la distance moyenne est de 1,6 km pour un habitant du centre urbain contre 3,6 km pour un habitant du tissu individuel peu dense. Des écarts importants sont ainsi visibles selon le type de tissu (Figure 7-6).

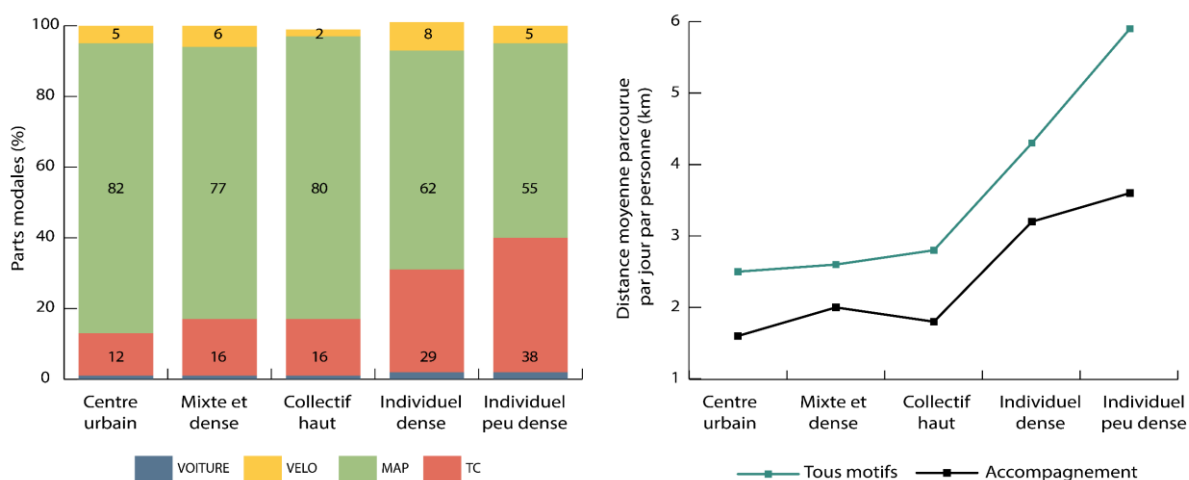


Figure 7-6 : Parts modales de déplacements et distance moyenne de déplacement chez les scolaires en fonction du tissu urbain de résidence dans les différents territoires sélectionnés.

Les étudiants

Les étudiants sont ceux qui utilisent le plus les TC, quel que soit le tissu urbain de résidence. La part des TC évolue peu, comprise entre 26 et 35 %. Les étudiants se déplacent également beaucoup en MAP. Pour ce mode, des différences importantes apparaissent entre tissus : les déplacements à pieds sont trois fois plus importants pour les habitants du centre urbain que pour les habitants des tissus individuels. À l'inverse la voiture est très peu utilisée par les étudiants du centre urbain (11 %) mais très utilisée par les étudiants des tissus individuels (38 et 44 %). Les étudiants se déplacent peu avec une moyenne de 3,3 déplacements par jour par personne. Ce chiffre tend à diminuer avec l'éloignement au centre. Les distances de déplacements sont plus importantes que pour les scolaires. Pour se rendre sur le lieu d'étude, principal motif de déplacement des étudiants, les distances parcourues moyennes sont comprises entre 5,8 et 19,4 km. Globalement, tous motifs confondus les distances moyennes parcourues varient du simple au triple selon le tissu urbain (Figure 7-7).

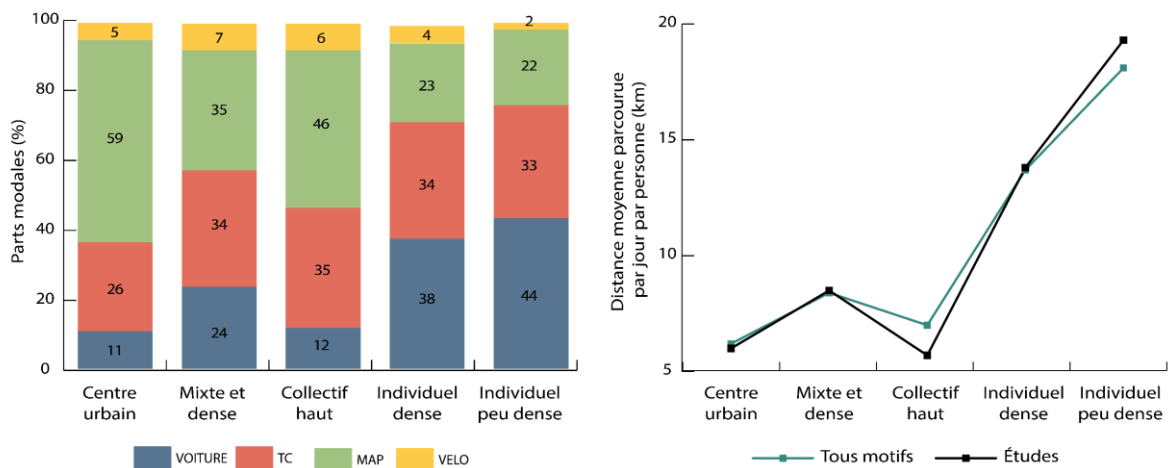


Figure 7-7 : Parts modales de déplacements et distance moyenne de déplacement chez les étudiants en fonction du tissu urbain de résidence dans les différents territoires sélectionnés.

Les retraités

Les retraités se déplacent principalement en MAP et en voiture. Ces utilisations varient beaucoup entre les tissus urbains. La part modale de la voiture pour les personnes résidant dans le tissu individuel peu dense est ainsi plus de trois fois supérieure à celle des personnes résidantes dans le tissu centre urbain. L'utilisation de la MAP et des TC à l'inverse diminue fortement avec l'éloignement au centre. La part de la MAP passe par exemple de 69 % dans le centre urbain à 29 % dans l'individuel peu dense. Concernant la distance et le nombre de déplacements, les retraités font en moyenne 8,3 km par jour par personne et 3,5 déplacements. Pour le motif principal de déplacements (recours aux commerces et services), les distances moyennes varient fortement d'un tissu urbain à un autre, passant de 1,6 km pour les habitants du centre urbain contre 4,7 km pour les habitants du tissu individuel peu dense. Globalement, les distances moyennes varient du simple au double entre le centre urbain et l'individuel peu dense (Figure 7-8).

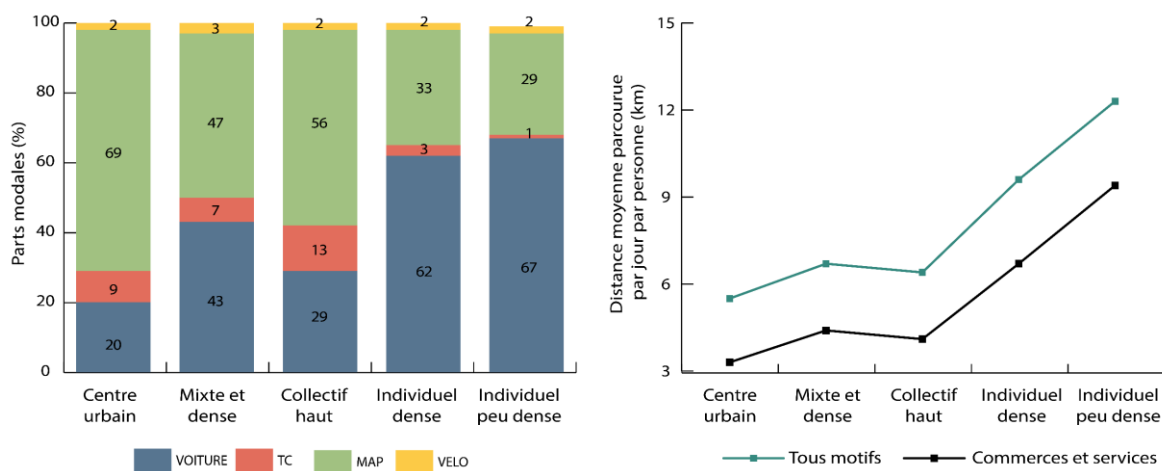


Figure 7-8 : Parts modales et distances moyennes de déplacement chez les retraités en fonction du tissu urbain de résidence dans les différents territoires sélectionnés.

Les inactifs

Les inactifs se déplacent principalement en MAP et en voiture, avec une inversion des parts modales de ces deux modes au fur et à mesure de l'éloignement du centre. La voiture est ainsi utilisée pour 21 % des déplacements des inactifs du centre urbain et pour 70 % de ceux du tissu individuel peu dense. À l'inverse, la MAP est utilisée pour 66 % des déplacements de ces habitants du centre urbain et pour 27 % seulement de ceux du tissu individuel peu dense. L'utilisation des TC est importante dans le tissu collectif haut (16 % des déplacements). Concernant la distance et le nombre de déplacements, les inactifs font en moyenne 9,4 km par jour par personne et 4,2 déplacements. Pour le motif principal de déplacements (recours aux commerces et services), les distances moyennes varient fortement d'un tissu urbain à un autre, passant de 2 km pour les habitants du centre urbain contre 5,8 km pour les habitants du tissu individuel peu dense. Globalement, les distances moyennes tous motifs confondus varient du simple au double entre le centre urbain et l'individuel peu dense (Figure 7-9).

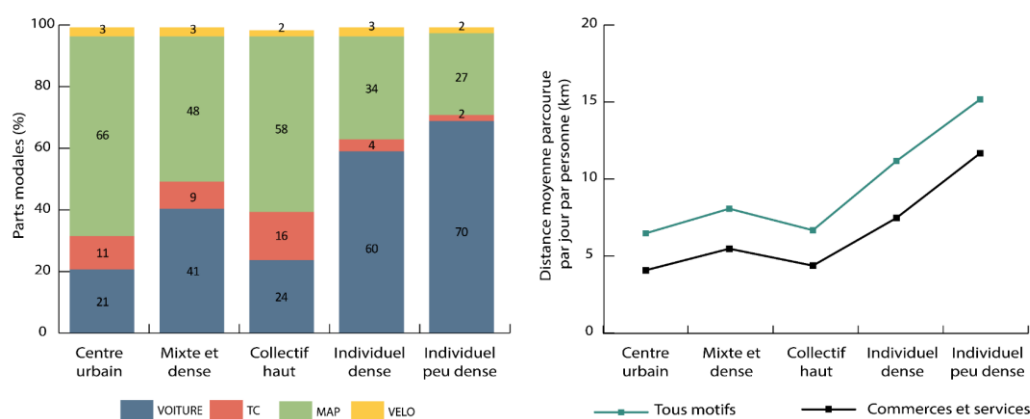


Figure 7-9 : Parts modales de déplacements et distance moyenne de déplacement chez les inactifs en fonction du tissu urbain de résidence dans les différents territoires sélectionnés.

Les actifs

Quel que soit le tissu urbain de résidence, les actifs sont ceux qui présentent la plus importante utilisation de l'automobile. Les parts modales des deux tissus individuels sont très similaires, avec une très forte dominance de l'automobile (plus de 80 %). Le tissu collectif haut discontinu présente également une part élevée de l'automobile, avec 66 % des déplacements réalisés avec ce mode. Les actifs du centre urbain sont ceux qui utilisent le moins la voiture, au profit des autres modes. Concernant les distances de déplacements, les actifs sont ceux qui se déplacent le plus loin : en moyenne ils parcourent 15 km dans une journée. Cette distance tous motifs varie fortement selon le tissu de résidence : elle est seulement de 9,4 km au centre urbain contre 21,7 pour l'individuel peu dense. Pour aller au travail, qui est le motif principal de déplacement des actifs, la distance moyenne est comprise entre 4,9 et 11 km. C'est d'ailleurs la distance moyenne la plus élevée parmi les différents motifs de déplacements (Figure 7-10).

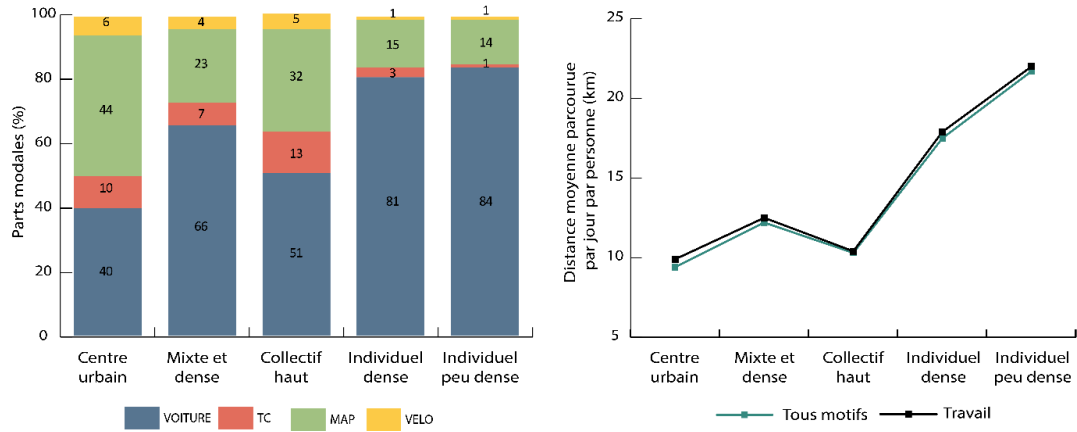


Figure 7-10 : Parts modales de déplacements et distance moyenne de déplacement chez les actifs en fonction du tissu urbain de résidence dans les différents territoires sélectionnés.

7.3.2 L'impact de la forme urbaine globale sur les pratiques de mobilités

À l'échelle de la forme urbaine globale, nous allons dans un premier temps réaliser une analyse globale des pratiques de mobilité pour un individu moyen pour chaque type de ville. Une analyse systématique a ensuite été réalisée pour les cinq classes principales d'individus construites précédemment mais également pour les cinq tissus urbains. Les tissus et les types d'individus ne se répartissent en effet pas de manière homogène dans les différentes formes de villes (Figure 7-11 et Figure 7-12), et il est donc intéressant d'observer les variations en fonction de ces variables.

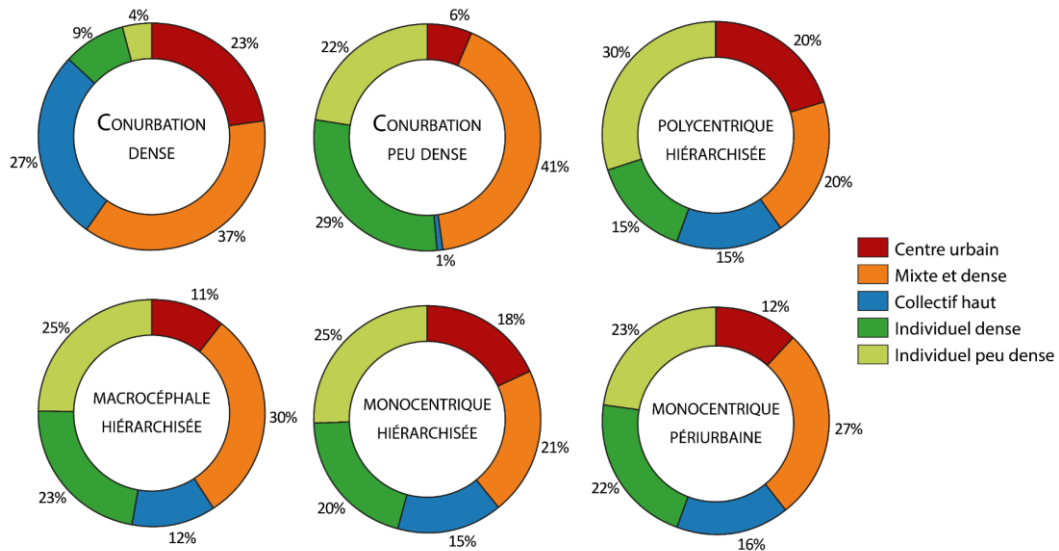


Figure 7-11 : Composition des différentes structures urbaines en fonction des tissus urbains.

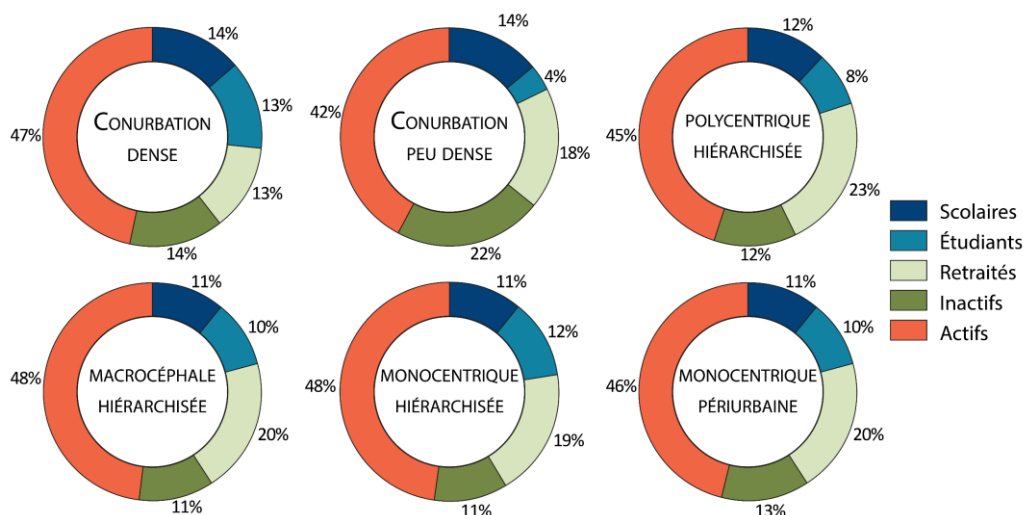


Figure 7-12 : Composition des différentes structures urbaines en fonction des catégories d'individus.

Cependant, les différences observées dans l'analyse globale entre les structures urbaines étant relativement faibles, l'analyse systématique n'est pas présentée par la suite, n'apportant pas d'éclairages supplémentaires. Les parts modales de déplacements par structure urbaine en fonction du tissu urbain de résidence et en fonction des catégories d'individus sont disponibles en Annexe 23.

7.3.2.1 Analyse générale des liens entre les pratiques de mobilité et la structure des villes

L'analyse deux à deux des variables de mobilités et de la structure urbaine avec le test du χ^2 et le coefficient V de Cramer nous indique que toutes les relations sont très faibles (Annexe 21). Toutefois, l'analyse des parts modales et des distances de déplacements pour les différents types de villes montre des légères différences (Tableau 7-13). Les conurbations denses se démarquent avec la plus faible utilisation de la voiture (43%), et avec une part élevée d'utilisation des TC (12%), de la marche (39%) et du vélo (5%). Les conurbations peu denses, à l'inverse, sont caractérisées par un fort usage de l'automobile (55%) et une très faible utilisation des transports collectifs (3%). Cette très faible part des TC peut s'expliquer par le fait que les villes appartenant à cette catégorie (Valenciennes et Douai) sont des villes de petite taille qui possèdent un réseau de transports collectifs plus modeste que celui des autres villes étudiées ici. Les villes macrocéphales hiérarchisées présentent une part modale de l'automobile moyenne (52%), un usage des TC et de la marche à pied relativement élevés (10% et 35%). Les villes monocentriques axialisées sont caractérisées par un fort usage des TC (12%) et une part relativement élevée du vélo (5%). À l'inverse, elles présentent une plus faible utilisation de la marche à pied que les autres villes (30 %). Enfin, les villes monocentriques périurbaines et polycentriques hiérarchisées présentent des caractéristiques similaires : un très faible usage du vélo (2 et 1 %), un usage moyen des TC (8 et 9 %) et de la voiture (50 et 51 %), une forte utilisation de la marche à pied (40 et 39 %). Concernant les distances moyennes parcourues par jour par personne, deux groupes de villes apparaissent. Dans les villes monocentriques axialisées, macrocéphales hiérarchisées et polycentriques hiérarchisées, les distances moyennes parcourues sont plus importantes que la moyenne. À l'inverse, dans les conurbations denses, peu denses et les villes monocentriques périurbaines, cette distance est inférieure à la moyenne. La taille des villes semble ainsi jouer un rôle dans les distances parcourues, les plus grandes

villes faisant partie du premier groupe tandis que les plus petites appartenant au deuxième. Les distances inférieures dans les conurbations denses peuvent s'expliquer par le fait que les déplacements en dehors de la France ne sont pas pris en compte dans l'EMD de Strasbourg.

	Conurbation dense	Conurbation peu dense	Macrocephale hiérarchisée	Monocentrique axialisée	Monocentrique périurbaine	Polycentrique hiérarchisée	Total
Nombre de déplacements par jour et par personne	3,9	3,6	3,7	3,9	3,8	3,8	3,8
Parts modales							
VP	43%	55%	52%	53%	50%	51%	51%
TC	12%	3%	10%	12%	8%	9%	10%
MAP	39%	38%	35%	30%	40%	39%	36%
VÉLO	5%	3%	3%	5%	2%	1%	3%
Distance moyenne parcourue par personne par jour (km)							
Accompagnement	6,7	6,9	7,8	9,1	8,0	8,8	8,0
Commerces et services	6,0	5,0	6,2	6,6	6,1	6,1	6,1
Études	7,3	6,1	8,8	8,3	6,5	8,4	8,0
Loisirs	5,5	4,7	6,3	6,4	5,1	6,7	6,1
Réseau social	6,5	5,9	7,5	7,6	6,2	7,8	7,1
Soins	5,4	5,5	6,8	6,7	6,7	6,6	6,4
Travail	13,5	13,4	16,0	16,2	12,9	15,4	15,1
Tous motifs	10,4	8,3	11,5	12,5	10,2	11,5	11,2

Tableau 7-13 : Données de mobilité par personne en fonction de la structure urbaine dans les différents territoires sélectionnés.

7.4 Synthèse du chapitre 7

À partir de l'analyse statistique des enquêtes déplacements de 19 grandes aires urbaines françaises nous avons mis en évidence plusieurs éléments. Nous avons tout d'abord confirmé le rôle des caractéristiques sociodémographiques sur les pratiques de mobilités. Les variables de genre, de structure des ménages et surtout de type d'individu ont un impact sur le mode, le motif et/ou la distance de déplacement :

- Le genre impacte le mode et les motifs de déplacements. Les hommes utilisent plus la voiture et le vélo, tandis que les femmes utilisent plus les TC et la MAP. Le motif travail est plus fréquent chez les hommes tandis que le motif accompagnement est plus fréquent chez les femmes ;
- La structure du ménage impacte essentiellement les motifs de déplacements. Les couples sans enfants ou les personnes seules se déplacent plus fréquemment pour le motif commerces et services, tandis que les couples avec enfants et les familles monoparentales se déplacent plus pour le motif accompagnement.
- Enfin le type d'individu impacte les trois variables de pratiques de mobilités, le mode, le motif et la distance de déplacement. Les actifs utilisent majoritairement la voiture, sur des distances importantes, avec comme motif principal de déplacement le travail ; les scolaires se déplacent principalement à pied pour le motif accompagnement sur des distances très réduites ; les étudiants se déplacent principalement à pied pour le motif études, sur des distances intermédiaires, enfin les retraités et les inactifs utilisent également principalement la marche à pied pour le motif commerces et services.

Dans ce chapitre nous avons également apporté des éléments sur le rôle de la forme urbaine sur les pratiques de mobilités. Nous avons tout d'abord montré l'existence d'un lien entre la forme urbaine locale (tissu urbain) et le mode et la distance de déplacement :

- Le centre urbain est caractérisé par un usage majoritaire de la MAP et minoritaire de la voiture, avec les distances de déplacements moyennes les plus faibles quel que soit le motif ;
- Le tissu collectif haut est très similaire au centre urbain, avec un usage également majoritaire de la MAP et des distances de déplacements similaires à celles du centre urbain. Il se démarque cependant par une utilisation plus forte des TC.
- Le tissu mixte et dense est caractérisé par un usage majoritaire de la voiture, ainsi qu'un fort usage de la MAP. Les distances de déplacement moyennes sont supérieures à celles des tissus urbains précédents.
- Les tissus individuels dense et peu dense sont caractérisés par le plus fort usage de la voiture et les distances moyennes de déplacement les plus importantes.

L'existence d'un lien entre la forme urbaine globale (structure urbaine) et le mode de déplacement est plus difficile à voir dans cette analyse statistique de villes réelles. Si des différences de parts modales et de distances de déplacements apparaissent entre les villes, la différence importante de taille de ces villes rend l'analyse plus difficile et confirme l'intérêt de recourir à des villes archétypales de taille équivalente dans la suite de ce

travail.

Chapitre 8

Appréhender l'impact énergétique des mobilités quotidiennes à l'aide d'un outil de simulation

Dans le chapitre précédent, nous avons pu acquérir une première compréhension des effets de la forme urbaine sur les pratiques de mobilités quotidiennes des individus en étudiant plusieurs grandes villes françaises. Si des liens entre la forme urbaine locale (les tissus urbains) et les pratiques de mobilités ont pu être mis en avant, le rôle de la structure urbaine reste plus difficile à saisir dans une analyse de villes réelles de taille très différente. Dans ce chapitre, nous souhaitons maintenant modéliser et simuler les pratiques de mobilités quotidiennes dans les trois villes archétypales modélisées dans la partie 2. L'objectif est ainsi de s'intéresser à deux de nos sous-hypothèses à l'échelle croisée du quartier et de l'agglomération (Figure 8-1) :

- Deux individus identiques résidant dans un même tissu auront des pratiques et des consommations liées aux mobilités quotidiennes différentes selon la structure urbaine (sous-hypothèse 1c) ;
- deux individus identiques résidant dans une même structure urbaine auront des pratiques et des consommations liées aux mobilités quotidiennes différentes selon le tissu urbain (sous-hypothèse 1d).

Afin de répondre à cet objectif, les différentes EMD des grandes aires urbaines sélectionnées dans le chapitre précédent nous permettent dans un premier temps de générer une population dans ces villes puis de calibrer et de valider Mobisim-Soft, modèle de simulation sélectionné pour simuler les déplacements quotidiens. Les résultats obtenus sont ensuite présentés et analysés afin de tester nos hypothèses.

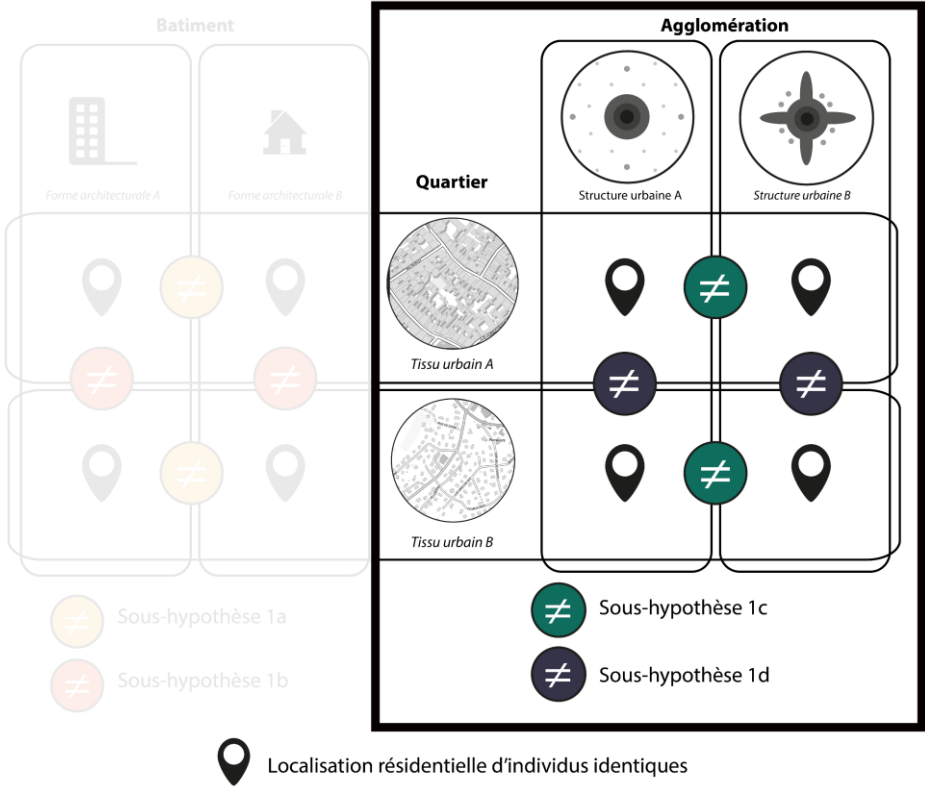


Figure 8-1 : L’objectif du chapitre 8.

8.1 Mobisim Soft

Mobisim soft est une plateforme de simulation des mobilités quotidiennes basée sur un modèle à quatre étapes désagrégé. Une simulation avec Mobisim-Soft sur une zone d'étude nécessite tout d'abord la génération d'une population synthétique d'individus sur cette zone. Trois étapes successives permettent ensuite de simuler les déplacements de chaque individu : la génération des déplacements, la distribution puis le choix modal. Le positionnement et le fonctionnement de Mobisim-Soft sont présentés plus en détail dans la partie 3.2.1.2.

8.1.1 Génération de la population

La génération d'une population d'individus et la localisation de ces individus dans les villes théoriques modélisées sont la première étape nécessaire à la modélisation des mobilités quotidiennes. Afin de connaître le nombre et le type des individus à modéliser, nous nous appuyons sur une analyse des 19 territoires des enquêtes déplacements.

8.1.1.1 Les données utilisées

Afin de connaître le nombre d'individus à modéliser dans les villes théoriques, nous utilisons tout d'abord les données de la BD-Topo produites par l'IGN (version 2018). Pour rappel, la BD Topo est une base de données vectorielle qui fournit des informations à l'échelle de l'objet sur différentes thématiques telles que les bâtiments, les routes, la végétation, les réseaux hydrographiques, etc. Chaque objet est décrit géométriquement (forme et localisation de l'élément) et sémantiquement (nature et caractéristiques de l'élément). Ici, seuls les bâtiments sont utilisés. Nous utilisons également les données carroyées à 200 mètres produites par l'INSEE. Cette base comprend 18 variables sur les caractéristiques des individus au 31 décembre 2010.

Afin de connaître la composition de la population synthétique (la catégorie des individus suivant la typologie construite dans le chapitre 7) nous utilisons les zones fines des 19 enquêtes déplacements, auxquelles nous avons précédemment affecté un type de tissu urbain.

8.1.1.2 La méthode

Nous posons l'hypothèse forte que toutes les mailles d'un même tissu urbain sont identiques, c'est-à-dire qu'elles possèdent le même nombre d'individus de chaque catégorie. Les données carroyées de l'Insee nous indiquent le nombre d'habitants de chaque carreau, mais ce carroyage ne correspond pas à notre maillage (de 250 m de résolution). La population contenue dans chaque carreau de l'Insee est donc ventilée dans les bâtiments en fonction de leur volume. La population est ensuite réagrégée dans les mailles que nous avons construites (Figure 8-2).

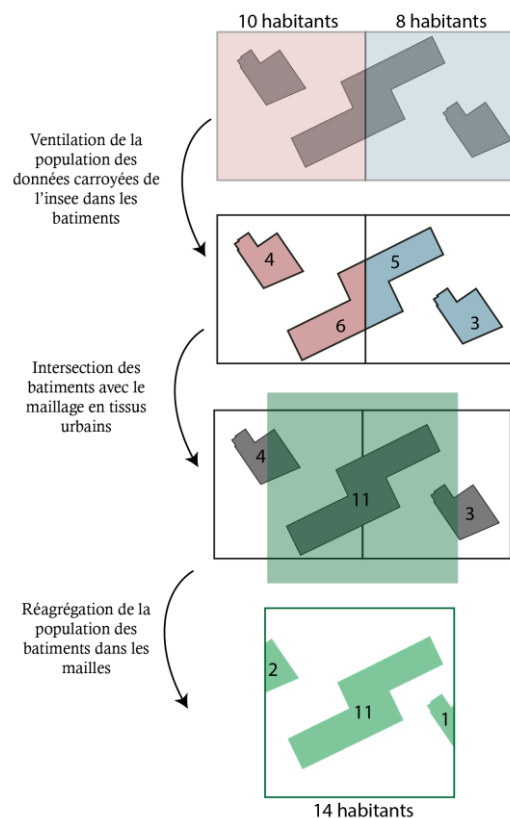


Figure 8-2 : Méthodologie d’affectation de la population des données carroyées Insee au maillage en tissus urbains construit dans la thèse.

À partir des valeurs de population obtenues dans chaque maille de tissu urbain, nous retenons la moyenne d’individus pour chaque tissu urbain (Tableau 8-1).

Tissu urbain	Nombre d’individus par maille	Densité (hab/km ²)
Centre urbain	630	10080
Mixte et dense	266	4258
Collectif haut	284	4550
Individuel dense	103	1654
Individuel peu dense	24	376

Tableau 8-1 : Le nombre d’habitants affectés à chaque maille de tissu urbain.

Ainsi, à titre d’exemple, chaque maille de centre urbain dans les trois villes théoriques contiendra 630 habitants. Nous conservons ici le tissu d’activités, pour pouvoir reproduire l’ensemble des déplacements des enquêtes déplacements et avoir une meilleure calibration du modèle. Les déplacements simulés au départ de ce tissu ne seront cependant pas pris en compte dans l’analyse des résultats de simulation, le tissu d’activités n’étant pas considéré comme un tissu résidentiel dans nos villes archétypales.

Les zones fines des enquêtes déplacements nous renseignent également sur la composition de la population des différents tissus urbains. De la même manière que pour la détermination du nombre d’habitants, nous

utilisons la valeur moyenne d'individus de chaque catégorie par tissu urbain. Ainsi, chaque maille de type centre urbain contiendra par exemple 38 scolaires, 47 étudiants, 50 retraités, 44 inactifs, 4 artisans, 22 cadres, 25 professions intermédiaires, 36 employés et 18 ouvriers (Tableau 8-2).

		Centre urbain	Mixte et dense	Collectif haut	Individuel dense	Individuel peu dense
Scolaire	Part	11%	13%	13%	16%	16%
	Nombre d'individus par maille	38	68	36	16	4
Étudiant	Part	14%	13%	16%	12%	11%
	Nombre d'individus par maille	47	87	35	12	3
Retraité	Part	18%	22%	18%	21%	19%
	Nombre d'individus par maille	50	113	58	22	4
Inactif	Part	17%	11%	15%	8%	8%
	Nombre d'individus par maille	44	110	28	8	2
Artisan	Part	2%	2%	1%	2%	3%
	Nombre d'individus par maille	4	13	5	2	1
Cadre	Part	12%	9%	8%	10%	9%
	Nombre d'individus par maille	22	74	25	10	2
Profession intermédiaire	Part	11%	11%	9%	11%	11%
	Nombre d'individus par maille	25	69	28	12	3
Employé	Part	10%	13%	13%	13%	16%
	Nombre d'individus par maille	36	66	33	14	4
Ouvrier	Part	5%	6%	6%	7%	7%
	Nombre d'individus par maille	18	31	17	7	2

Tableau 8-2 : La composition par catégories d'individus de chaque maille de tissu urbain.

8.1.1.3 La population générée

Le tableau suivant présente la population totale générée dans les différents tissus des trois villes archétypales (Tableau 8-3). La ville monocentrique périurbaine compte 284 868 habitants, la ville monocentrique axialisée 358 237 et la ville polycentrique hiérarchisée 473 219 habitants. Si les trois villes présentent la même surface bâtie, cette différence de population due aux différences de composition en tissus urbains, sera à prendre en compte dans l'analyse des résultats.

Ville	Tissu	Nombre d’habitants	% du total
Monocentrique axialisée	Centre urbain	49765	14
	Mixte et dense	90959	25
	Collectif haut	31836	9
	Individuel dense	127541	36
	Individuel peu dense	58136	16
	Total	358 237	100
Monocentrique périurbaine	Centre urbain	49135	17
	Mixte et dense	60639	21
	Collectif haut	31836	11
	Individuel dense	85027	30
	Individuel peu dense	61230	21
	Total	287 868	100
Polycentrique hiérarchisée	Centre urbain	73703	16
	Mixte et dense	152395	32
	Collectif haut	47186	10
	Individuel dense	167784	35
	Individuel peu dense	32150	7
	Total	473 219	100

Tableau 8-3 : La population générée dans les trois villes archétypales.

La population générée détaillée par catégories d’individus est également disponible en annexe (Annexe 25).

8.1.2 Usage du modèle Mobisim-soft pour simuler les mobilités quotidiennes

Le modèle de mobilité Mobisim-Soft permet de modéliser les déplacements d’un individu sur une période donnée. Cette modélisation se base sur plusieurs étapes qui se réfèrent en premier lieu aux activités des individus. Les déplacements associés à ces activités sont alors simulés avec un modèle qui se rapproche des modèles à quatre étapes, classiques pour ce genre d’opérations (voir partie 3.3.1). Notre modèle diffère cependant de ce schéma classique puisque nous n’affectons pas le trafic sur le réseau. Nous faisons en effet le choix de ne pas prendre en compte les phénomènes de congestion dans notre modélisation des consommations énergétiques. Si ce choix amène des limites à notre travail, le modèle en est grandement

simplifié (pas de prise en compte des horaires et des capacités des voiries notamment). La calibration²⁴ des trois étapes a été réalisée avec une partie des données des 19 enquêtes déplacements. Les données globales étant suffisamment importantes, nous les avons séparées en deux jeux de données distincts, procédé souvent utilisé en modélisation. Nous obtenons ainsi :

- Un jeu de calibration du modèle : 125 622 chaînes de déplacements (83 % du total) sélectionnées parmi l'ensemble des types de villes. Le comportement des individus modélisés est « *standard* », il ne dépend pas de la forme globale.
- Un jeu de validation (ou jeu test) : nous sélectionnons de manière aléatoire des déplacements dans les villes de types polycentriques (1/3), monocentriques axialisées (1/3) et monocentriques périurbaines (1/3) soit un total de 26 193 chaînes de déplacements (27 % du total).

8.1.2.1 La génération des déplacements

La première étape du modèle correspond à la génération des déplacements qui vise à déterminer le nombre de déplacements réalisés par chaque individu. Plusieurs choix ont été faits au regard des objectifs. Le premier choix a été de segmenter les déplacements en huit motifs principaux et en dix-neuf sous-motifs qui correspondent aux différents motifs de déplacements des enquêtes déplacements que nous avons sélectionnés dans le chapitre précédent. La distribution des déplacements et la répartition modale sont en effet différentes selon les motifs. Le second choix est de travailler à l'échelle des chaînes de déplacements (ou demi-chaîne²⁵) et non à celle de chaque déplacements (Figure 8-3).

²⁴ Le principe de la calibration d'un modèle est de parvenir à reproduire un jeu de données en estimant un certain nombre de paramètres du modèle (Bonnell, 2002)

²⁵ Une chaîne de déplacement correspond à un déplacement du domicile à une destination pour un motif principal donné et à un déplacement retour vers le domicile. Une demi-chaîne correspond au trajet aller ou au trajet retour.

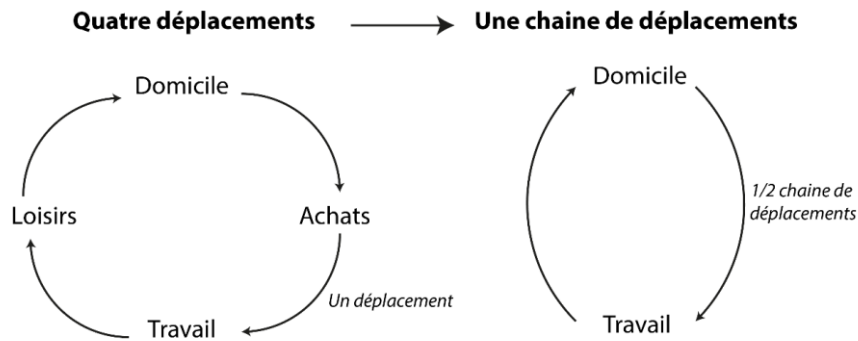


Figure 8-3 : Des déplacements aux chaînes de déplacements.

Les différents motifs sont ordonnés les uns par rapport aux autres et seul le motif principal de la sortie est conservé (Tableau 8-4).

Motifs principaux	Classement
Travail	1
Étude	2
Soin	3
Réseau social	4
Loisirs	5
Commerces et services	6
Accompagnement	7

Tableau 8-4 : L’ordre d’importance des différents motifs de déplacements.

Le motif « travail » et le motif « étude » sont ainsi prioritaires sur l’ensemble des autres motifs de déplacements. Le classement des sous-motifs de déplacement est disponible en annexe (Annexe 26).

Enfin, nous avons fait le choix de modéliser les déplacements sur une période d’une journée (24 heures), qui correspond à une journée de la semaine comme un mardi ou un jeudi. À partir de ces choix, nous utilisons un modèle d’émission normatif, c’est-à-dire que le nombre de chaînes de déplacement est un nombre moyen par jour par motif et par catégorie d’individu. La calibration du modèle d’émission a été permise grâce à l’exploitation du jeu de calibration notre disposition (Figure 8-4).



Figure 8-4 : Nombre de chaînes de déplacements générées par jour par motif et par catégorie d'individu.

8.1.2.2 Distribution des déplacements

La distribution des déplacements classique d'un modèle à quatre étapes correspond au choix de la destination du déplacement dans la séquence des choix de l'individu. Dans notre cas, les origines et les destinations correspondent aux centroïdes des différentes mailles. Nous utilisons un modèle de potentiel, c'est-à-dire que nous ne sélectionnons pas une unique destination, mais calculons une probabilité de fréquentation à toutes les destinations possibles par motif et par catégorie de personne. Cette probabilité est calculée selon un modèle d'interaction spatiale qui est un modèle gravitaire basé sur le modèle de Huff. Concernant la masse des destinations, elle correspond pour chaque maille au nombre d'emplois pour le motif principal « *travail* » et au nombre d'habitants pour le motif principal « *réseau social* ». Pour les autres motifs de déplacements, la masse d'une destination correspond au nombre d'aménités qui peuvent générer un déplacement pour ce motif. Le motif « *soin* » peut par exemple se réaliser à deux types de destinations différents, qui sont les aménités de santé de recours mensuel et les aménités de santé de recours rare (Tableau 8-5).

Motif principal	Achat quotidien	Achat hebdomadaire	Achat mensuel	Achat rare	Accompagnement quotidien	Enseignement quotidien	Loisirs hebdomadaires	Loisirs mensuels	Santé mensuel	Santé rare	Emplois	Nombre d'habitants
Travail											X	X
Étude					X	X						
Soin									X	X		
Réseau social												X
Loisirs							X	X				
Commerces et services	X	X	X	X								
Accompagnement					X							

Tableau 8-5 : Correspondance entre les motifs de déplacements et les aménités (commerces et services).

Pour rappel, ces différentes valeurs (nombre d’emplois, de commerces et services) ont été définies pour chaque maille dans la partie 2 (voir partie 6.1.2). Concernant les distances, l’observation de leur distribution nous indique qu’elles suivent globalement une loi normale. Nous utilisons donc comme fonction de résistance du modèle gravitaire le log de la distance à vol d’oiseau pondérée par une loi normale (loi log normale). La calibration du modèle de distribution a été permise grâce à l’exploitation du jeu de calibration à notre disposition (Figure 8-5).

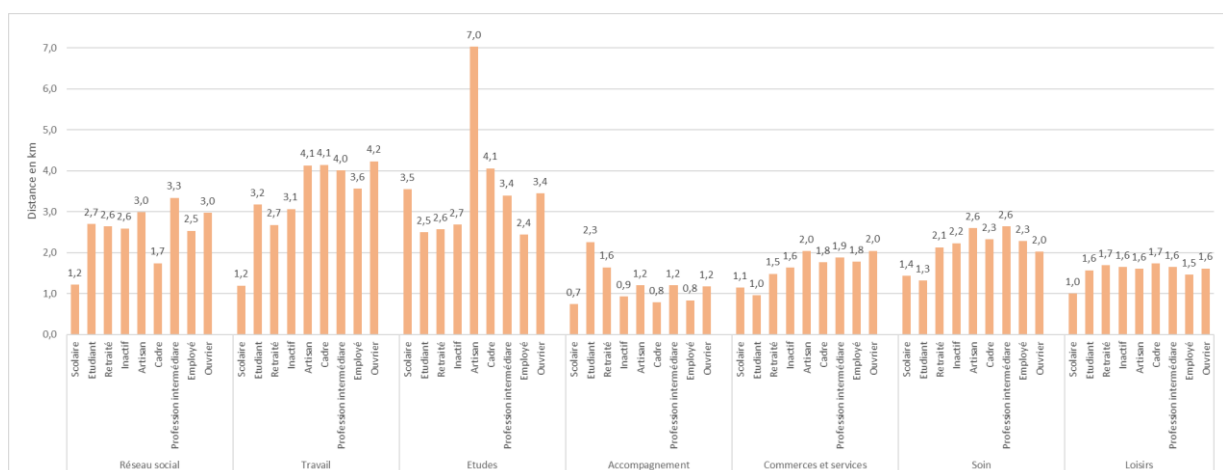


Figure 8-5 : Distances moyennes aux différentes destinations par motif principal pour chaque catégorie d’individu.

8.1.2.3 Choix modal

Cette étape prend place après la distribution dont elle utilise les sorties, les matrices origines-destinations. Il est classique d’organiser les facteurs explicatifs du choix du mode en trois groupes relatifs à l’offre de

transport, aux caractéristiques du déplacement et aux caractéristiques de l'individu ou du ménage. Dans notre modèle, l'offre de transports n'est pas prise en compte. Les caractéristiques du déplacement correspondent à la distance parcourue entre l'origine et la destination, mais également au motif du déplacement. Les caractéristiques de l'individu correspondent à sa catégorie. Deux choix principaux sont effectués dans cette étape. Tout d'abord, les modes de déplacements implémentés dans le modèle sont la MAP, le vélo, les TC et la voiture particulière (conducteur). Nous faisons également le choix d'affecter le même mode aux déplacements aller (domicile vers lieu d'activité) et retour (lieu d'activité vers domicile). Si ces choix constituent des limites à notre modèle, ils permettent de simplifier le processus de modélisation. Un modèle logistique multinomial permet de réaliser la répartition modale. La régression logistique possède en effet plusieurs avantages. Les conditions d'utilisation de la régression logistique sont moins restrictives que celles de l'analyse discriminante linéaire (pas d'hypothèse de multi normalité ni d'homoscédasticité à formuler sur les variables explicatives) ; les modèles produits sont précis, concis et aisément programmables dans un langage informatique ; les coefficients sont facilement interprétables (odd-ratios). La calibration du modèle logit qui consiste à estimer les coefficients de la fonction de chacun des modes de transports, est réalisée avec le jeu de calibration à notre disposition.

8.1.3 Validation du modèle

1 235 856 chaînes de déplacements ont été simulées au total dans les trois villes. La validation a maintenant pour objectif de comparer les simulations du modèle avec un jeu d'informations qui n'a pas été utilisé lors de sa calibration. Nous utilisons ici le jeu de validation construit à partir des 19 enquêtes déplacements.

8.1.3.1 Test de la significativité globale du modèle

Afin de tester la significativité du modèle, plusieurs tests statistiques existent, tels que le test du rapport de vraisemblance, les pseudos R^2 et l'Anova. Ces différents tests ont été réalisés en utilisant le langage R et l'interface RStudio. Les résultats détaillés des différents tests sont disponibles en annexe (Annexe 27).

Test du rapport de vraisemblance

Ce test du rapport de vraisemblance consiste à comparer deux déviations. Ainsi, l'objectif est de confronter celle du modèle étudié à celle du modèle trivial (constitué de la seule constante). Il va permettre de comparer l'adéquation de l'ajustement de deux modèles afin de déterminer celui qui offre le meilleur ajustement pour les données utilisées. Ce test indique que notre modèle est globalement très significatif, la prise en compte de la distance, du motif et de la catégorie de l'individu augmente considérablement la précision de notre modèle.

Les pseudos R^2 et l'Anova

Les pseudos R^2 permettent de vérifier que notre modèle fait mieux que le modèle trivial, c'est-à-dire qu'il présente une vraisemblance plus favorable. Les R^2 de Mc Fadden et de Nagelkerke sont les plus simples à appréhender, lorsque la régression ne sert à rien, l'indicateur vaut 0, lorsqu'elle est parfaite, l'indicateur vaut 1. Ici, avec R^2 de Mc Fadden de 0,39 et un R^2 de Nagelkerke de 0,65 notre modèle se démarque du modèle

trivial. Enfin, la réalisation d'une Anova (analyse de la variance), qui permet de tester l'effet global des variables sur le modèle, nous montre que toutes les variables (la distance, le motif et la catégorie d'individu) impactent significativement le modèle.

8.1.3.2 Évaluation des classifieurs

Afin de valider notre modèle, une évaluation des classifieurs est réalisée à partir des données de validation, n'ayant pas participé à la construction du modèle. Les indicateurs calculés par la suite sont donc non biaisés.

La matrice de confusion et le taux d'erreur

La matrice de confusion confronte les valeurs observées de la variable dépendante avec celles qui sont prédites, puis comptabilise les bonnes et les mauvaises prédictions. Elle permet à la fois d'appréhender la quantité de l'erreur et de rendre compte de la structure de l'erreur (de la manière de se tromper du modèle). Le taux d'erreur est calculé à partir de cette matrice, il est égal au nombre de mauvais classements rapportés à l'effectif total. Ici, le taux d'erreur du modèle est faible, avec moins d'un quart (24 %) des valeurs mal classées. La lecture de la matrice nous indique que ces erreurs sont principalement dues à un mauvais classement des déplacements effectués en TC et en voiture. Cependant, en comparaison avec le taux d'erreur de la matrice du modèle trivial (qui est de 49 %), nous pouvons conclure que notre modèle de régression est largement meilleur.

Test d'indépendance du khi2 de Pearson entre valeurs observées et valeurs prédites

Le test du khi2 sert à apprécier l'existence ou non d'une relation entre deux caractères au sein d'une population, lorsque ces caractères sont qualitatifs. Nous l'appliquons aux valeurs observées et aux valeurs prédites de notre modèle. La p-value est inférieure à $2.2e-16$ et le V de Cramer est à 0,58, nous pouvons donc conclure qu'il existe une relation forte entre les deux variables, valeurs observées et valeurs prédites sont très liées.

Les odds-ratio

Les paramètres à estimer dans un modèle logistique logit sont les coefficients de la combinaison linéaire exprimant le logit de la probabilité. L'estimation de ces paramètres se fait par la méthode du maximum de vraisemblance. Ces coefficients sont trouvés par une méthode numérique itérative (algorithme de Newton-Raphson). Dans le cadre d'un modèle logistique, généralement on ne présente pas les *coefficients* du modèle mais leur valeur exponentielle, cette dernière correspondant en effet à des *odds ratio (OR)*, également appelés *rapports des cotes*. Un *odds ratio* de 1 signifie l'absence d'effet. Un *odds ratio* largement supérieur à 1 correspond à une augmentation du phénomène étudié et un *odds ratio* largement inférieur à 1 correspond à une diminution du phénomène étudié. La lecture de ces odd-ratios nous permet de voir les éléments suivants (Figure 8-6) :

- La distance joue un rôle important sur l'utilisation de la MAP et de la voiture. Elle impacte également légèrement l'utilisation des TC. Enfin le vélo est peu impacté par la distance.

- Le type d'individu joue également un rôle sur l'utilisation des différents modes. Les modalités « scolaires » et « étudiants » sont les plus impactantes, notamment sur l'usage de voiture et des TC.
- Les motifs de déplacements sont également impactant, notamment sur l'usage de la voiture et des TC. Le vélo n'est pas impacté par le motif. La MAP est impactée uniquement par le motif « Promenade, lèche-vitrine ».

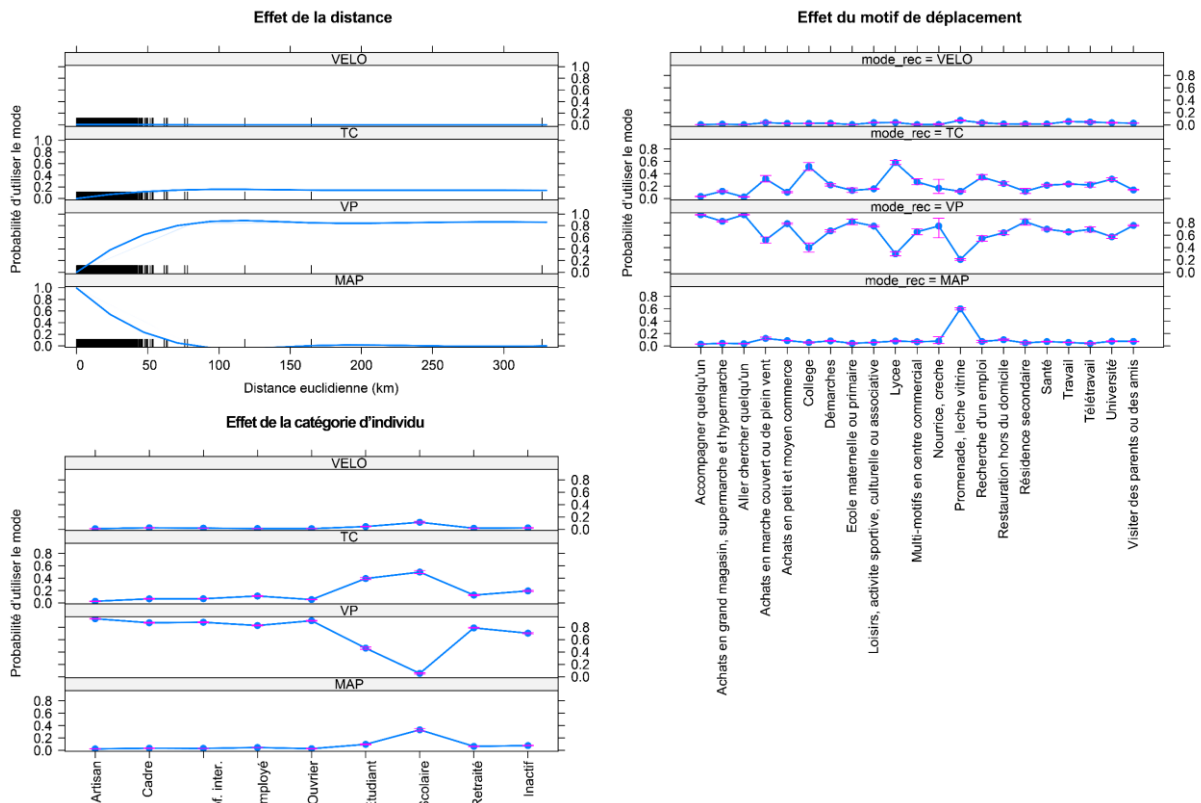


Figure 8-6 : Les effets des différentes variables du modèle sur l'utilisation des modes de déplacement.

8.1.3.3 Comparaison de la distance euclidienne moyenne d'un déplacement aller

Par catégories d'individu

Au global, la distance moyenne d'un déplacement aller est de 1,90 km dans la simulation, contre 1,92 km dans les données de validation soit une différence de 20 mètres. Concernant la distance moyenne d'un déplacement par catégories d'individu, nous constatons une légère surestimation dans la simulation pour les artisans, les employés, les inactifs, les retraités et les scolaires (comprise entre 2 et 36 mètres). À l'inverse, les autres catégories d'individus présentent des distances moyennes légèrement plus faibles dans la simulation, avec notamment les professions intermédiaires (67 mètres d'écart). Ces écarts restent très faibles, représentant moins de 2 % de différence avec les données de validation (Figure 8-7 et Tableau 8-6).

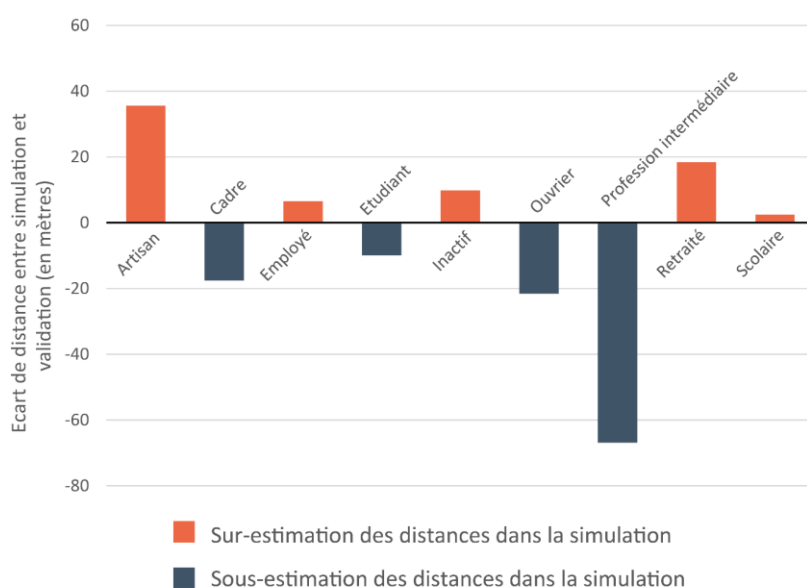


Figure 8-7 : Comparaison des distances moyennes d’un déplacement par catégorie d’individus.

Catégorie d'individu	Calibration	Validation	Simulation	Écart validation/simulation		Simulation	
	Distance km			Distance en m	%	Nombre de déplacements	Part des déplacements totaux
Artisan	2,73	2,54	2,58	36	1%	31404	3%
Cadre	3,04	2,84	2,82	-18	-1%	135518	11%
Employé	2,30	2,20	2,21	7	0%	195706	16%
Étudiant	2,19	1,98	1,97	-10	-1%	141999	11%
Inactif	1,36	1,34	1,35	10	1%	152251	12%
Ouvrier	2,94	2,81	2,78	-22	-1%	88544	7%
Prof. Int.	2,79	2,81	2,74	-67	-2%	158647	13%
Retraité	1,47	1,52	1,54	18	1%	201970	16%
Scolaire	0,96	0,90	0,91	2	0%	129817	11%
						1235856	100%

Tableau 8-6 : Écarts entre les distances moyennes d’un déplacement en fonction de la catégorie d’individu.

Par motifs de déplacements

Concernant la distance moyenne des déplacements selon leurs motifs, les écarts de distances restent minimes entre les données simulées et celles de validation. Ils ne dépassent pas 241 mètres et 12 % de différence. Les motifs « études », « réseau social » et « travail » présentent une distance moyenne légèrement surestimée (de respectivement 241, 135 et 45 mètres) tandis que les autres motifs présentent des distances moyennes légèrement plus faibles (Figure 8-8 et Tableau 8-7).

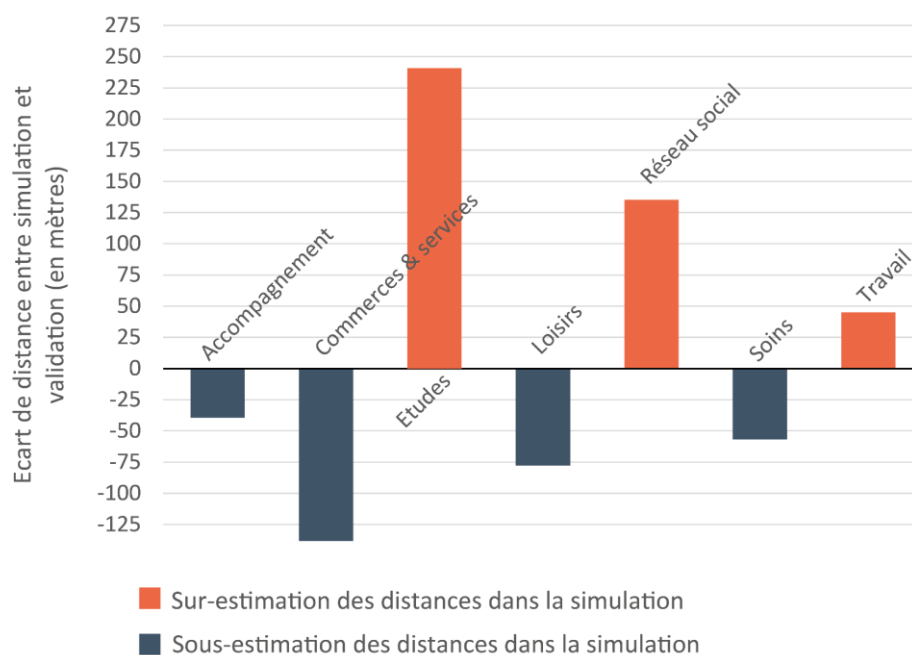


Figure 8-8 : Comparaison des distances moyennes d'un déplacement par motif principal.

Motif de déplacement	Calibration	Validation	Simulation	Écart validation / simulation		Simulation	Simulation
	Distance km			Distance en m	%	Nombre de déplacements	Part des déplacements totaux
Accompagnement	0,85	0,91	0,87	-40	-4%	198885	16%
Commerces & services	1,44	1,37	1,24	-138	-10%	236562	19%
Études	1,94	1,94	2,18	241	12%	121197	10%
Loisirs	1,53	1,62	1,55	-78	-5%	169843	14%
Réseau social	1,75	1,83	1,96	135	7%	121373	10%
Soins	1,97	2,18	2,13	-57	-3%	43198	3%
Travail	4,30	4,06	4,11	45	1%	344797	28%
						1235856	100%

Tableau 8-7 : Écarts entre les distances moyennes d'un déplacement en fonction du motif.

Enfin, au niveau détaillé du binôme motif-agent, seuls dix binômes présentent des distances moyennes avec un écart aux données de validation supérieur à 25 %. Ils ne représentent que 3,8 % des chaînes de déplacements totales simulées. À l'inverse, 13 couples agent-motif présentent des distances moyennes avec un écart aux données de validation inférieur à 5 %. Ils représentent plus de la moitié des chaînes de déplacements totales simulées. Les différents écarts entre les distances moyennes en fonction du binôme motif-agent sont disponibles en annexe (Annexe 28).

8.1.3.4 Comparaison des répartitions modales

Au global, la répartition modale apparaît similaire. La MAP est légèrement sous représentée dans la simulation avec 0,2 point d’écart avec les données de validation. La voiture et le vélo sont à l’inverse légèrement surestimés, avec 0,12 et 0,09 point d’écart de parts modales (Figure 8-9 et Tableau 8-8).

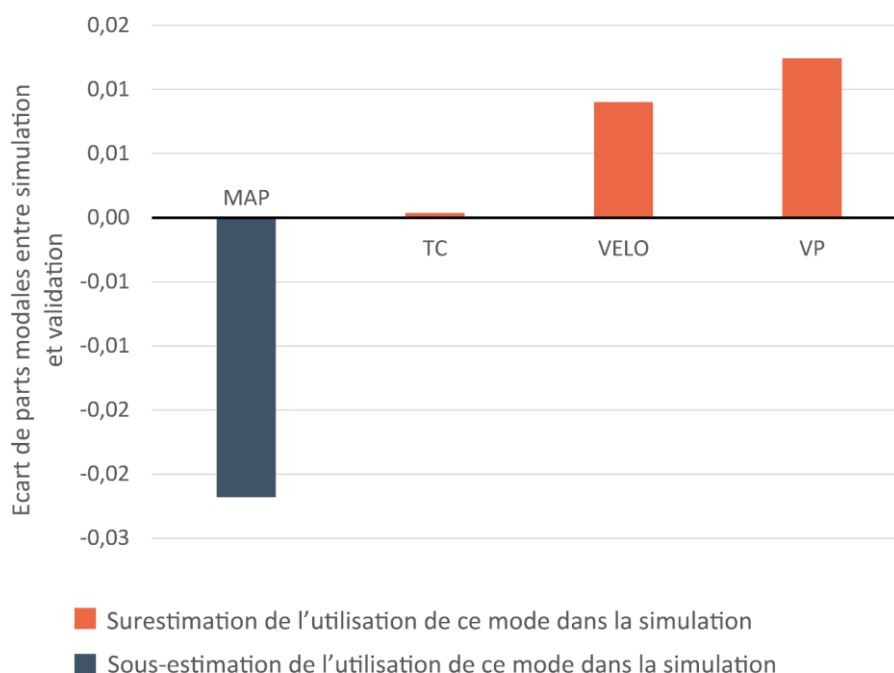


Figure 8-9 : Comparaison des parts modales.

Mode	Part modale	Part modale	Part modale	Écart simulation / validation
	Calibration	Validation	Simulation	
MAP	0,33	0,33	0,31	-0,02
TC	0,13	0,13	0,14	0,00
VÉLO	0,03	0,03	0,04	0,01
VP	0,50	0,51	0,52	0,01

Tableau 8-8 : Écarts entre les parts modales.

Répartition modale par catégorie d’individus

Concernant la répartition modale par catégories d’individu, les écarts entre parts modales restent minimales : ils ne dépassent pas 0,07 point de différence (positif ou négatif). Pour les artisans, les retraités et les employés, la MAP est légèrement sous-estimée au profit de la voiture. Pour les étudiants et les scolaires, la voiture et les TC sont sous-estimés au profit de la MAP et du vélo. Globalement, ce sont les retraités et les étudiants qui ont les parts modales les plus éloignées de celles des données de validation (respectivement 0,15 et 0,12 point d’écart tous modes confondus) (Figure 8-10).



Figure 8-10 : Comparaison des parts modales selon la catégorie d’individus.

Répartition modale par motif de déplacement

Concernant la répartition modale par motif de déplacement, les écarts sont minimes : ils ne dépassent pas 0,06 point de différence. Pour les motifs soins, commerces et services et réseau social, la marche à pied et les transports collectifs sont sous-estimés au profit de la voiture et du vélo. Pour le motif travail, la marche à pied est sous-estimée au profit des trois autres modes. Pour les motifs accompagnement et loisirs, les transports collectifs et la voiture sont sous-estimés au profit des modes actifs. Globalement, les écarts les plus importants concernent les motifs commerces et services et soins (respectivement 0,12 et 0,11 point d’écart tous modes confondus) (Figure 8-11).

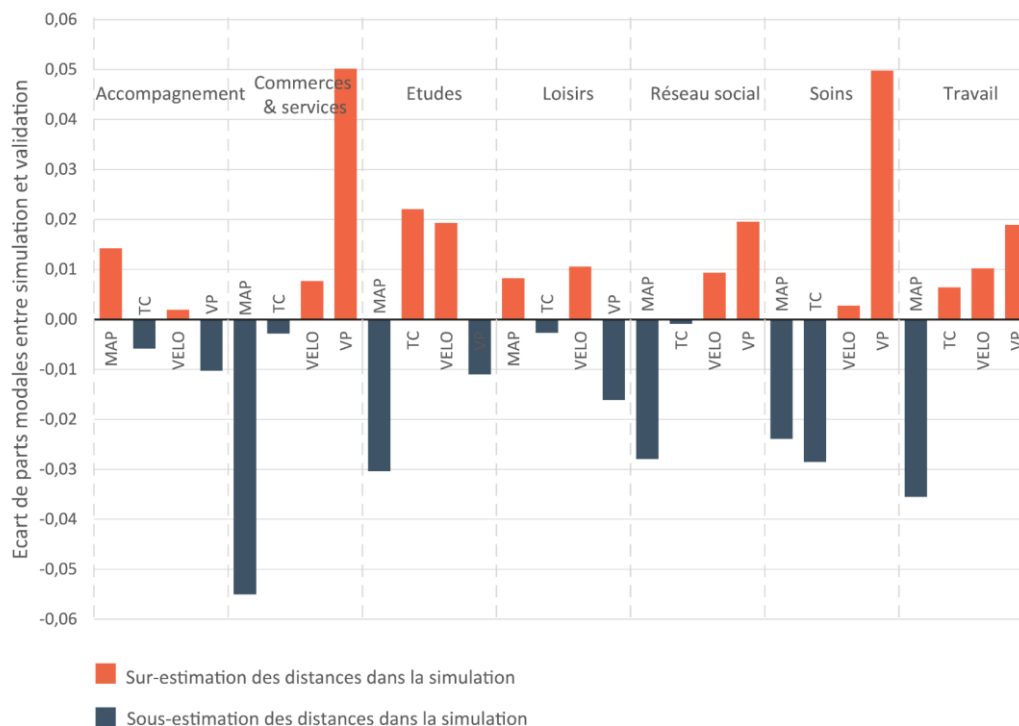


Figure 8-11 : Comparaison des parts modales selon le motif principal de déplacement.

Enfin, au niveau détaillé du binôme catégorie d'individu - motif (Annexe 29), nous constatons que 113 binômes présentent des parts modales avec un écart aux données de validation supérieur à 25 %. Ces binômes représentent cependant seulement 9,2 % des chaînes de déplacements totales simulées. À l'inverse, 46 couples agents-motifs présentent des parts modales avec un écart aux données de validation inférieur à 5 %. Ils représentent près de la moitié des chaînes de déplacements totales simulées (49,2 %).

8.1.4 Les forces et les faiblesses du modèle

La présentation de Mobisim-Soft et des différentes étapes de calibration et de validation nous permet de dégager ses principales forces ainsi que certaines limites à prendre en compte dans la lecture des résultats. Les principales limites du modèle sont les suivantes :

- Contrairement aux modèles à quatre étapes classiques, nous n'affectons pas les déplacements sur le réseau. Cela permet en effet une modélisation plus simple et plus rapide, sans bouclage. Ce choix entraîne cependant un inconvénient majeur qui est la non-prise en compte de la capacité des réseaux de transports. La congestion, les flux de marchandises et les flux externes d'échanges et de transit ne sont donc pas pris en compte dans le modèle. La temporalité de la journée n'intervient ainsi pas dans nos modélisations.
- La seconde limite du modèle Mobisim-Soft est l'utilisation de chaînes de déplacements avec un seul motif et un seul mode de déplacement. Il n'est ainsi pas possible de simuler des déplacements multimodaux.

Les principales forces du modèle sont les suivantes :

- Le modèle est a été calibré finement à partir des données d'enquêtes déplacements : en sortie du modèle, il est possible de connaître pour l'ensemble des ménages du territoire leurs caractéristiques et leurs comportements de mobilité quotidienne.
- Les caractéristiques du lieu de résidence (forme urbaine à ses différentes échelles) ne sont pas prises en compte dans la calibration du modèle. Ce point est particulièrement important au regard de notre objectif qui est de réussir à isoler et à mettre en évidence le rôle de la forme urbaine sur les pratiques de mobilité. Les individus d'une même catégorie ont donc un comportement identique, ce qui nous permet dans les simulations de voir uniquement l'effet de leur localisation résidentielle sur leurs pratiques de mobilités.
- Ces comportements par catégories d'individus sont standardisés, c'est-à-dire qu'ils ne sont pas spécifiques à un seul territoire. Ce sont des comportements « *moyens* » de français résidants dans une grande aire urbaine.

8.2 Présentation et analyses des résultats de simulation

Dans cette section, les résultats des simulations réalisées avec Mobisim-Soft sont présentés et analysés afin de tester nos hypothèses. Pour rappel, les analyses suivantes ne tiennent pas compte des déplacements simulés au départ des tissus d’activités.

8.2.1 Forme urbaine et pratiques de mobilités quotidiennes

8.2.1.1 L’impact de la forme urbaine locale sur les pratiques de mobilités

Analyse générale

L’analyse des parts modales pour les différents tissus urbains montre l’existence d’une relation entre les tissus urbains de résidence et les pratiques de mobilités (Figure 8-12). Un tableau détaillé des distances moyennes de déplacement parcourues par personne par modes est également disponible en annexe (Annexe 30).

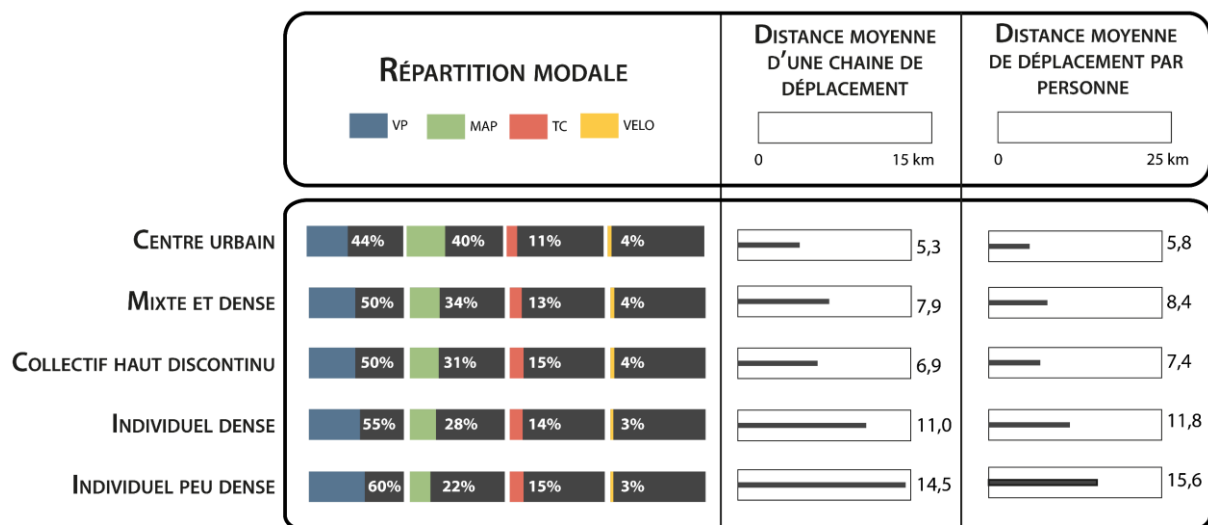


Figure 8-12 : Les principales caractéristiques de mobilités quotidiennes des tissus urbains.

Ainsi, des variations importantes des parts modales et des distances de déplacements sont visibles entre les différents tissus urbains. Le centre urbain présente la plus faible utilisation de l’automobile (44 %) mais à l’inverse la plus forte utilisation de la MAP (40 %). Les distances moyennes des déplacements au départ de ce tissu sont les plus faibles, avec une distance moyenne de chaîne de déplacement de 5,3 km et une distance moyenne de déplacement journalière par personne de 5,8 km. Ces pratiques de mobilités s’expliquent par la forte densité d’aménités dans ce tissu, que ce soit au niveau des emplois ou des commerces et services. Les tissus mixte et dense et collectif haut sont très similaires, avec une part modale de l’automobile de 50 % et

une part modale de la MAP plus réduite que dans le centre urbain (34 % et 31 %). Les distances moyennes sont cependant plus importantes dans le tissu mixte et dense que dans le collectif haut. Cette différence s'explique par une plus forte densité d'aménités dans le tissu collectif haut discontinu, qui favorise les déplacements courts. Le tissu individuel dense présente une part modale de l'automobile plus élevée (55 %). Les distances moyennes sont également beaucoup plus importantes. Elles sont ainsi environ deux fois supérieures à celle du tissu centre urbain (11 km et 11,8 km). La prédominance de l'automobile et ces distances élevées s'expliquent par la faible densité d'aménités dans ce tissu urbain, combiné à une distance au centre importante. Enfin, le tissu individuel peu dense est celui qui présente la plus importante utilisation de l'automobile, avec six déplacements sur dix réalisés avec ce mode. Les distances moyennes sont également les plus élevées, environ trois fois plus importantes que celles du centre urbain (14,5, et 15,6 km). Ce tissu est en effet celui qui présente la densité d'aménités la plus faible et la distance au centre la plus élevée. Il est ainsi possible de dresser une synthèse des effets de la forme urbaine locale sur les pratiques de mobilités (Figure 8-13).

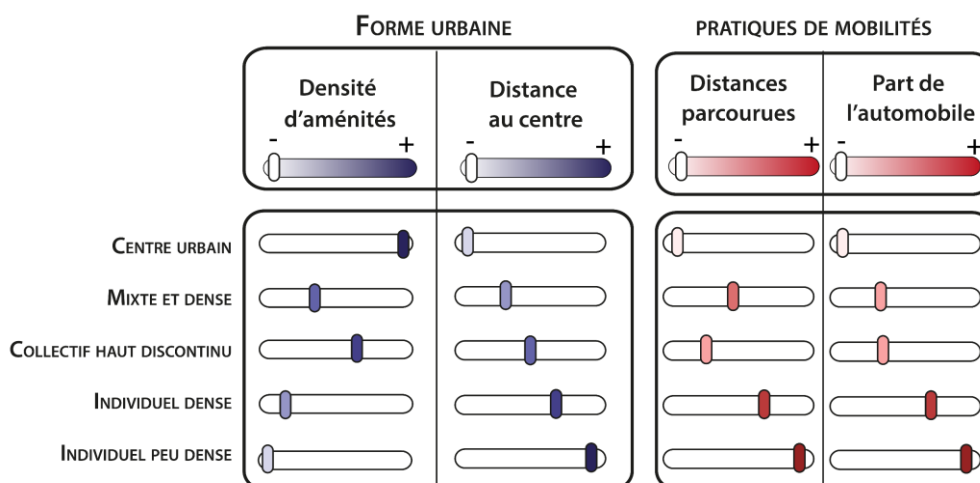


Figure 8-13 : L'impact de la forme urbaine locale sur les pratiques de mobilités.

Analyse détaillée par catégories d'individus et par motifs de déplacements

L'ensemble des caractéristiques des pratiques de mobilités des individus pour tous les motifs de déplacements est présenté en annexe (Annexe 31).

- Les scolaires

Les scolaires se déplacent principalement en MAP quel que soit le tissu urbain. L'utilisation de ce mode diminue cependant avec l'augmentation de la distance au centre. Le tissu centre urbain présente ainsi un usage de la MAP de 77 % contre seulement de 59 % dans le tissu individuel dense. Cette diminution se fait au profit des TC, dont la part modale passe de 18 % dans le centre urbain à 34 % dans l'individuel peu dense. Concernant l'utilisation du vélo, celle-ci est équivalente dans tous les tissus urbains, avec une part modale comprise entre 5 et 6 %. On note une répartition modale équivalente entre les tissus collectif haut et individuel dense et presque similaire avec celle du tissu mixte et dense. Cela peut s'expliquer par une densité d'aménités

de type « *accompagnement quotidien* » très comparables dans ces tissus (peu dense), ce que confirme l’observation des distances moyennes parcourues. Elles sont en effet très similaires dans les trois tissus pour le motif principal d’accompagnement (comprises entre 2,4 et 2,8 km par jour par personne). Des différences plus importantes de distances parcourues pour ce motif apparaissent dans les deux autres tissus urbains. Dans le centre urbain, cette distance moyenne est plus faible avec seulement 2,9 km parcourus par jour. À l’inverse, elle est plus élevée dans le tissu individuel peu dense avec 4,5 km parcourus par jour en moyenne par individu. Malgré tout, cette distance reste globalement faible, les établissements scolaires étant présents dans l’ensemble du territoire. La figure suivante illustre ces différents éléments d’analyse (Figure 8-14).

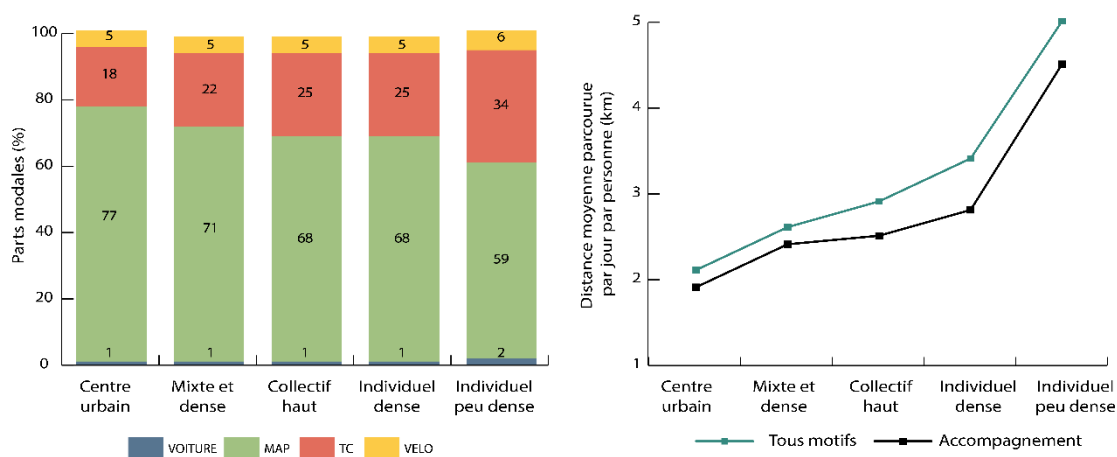


Figure 8-14 : Parts modales de déplacements et distance moyenne de déplacement chez les scolaires en fonction du tissu urbain de résidence.

- Les étudiants

Les étudiants se déplacent majoritairement en TC quelle que soit leur localisation résidentielle. Cependant cet usage tend à augmenter avec l’éloignement au centre, la part modale des TC passant de 34 % dans le centre urbain à 46 % dans le tissu individuel peu dense. Un gradient croissant de la part modale de l’automobile est également visible. L’usage de la voiture passe ainsi de 17 % au centre à 27 % dans le tissu individuel peu dense. Cette augmentation de l’utilisation des TC et de la voiture se fait au détriment de la MAP, dont la part modale est presque divisée par deux entre le centre urbain (42 %) et l’individuel peu dense (22 %). Les étudiants sont également ceux qui utilisent le plus le vélo, avec une part modale similaire quelle que soit le tissu urbain, comprise entre 5 et 6 %. Les distances moyennes de déplacements pour le motif principal (étude) sont plus élevées que pour les scolaires. Elles sont ainsi comprises entre 6,5 et 15,7 km par jour par personne. Elles sont également plus courtes dans le tissu collectif haut que dans le tissu mixte et dense. Cela s’explique par le faible nombre d’établissements universitaires, avec des densités plus fortes dans les tissus centre urbain et collectif discontinu haut. La figure suivante illustre ces différents éléments d’analyse (Figure 8-15).

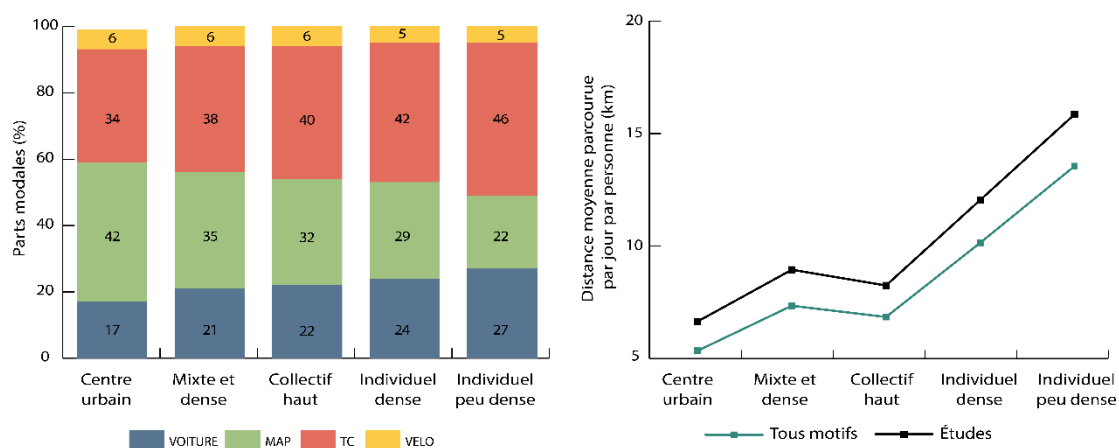


Figure 8-15 : Parts modales de déplacements et distance moyenne de déplacement chez les étudiants en fonction du tissu urbain de résidence.

- Les retraités

Les retraités se déplacent majoritairement en voiture ou en MAP. L’usage de la voiture augmente avec l’éloignement au centre, passant de 38 % dans le centre urbain à 59 % dans le tissu individuel peu dense. Une augmentation légère de la part modale des TC est également visible, passant de 6% dans le centre urbain à 9 % dans l’individuel peu dense. Ces diminutions se font au profit de l’usage la MAP. Son utilisation diminue fortement avec l’éloignement au centre, passant ainsi de 54% dans le centre urbain à seulement 30 % dans l’individuel peu dense. Concernant les distances parcourues pour le motif principal de déplacement (commerces et services), elles sont comprises entre 3,2 et 10,5 km, avec une forte augmentation dans les tissus urbains individuels. Ces distances sont importantes du fait de la faible densité d’aménités dans ces tissus urbains. La figure suivante illustre ces différents éléments d’analyse (Figure 8-16).

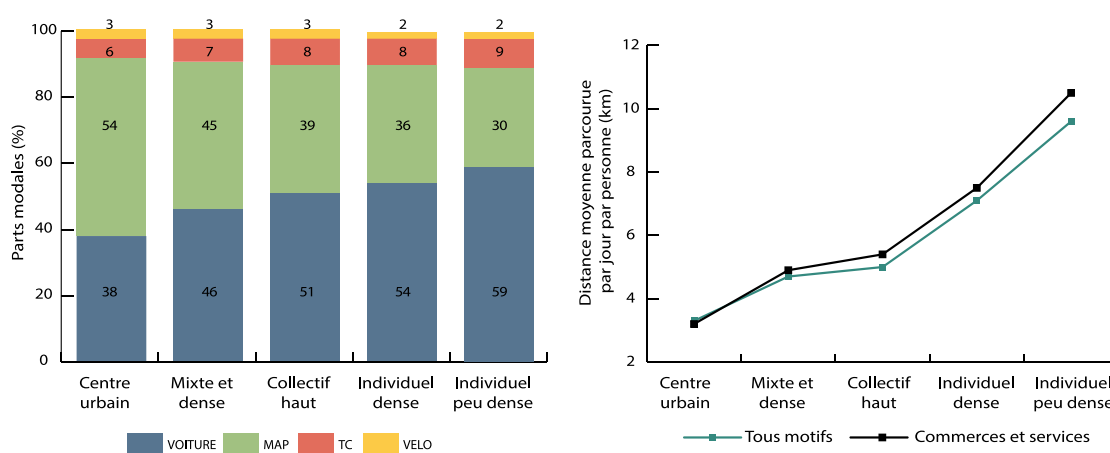


Figure 8-16 : Parts modales de déplacements et distance moyenne de déplacement chez les retraités en fonction du tissu urbain de résidence.

- Les inactifs

Les inactifs affichent un profil de mobilité globalement similaire à celui des retraités. La voiture occupe une place centrale dans leurs déplacements, notamment dans les tissus les plus éloignés du centre où elle est utilisée pour plus de 50 % des déplacements. L’utilisation des TC, relativement faible, suit la même tendance, elle augmente légèrement avec l’éloignement au centre, passant de 8 % dans le centre urbain à 12 % dans l’individuel peu dense. L’augmentation de l’usage de ces deux modes se fait au détriment de la MAP, qui passe d’une utilisation de 53 % dans le centre urbain à 28 % dans le tissu individuel peu dense. Le vélo est globalement peu utilisé, avec des parts comprises entre 2 et 3 %. Les distances moyennes parcourues par jour sont plus élevées que celles des retraités. Pour le motif principal (commerces et services), cette distance augmente fortement avec l’éloignement passant de 1,9 km à 6,1 km. Le tissu collectif haut et le tissu mixte et dense présentent des distances de déplacements similaires, la diversité de fonction et la distance au centre-ville de ces tissus étant très proches. La figure suivante illustre ces différents éléments d’analyse (Figure 8-17).

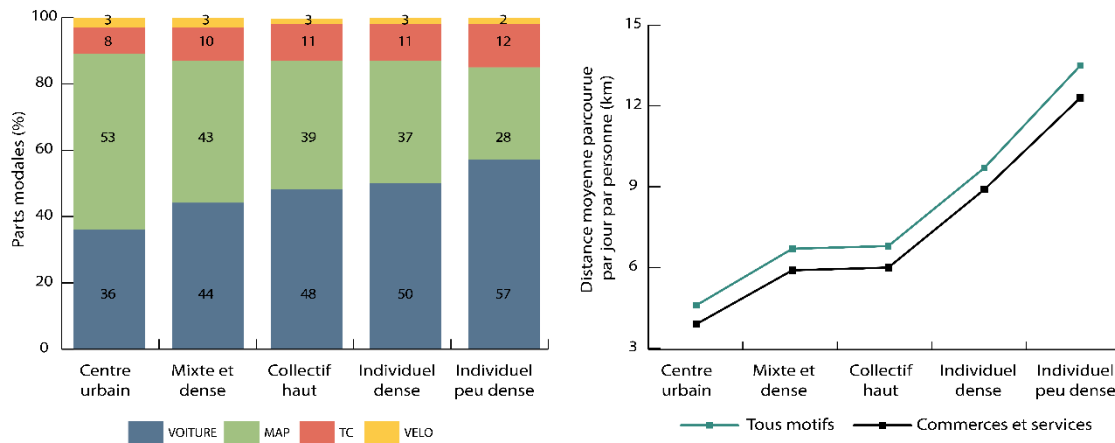


Figure 8-17 : Parts modales de déplacements et distance moyenne de déplacement chez les inactifs en fonction du tissu urbain de résidence

- Les actifs

Quel que soit le lieu de résidence, les actifs sont ceux qui ont l’usage de l’automobile le plus important (part modale comprise entre 64 et 79 %). Cette part augmente ainsi avec l’éloignement au centre au détriment de la MAP, dont l’utilisation passe de 25 % dans le centre urbain à seulement 11 % dans le tissu individuel peu dense. Les actifs parcourent des distances moyennes par jour très élevées, notamment pour le motif principal de déplacement (travail). Cette distance augmente avec l’éloignement au centre, passant de 9,7 km parcouru par jour pour une personne résidant dans le centre urbain à près de 24 km pour une personne résidant dans le tissu individuel peu dense. Le tissu urbain mixte et dense présente une distance moyenne plus élevée que le tissu collectif haut. Cela s’explique par le fait que la densité d’emplois est plus importante dans le tissu collectif haut que dans le tissu mixte et dense. La figure suivante illustre ces différents éléments d’analyse (Figure 8-18).

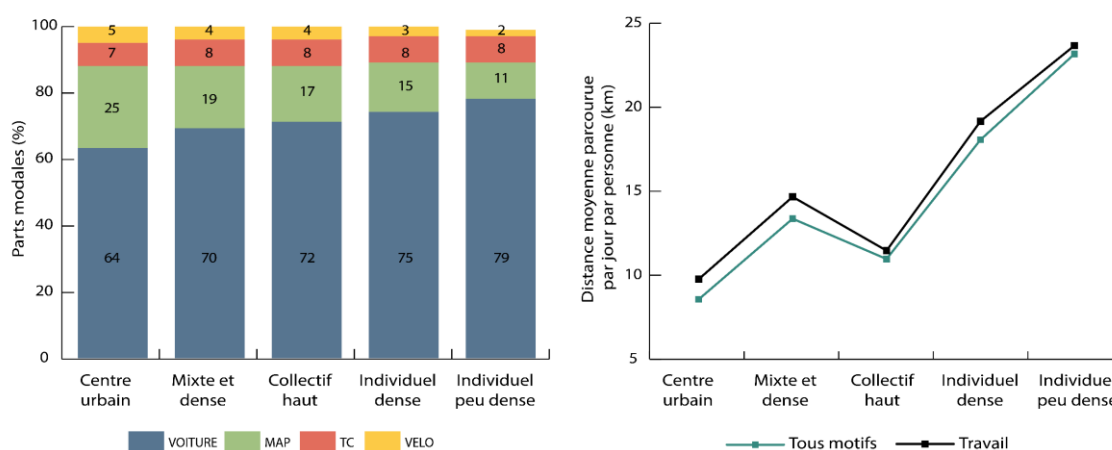


Figure 8-18 : Parts modales de déplacements et distance moyenne de déplacement chez les actifs en fonction du tissu urbain de résidence

8.2.1.2 L’impact de la forme urbaine globale sur les pratiques de mobilités

À l’échelle de structure urbaine, nous réalisons dans un premier temps une analyse globale des pratiques de mobilité pour un individu moyen dans chaque ville archétypale. Une analyse systématique est ensuite réalisée pour les cinq classes principales d’individus construites précédemment mais également pour les cinq tissus urbains. Les tissus et les catégories d’individus ne se répartissent en effet pas de manière homogène dans les différentes villes archétypales et il est donc intéressant d’observer les variations en fonction de ces variables.

Analyse globale

L’analyse des parts modales pour les différents types de structures ne montre pas de différence entre les trois villes archétypales, la part modale de l’automobile est de 52 %, celle des TC de 13 ou 14 %, celle de la MAP de 31 % et celle du vélo de 3 ou 4 % (Figure 8-19).

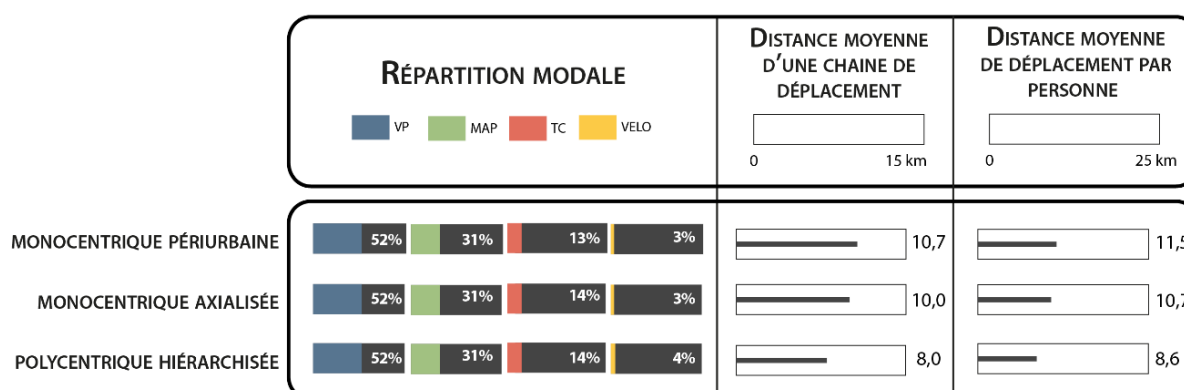


Figure 8-19 : Les principales caractéristiques de mobilités quotidiennes des différentes structures urbaines archétypales

Concernant la distance moyenne d’une chaîne de déplacement, nous observons des différences selon le type

de structure urbaine. Cette distance est ainsi de 10,7 km en moyenne pour la ville monocentrique périurbaine, de 10 km pour la ville monocentrique axialisée et de seulement 8 km pour la ville polycentrique hiérarchisée. La structure de la ville semble également avoir un impact sur la distance moyenne parcourue par personne par jour. Cette distance est de 11,5 km dans la ville monocentrique périurbaine, contre 10,7 km dans la ville monocentrique axialisée et 8,6 km dans la ville polycentrique hiérarchisée. Les plus faibles distances parcourues dans la ville polycentrique hiérarchisée s’expliquent par la présence de plusieurs centres et par la plus forte continuité de cette structure urbaine (Figure 8-20).

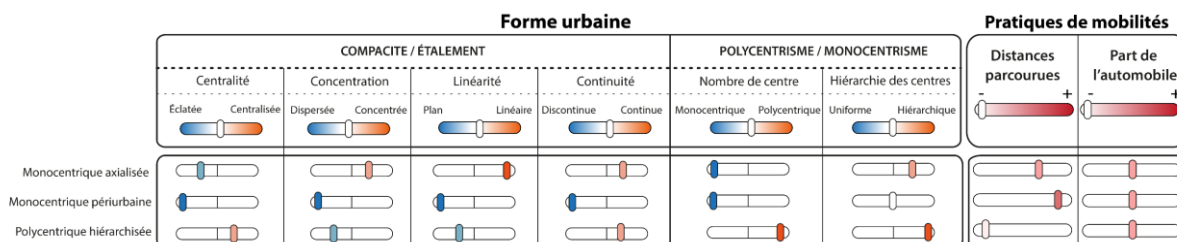


Figure 8-20 : L’impact de la forme urbaine globale sur les pratiques de mobilités quotidiennes.

Analyse détaillée par tissus et par types d’individus

L’analyse des distances moyennes parcourues par jour par tissu urbain pour chaque structure urbaine confirme l’impact de la forme urbaine globale sur les distances. Cependant des tendances différentes apparaissent selon le tissu urbain (Figure 8-21) :

- Pour les habitants du centre urbain et du collectif haut discontinu, la distance moyenne parcourue par jour est plus faible dans la ville monocentrique périurbaine et plus élevée dans la ville polycentrique hiérarchisée. Cela peut s’expliquer par le fait que cette dernière présente plusieurs pôles urbains, multipliant les possibilités de destination plus lointaines.
- Pour les habitants du tissu mixte et dense, la distance moyenne parcourue par jour est plus importante dans la ville monocentrique axialisée (5,2 km). Cela peut notamment s’expliquer par la répartition spatiale de ce tissu dans cette ville. De nombreuses mailles de tissu mixte et dense, implantées le long des axes de la ville, sont en effet loin du centre et des zones d’activités, qui génèrent de nombreux déplacements.
- Pour les habitants des tissus individuels dense et peu dense, la distance moyenne parcourue par jour est importante dans la ville monocentrique périurbaine (7,4 km et 9 km). Cette distance est légèrement plus faible dans la ville monocentrique axialisée (6 km et 7,3 km) et beaucoup plus faible dans la ville polycentrique hiérarchisée (5 km et 6,5 km). Cela s’explique par la diffusion spatiale de ces tissus dans la ville monocentrique périurbaine, avec de nombreuses mailles très éloignées du centre et des zones d’activités. À l’inverse, dans la ville polycentrique hiérarchisée, ces tissus sont regroupés autour des pôles urbains et donc beaucoup plus proches des centres et des zones d’activités. La ville monocentrique axialisée présente une répartition spatiale de ces tissus intermédiaire, certaines mailles étant proches des générateurs de déplacements, d’autres étant plus loin, à l’extrémité des corridors urbanisés.

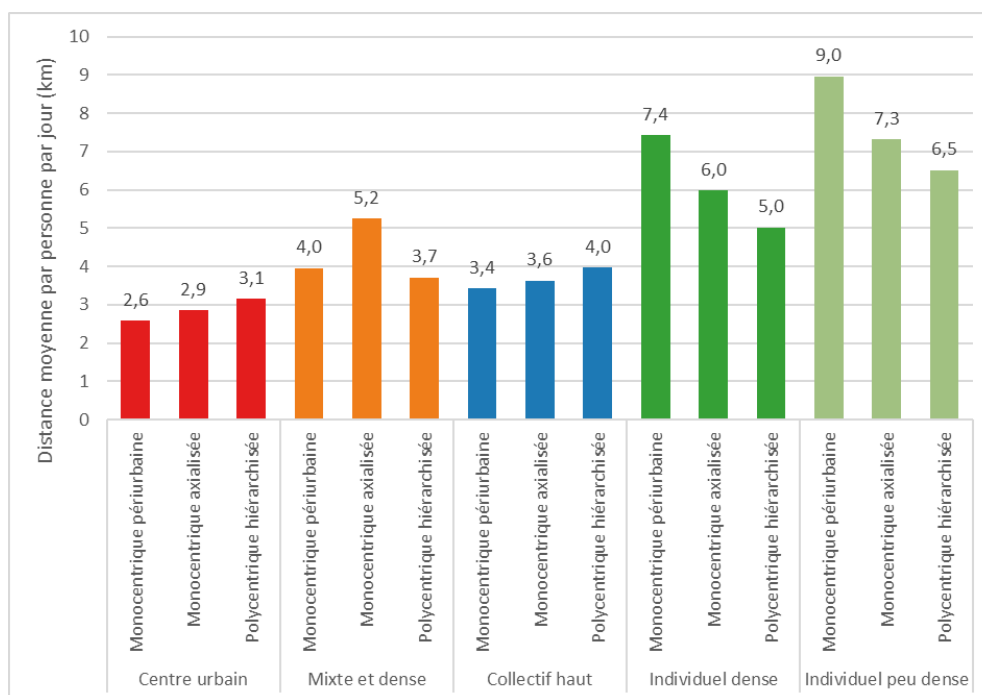


Figure 8-21 : Distance moyenne de déplacements en fonction de la localisation résidentielle dans les structures urbaines et dans les tissus urbains

Concernant les distances moyennes parcourues par jour par catégories d'individu par ville, nous constatons une tendance similaire (plus ou moins marquée) quel que soit la catégorie d'individu : la ville monocentrique périurbaine génère des déplacements plus longs, la ville polycentrique hiérarchisée génère des déplacements plus courts et la ville monocentrique axialisée est un intermédiaire entre les deux (Figure 8-22).

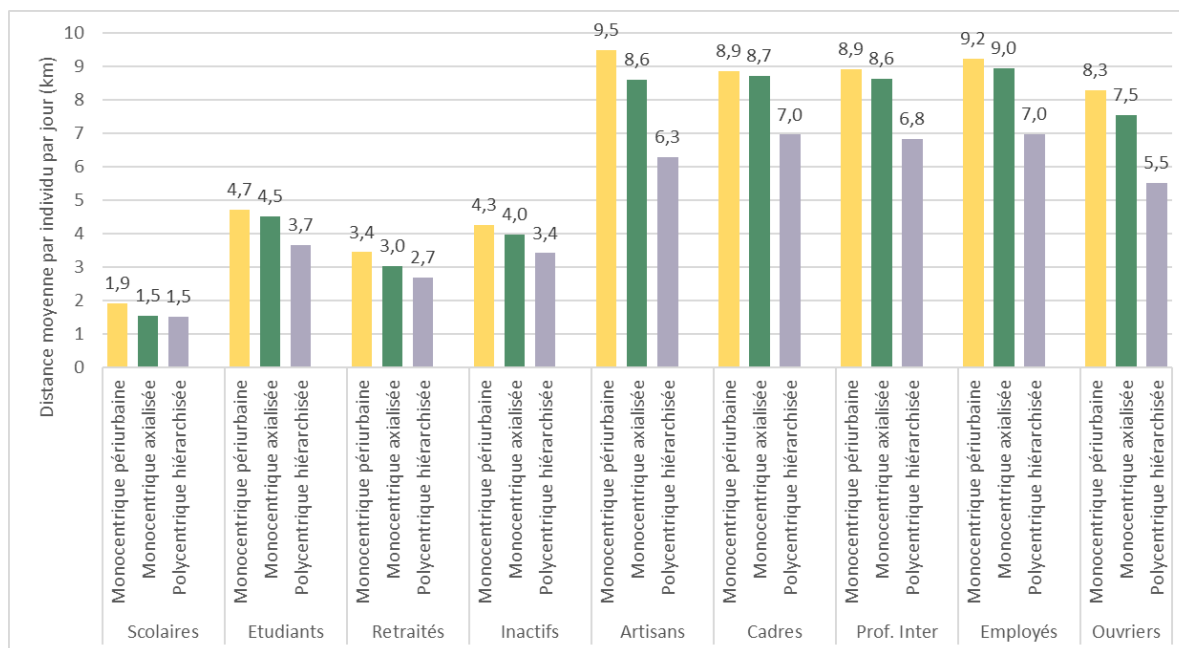


Figure 8-22 : Distances moyennes de déplacements par catégories d'individus en fonction de la localisation résidentielle dans les structures urbaines et dans les tissus urbains

Les parts modales quant à elles sont globalement similaires, quel que soit le tissu urbain ou la catégorie

d’individu étudié pour les trois villes archétypales. Elles ne sont donc pas détaillées ici, la forme urbaine globale n’impactant pas l’utilisation des modes.

8.2.2 Forme urbaine et consommations énergétiques liées aux mobilités quotidiennes

8.2.2.1 Estimations des consommations d’énergie à partir des sorties de Mobisim-Soft

À partir des distances parcourues et des modes utilisés, il est possible d’établir la consommation énergétique de chaque individu. Pour cela, nous considérons tout d’abord que les modes actifs (vélo et MAP) n’entraînent pas de consommations énergétiques. Concernant les déplacements effectués en voiture, plusieurs facteurs impactent les consommations énergétiques, avec notamment le véhicule utilisé et l’environnement de conduite (ville, route ou combiné). Le nombre de passagers dans le véhicule n’est pas pris en compte ici, les déplacements modélisés correspondant uniquement aux déplacements réalisés par les conducteurs (et non par les passagers). Nous choisissons ici une condition de circulation combinée et trois types de véhicules construits entre 2010 et 2020. Nous obtenons ainsi trois niveaux de consommations différents, compris entre 0,052 litre/km et 0,148 litre/km soit entre 0,51 et 1,45 kWh/km (Tableau 8-9).

Véhicule	Modèle de référence	Consommation de carburant			
		Par véhicule (l/100km)	En litre par km	En MJ par km*	En kWh par km
Compacte - Hybride	Honda Civic hybrid 2015	5,2	0,052	1,8	0,51
Intermédiaire - Diesel	Audi A6 2015	8,1	0,081	3,1	0,85
Tout-terrain - Essence	Hummer H3 4WD	14,8	0,148	5,3	1,45

* Pouvoir calorifique d’un litre de carburant : 34 mégajoules (MJ).

Tableau 8-9 : La consommation de carburant de différents types de voiture particulière (d’après l’Office de l’efficacité énergétique canadien, 2021).

Concernant les déplacements effectués en TC, le type de transport (rail ou route), le type de véhicule et le nombre de personnes dans le véhicule impactent les consommations énergétiques. Nous choisissons quatre TC différents, deux routiers et deux ferrés. Pour les transports routiers, nous proposons également trois niveaux de remplissages de 10, 50 et 90 %. Pour les transports collectifs ferrés, les consommations énergétiques étant très faibles, le taux de remplissage n’est pas pris en compte. En réalisant la moyenne des différentes valeurs de consommation des TC, nous obtenons ainsi trois niveaux de consommations différents par passager, minimal, intermédiaire et maximal, compris entre 0,07 et 0,58 kWh/km (Tableau 8-10).

	Par véhicule (l/100 km)	En litre par passager – km			En kWh par passager – km		
		10%	50%	90%	10%	50%	90%
Bus urbain standard	65	0,065	0,013	0,007	0,64	0,13	0,07
Bus urbain articulé	95	0,054	0,011	0,006	0,53	0,11	0,06
Tramway					0,07		
Train TER					0,13		
Bilan TC					0,58	0,13	0,07

Tableau 8-10 : La consommation de carburant de différents types de transports collectifs (d'après l'AQTr - Association québécoise des transports (2011) et l'ADEME (2008)).

Les différents niveaux de consommation établis seront utilisés lors de la mise en parallèle des consommations des mobilités quotidiennes et des consommations résidentielles. Dans l'analyse détaillée des résultats concernant uniquement les mobilités quotidiennes, seul le niveau intermédiaire est analysé, les niveaux de consommations n'impactant pas les tendances observées.

8.2.2.2 Grille de lecture des résultats

Points de vigilance dans la lecture des résultats

Les villes n'ont pas les mêmes surfaces de tissus urbains et n'ont donc pas le même nombre d'habitants, elles ne sont pas directement comparables. Pour permettre la comparaison entre elles et entre les différents tissus urbains, il est nécessaire de ramener la consommation à l'habitant. Nous proposons donc systématiquement des résultats par habitant.

Le recours aux étiquettes énergétiques territoriales pour faciliter la lecture des résultats

Sur le modèle d'Antoni et al. (2013), nous proposons la construction d'étiquettes énergétiques territoriales. L'objectif de ces étiquettes est de proposer une lecture graphique simplifiée des résultats et de permettre plus facilement leurs comparaisons. Les étiquettes énergétiques concernent initialement les appareils électroménagers. Ces étiquettes contiennent différents éléments (Figure 8-23) :

- La référence de l'objet étudié ;
- Des catégories de consommations énergétiques en fonction d'une discrétisation en sept classes (symbolisées par une couleur dans une palette du vert au rouge, et qui s'échelonnent de la lettre A à la lettre G) ;
- La consommation énergétique pour une période ou une utilisation donnée ;
- Des informations complémentaires comme la consommation d'eau par cycle dans le cas d'un lave-linge, ou encore le niveau sonore pendant l'essorage.

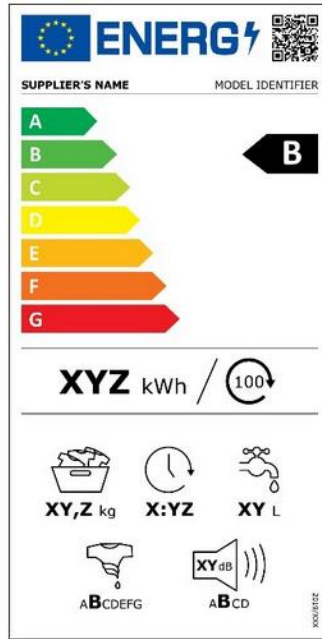


Figure 8-23 : La composition de l’étiquette énergétique d’un lave-linge.

Ces étiquettes ont ensuite été déclinées pour d’autres éléments, comme les bâtiments. Elles constituent un référentiel qui permet la comparaison des objets d’une même catégorie. En effet, les bornes des sept classes sont définies à partir d’une connaissance exhaustive des caractéristiques du parc de l’objet de l’étiquette. Pour cette raison, les étiquettes doivent régulièrement être remises à jour, pour prendre en compte l’évolution du parc de l’objet. Dans notre cas, nous établissons une étiquette énergétique des mobilités quotidiennes basée sur la consommation par habitant (en kWh/jour/habitant) avec sept classes d’amplitudes égales (Figure 8-24).

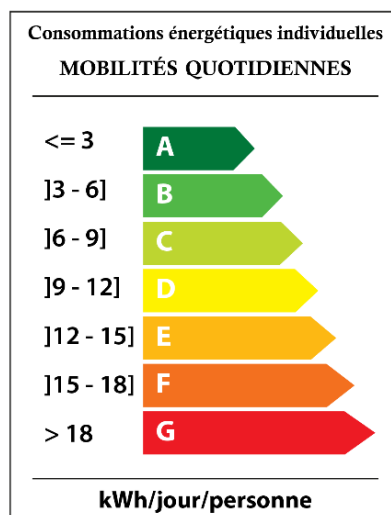


Figure 8-24 : Les étiquettes énergétiques pour les consommations liées aux mobilités quotidiennes.

Si l’objectif est de produire une lecture graphique simplifiée des résultats et de permettre plus facilement leurs comparaisons, l’utilisation de ces étiquettes n’est cependant pas systématique, la simplification en un nombre réduit de classes de consommation pouvant parfois masquer certains éléments d’analyse importants. Les

valeurs de consommation énergétique sont également affichées, permettant une analyse plus fine des consommations énergétiques et notamment l'établissement de « hiérarchies énergétiques ». Dans ces hiérarchies, la position « 1 » correspond aux consommations énergétiques les plus faibles.

8.2.2.3 L'impact de la forme urbaine locale sur les consommations énergétiques liées aux mobilités quotidiennes

Analyse globale






Les consommations énergétiques moyennes par habitant et par mode des différents tissus urbains dans les trois villes archétypales sont présentées dans le tableau suivant (Tableau 8-11). La distribution des consommations en fonction des tissus urbains est présentée en annexe (Annexe 32).

	Consommation liée aux déplacements en TC		Consommation liée aux déplacements en VP		Consommation totale liée aux déplacements
	En kWh/jour/personne	% du total	En kWh/jour/personne	% du total	En kWh/jour/personne
Centre urbain	0,1	4%	3,2	96%	3,3
Mixte et dense	0,2	3%	5,1	97%	5,2
Collectif haut	0,2	4%	4,2	96%	4,3
Individuel dense	0,3	3%	7,4	97%	7,6
Individuel peu dense	0,4	3%	10,0	97%	10,4

Tableau 8-11 : Les consommations énergétiques par habitant liées aux mobilités quotidiennes selon le tissu urbain.

Tout d'abord nous pouvons constater que les consommations liées aux déplacements en TC sont très faibles, représentant moins de 5% de la consommation totale, et ce quel que soit le tissu urbain. Concernant les variations entre tissus urbains, nous pouvons voir que le centre urbain est celui qui présente la consommation par habitant la plus faible (3,3 kWh/jour/personne). Les distances moyennes parcourues par individu sont en effet courtes et la part de l'automobile est relativement faible. Cela s'explique par les fortes densités de commerces et services, d'emplois et de lieux d'études. Les tissus mixte et dense et collectif haut discontinu présentent la même consommation d'énergie liée aux déplacements en TC (0,2 kWh/jour). Cependant, avec la prise en compte de la voiture, le tissu mixte et dense présente une consommation totale par habitant plus élevée que le collectif haut discontinu (+21 %). La répartition modale dans ces deux tissus est similaire mais les distances moyennes parcourues par individu sont plus importantes dans le tissu mixte et dense. Cela s'explique par la plus faible densité d'emplois et de lieux d'études dans ce tissu. Enfin les tissus individuels dense et peu dense présentent les consommations énergétiques par habitant les plus élevées, comprises entre 7,6 et 10,4 kWh/jour/personne, soit deux à trois fois supérieures à celle du centre urbain. Ces tissus présentent en effet les parts modales de l'automobile les plus fortes et les distances moyennes parcourues par individu les plus longues. Cela s'explique à la fois par une densité d'aménité très réduite, mais également par un éloignement avec le centre urbain qui concentre les activités. Il est ainsi possible d'établir une hiérarchisation des tissus urbains en fonction des consommations énergétiques individuelles liées aux

mobilités quotidiennes (Figure 8-25).

	CENTRE URBAIN 	MIXTE ET DENSE 	COLLECTIF HAUT DISCONTINU 	INDIVIDUEL DENSE 	INDIVIDUEL PEU DENSE 
Hiérarchie énergétique*	1	3	2	4	5
Écart avec le numéro 1		+ 57 %	+ 31 %	+ 129 %	+ 210 %
Écart avec le numéro précédent		+ 21 %	+ 31 %	+ 46 %	+ 36 %

* 1 : Consommations énergétiques par habitant les plus faibles

Figure 8-25 : L’impact de la forme urbaine locale sur la consommation d’énergie individuelle liée aux mobilités quotidiennes

Une analyse approfondie par catégories d’individus et par motifs de déplacements est conduite par la suite. Cette analyse utilisera uniquement les consommations combinant les deux modes (voiture et TC).

Analyse détaillée des consommations énergétiques par catégories d’individus et par motifs de déplacements

Les étiquettes énergétiques sont utilisées ici pour faciliter la lecture des résultats détaillés. L’analyse des consommations énergétiques par catégories d’individus et par motifs de déplacements nous apporte plusieurs enseignements concernant l’impact du tissu urbain sur les consommations énergétiques liées aux mobilités quotidiennes (Figure 8-26) :

- La forme urbaine locale impacte très peu les consommations énergétiques des scolaires. Quel que soit le motif de déplacement et le tissu urbain de résidence, ils présentent une étiquette énergétique A, soit une consommation inférieure à 3 kWh/jour/personne. Cette catégorie de la population est en effet celle qui se déplace le moins, sur de courtes distances et essentiellement pour se rendre dans des lieux de type « *Accompagnement quotidien* » qui sont répartis de manière presque uniforme dans l’ensemble des tissus urbains.
- La forme urbaine locale impacte légèrement les consommations énergétiques des étudiants et des retraités. Une opposition entre les tissus plus centraux et ceux plus périphériques apparaît. Ces individus ont ainsi une consommation énergétique faible dans les tissus centre urbain, mixte et dense et collectif haut (étiquette énergétique A), et une consommation plus importante dans les tissus individuel dense et peu dense (étiquette énergétique B ou C). Des différences apparaissent cependant entre les trois tissus centraux selon les motifs de déplacements :
 - Pour les étudiants, les motifs « *Travail* » et « *Accompagnement* » génèrent des consommations plus élevées dans le collectif haut et le mixte et dense que dans le centre urbain. Ces déplacements restent cependant rares, représentant une part très faible de leurs déplacements totaux.
 - Chez les retraités, les motifs « *Soins* », « *Accompagnement* », et « *Travail* » génèrent également des consommations plus élevées dans le tissu collectif haut et mixte et dense que dans le centre urbain.

- La forme urbaine locale impacte fortement les consommations énergétiques des actifs. Des variations importantes de consommations apparaissent ainsi entre chaque tissu urbain, et ce pour la majorité des motifs de déplacements. Globalement il est possible d'établir la hiérarchie énergétique suivante pour les actifs : le centre urbain et le collectif haut génèrent les consommations les plus faibles, suivi par le tissu mixte et dense puis le tissu individuel dense et enfin le tissu peu dense. Au sein des actifs, des légères différences apparaissent cependant :
 - Les cadres, professions intermédiaires et les ouvriers présentent des consommations similaires dans le tissu centre urbain et collectif haut discontinu ;
 - Les employés et les artisans présentent des consommations plus faibles dans le centre urbain que dans le collectif haut discontinu ;
 - Les employés présentent des consommations similaires dans le tissu mixte et dense et collectif haut discontinu.
- La *forme* urbaine locale impacte certains motifs de déplacement plus que d'autres. Le motif « Travail » et le motif « Soin » sont ainsi les motifs qui présentent la plus grande variabilité d'étiquettes énergétiques (quatre étiquettes différentes chacun), tandis que les motifs « Accompagnement », « Études » et « Loisirs » sont ceux qui présentent la moins grande variabilité (deux étiquettes différentes chacun).





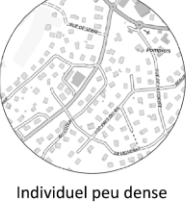
	Scolaire	Etudiant	Retraité	Inactif	Artisan	Cadre	Prof inter.	Employé	Ouvrier	Total	
 Centre urbain	A 0,0	A 1,9	B 3,5	A 1,3	A 2,7	A 2,5	A 2,6	A 1,9	A 2,5	A 1,6	Accompagnement
	A 0,1	A 0,4	A 1,3	A 1,6	A 2,5	A 1,9	A 2,2	A 1,7	A 2,1	A 1,5	Commerces & services
	A 0,4	A 1,7	NC	B 4,1	NC	NC	B 6,0	B 3,9	NC	A 1,3	Etudes
	A 0,0	A 1,1	A 1,5	A 1,4	A 2,5	A 2,8	A 2,4	A 1,4	A 1,8	A 1,6	Loisirs
	A 0,2	A 1,6	B 3,4	B 3,3	B 4,6	B 4,2	B 4,7	B 4,1	B 4,2	B 3,2	Réseau social
	A 0,1	A 0,7	A 2,3	A 2,4	B 3,6	B 3,1	B 3,5	A 2,6	A 2,6	A 2,4	Soins
	NC	A 2,8	A 2,6	B 3,5	B 5,4	C 7,6	C 7,3	B 4,6	C 8,1	C 6,5	Travail
	A 0,1	A 1,4	A 1,7	A 2,3	B 5,7	C 6,7	C 6,6	B 4,4	C 6,7	B 3,3	Total
 Mixte et dense	A 0,1	A 2,6	B 4,5	A 1,9	B 3,4	B 3,3	B 3,3	A 2,5	B 3,3	A 2,1	Accompagnement
	A 0,2	A 0,8	A 2,3	A 2,8	B 4,2	B 3,4	B 3,9	A 3,0	B 3,5	A 2,6	Commerces & services
	A 0,5	A 2,6	NC	C 6,9	NC	NC	D 9,2	B 5,7	NC	A 1,9	Etudes
	A 0,1	A 1,8	A 2,5	A 2,4	B 3,8	B 4,3	B 3,8	A 2,3	A 2,9	A 2,5	Loisirs
	A 0,2	A 2,2	B 5,0	B 5,0	C 6,6	C 6,3	C 7,0	B 6,0	B 6,0	B 4,6	Réseau social
	A 0,3	A 1,3	B 4,3	B 4,8	C 6,6	B 5,8	C 6,6	B 4,8	B 4,6	B 4,4	Soins
	NC	B 5,0	B 4,9	C 6,3	D 9,8	E 12,2	D 11,8	C 8,3	E 12,7	D 10,6	Travail
	A 0,2	A 2,2	A 2,7	B 3,7	D 9,9	D 10,6	D 10,6	C 7,6	D 10,5	B 5,2	Total
 Collectif haut discontinu	A 0,1	B 3,1	B 4,9	A 2,2	B 4,0	B 3,8	B 3,9	A 3,0	B 3,9	A 2,4	Accompagnement
	A 0,2	A 1,2	A 2,8	B 3,1	B 4,4	B 3,8	B 4,1	B 3,5	B 3,9	A 3,0	Commerces & services
	A 0,6	A 2,2	NC	B 5,3	NC	NC	C 7,2	B 5,0	NC	A 1,7	Etudes
	A 0,1	A 2,0	A 2,8	A 2,5	B 4,0	B 4,4	B 3,9	A 2,5	B 3,1	A 2,6	Loisirs
	A 0,3	A 2,3	B 4,7	B 4,6	C 6,1	B 5,7	C 6,2	B 5,5	B 5,6	B 4,2	Réseau social
	A 0,4	A 1,5	B 4,0	B 4,1	B 5,7	B 5,1	B 5,5	B 4,4	B 4,5	B 3,9	Soins
	NC	B 3,6	B 4,1	B 4,7	C 7,3	C 9,0	C 8,7	C 6,2	D 9,4	C 7,7	Travail
	A 0,2	A 2,1	A 2,9	B 3,8	C 8,0	C 8,4	C 8,5	C 6,4	C 8,5	B 4,3	Total
 Individuel dense	A 0,1	B 3,5	B 6,0	A 2,2	B 4,3	B 4,2	B 4,1	B 3,1	B 4,2	A 2,6	Accompagnement
	A 0,4	A 1,8	B 4,4	B 5,1	C 7,3	C 6,2	C 6,9	B 5,5	C 6,1	B 4,8	Commerces & services
	A 0,7	B 3,8	NC	D 9,6	NC	NC	E 12,4	C 8,2	NC	A 2,5	Etudes
	A 0,2	A 2,7	B 3,9	B 3,7	B 5,3	C 6,1	B 5,4	B 3,3	B 4,3	B 3,7	Loisirs
	A 0,4	B 3,6	C 7,8	C 7,8	D 10,0	D 9,5	D 10,4	D 9,2	D 9,1	C 7,2	Réseau social
	A 0,9	A 2,7	C 7,5	C 8,0	D 10,7	D 9,7	D 10,5	C 8,2	C 8,2	C 7,6	Soins
	NC	C 7,1	C 8,2	C 9,0	E 14,2	F 15,8	F 15,5	D 12,0	F 16,3	E 14,3	Travail
	A 0,3	B 3,4	B 4,5	B 5,8	E 14,4	E 14,2	E 14,4	D 11,2	E 14,0	C 7,6	Total
 Individuel peu dense	A 0,3	B 5,9	C 8,7	B 4,0	C 6,6	C 6,7	C 6,4	B 5,1	C 6,7	B 4,2	Accompagnement
	A 0,7	A 2,9	C 6,2	C 7,2	D 10,1	C 8,8	D 9,6	C 7,7	C 8,5	C 6,9	Commerces & services
	A 1,1	B 5,2	NC	E 12,5	NC	NC	F 15,8	D 10,9	NC	B 3,4	Etudes
	A 0,3	B 3,7	B 5,3	B 5,2	C 7,1	C 8,0	C 7,2	B 4,6	B 5,9	B 5,0	Loisirs
	A 0,8	B 5,7	D 11,5	D 11,4	E 14,3	E 13,6	E 14,4	E 13,1	E 13,0	D 10,5	Réseau social
	A 1,5	B 4,0	D 10,6	D 11,2	E 14,6	E 13,3	E 14,3	D 11,5	D 11,5	D 10,6	Soins
	NC	D 9,3	D 11,6	D 11,8	G 18,4	G 19,4	G 19,1	F 15,6	G 19,9	F 17,8	Travail
	A 0,5	B 4,8	C 6,4	C 8,5	G 19,1	F 18,0	G 18,4	F 15,1	F 17,8	D 10,4	Total

Figure 8-26 : Consommation énergétique des mobilités quotidiennes par catégories d'individus et par motifs dans les différents tissus urbains (en kWh/jour/personne).

8.2.2.4 L'impact de la forme urbaine globale sur les consommations énergétiques liées aux mobilités quotidiennes

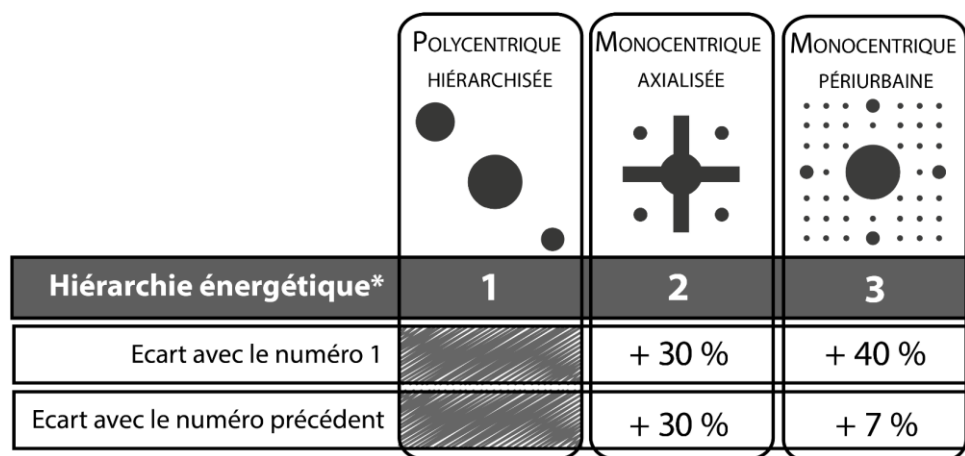
Analyse globale

Les consommations énergétiques moyennes par habitant des trois villes archétypales sont présentées dans le tableau suivant (Tableau 8-12). La distribution de ces consommations en fonction des structures urbaines est présentée en annexe (Annexe 33).

	Consommation liée aux déplacements en TC		Consommation liée aux déplacements en VP		Consommation totale liée aux déplacements
	En kWh/jour/personne	% du total	En kWh/jour/personne	% du total	En kWh/jour/personne
Monocentrique axialisée	0,24	3%	6,68	97%	6,91
Monocentrique périurbaine	0,26	3%	7,16	97%	7,42
Polycentrique hiérarchisée	0,19	4%	5,12	96%	5,32

Tableau 8-12 : Les consommations énergétiques par habitant des mobilités quotidiennes selon les structures urbaines.

En moyenne la consommation par habitant est de 7,42 kWh par personne par jour dans la ville monocentrique périurbaine, de 6,91 kWh dans la ville monocentrique axialisée et de 5,32 kWh dans la ville polycentrique hiérarchisée. La structure monocentrique périurbaine apparaît ainsi comme la plus consommatrice d'énergie par habitant en matière de déplacements quotidiens, avec une consommation 7 % plus élevée que celle de la ville monocentrique axialisée et 40 % plus élevée que celle de la ville polycentrique hiérarchisée. Cela s'explique par son très fort degré d'étalement et son caractère monocentrique, qui génèrent des déplacements longs de la périphérie vers le pôle principal où est regroupé l'essentiel des aménités et des emplois. À l'inverse, la ville polycentrique hiérarchisée apparaît comme la structure la moins consommatrice en énergie par habitant en matière de déplacements quotidiens. Cela s'explique principalement par la présence de plusieurs centres ainsi que par son caractère centralisé et continu qui favorisent les déplacements courts. Enfin, la ville monocentrique axialisée présente une consommation par habitant légèrement inférieure à celle de la ville monocentrique périurbaine, mais supérieure à celle de la ville polycentrique hiérarchisée (+30 %). Elle est en effet caractérisée une moindre dispersion et une plus forte continuité, mais ne compte qu'un centre. Il est ainsi possible d'établir une hiérarchie énergétique des différentes structures urbaines en fonction de leurs consommations énergétiques liées aux mobilités quotidiennes (Figure 8-27).



* 1 : Consommations énergétiques par habitant les plus faibles

Figure 8-27 : L’impact de la structure urbaine sur la consommation d’énergie individuelle liée aux mobilités quotidiennes

Une analyse approfondie par types d’individus, par motifs et par tissus urbains est conduite par la suite. Cette analyse utilisera uniquement les consommations totales, combinant les deux modes de déplacement (voiture et TC).

Analyse détaillée par motifs de déplacements et par tissus urbains

Les étiquettes énergétiques sont utilisées ici pour faciliter la lecture des résultats détaillés (Figure 8-28).

- Structure urbaine et motifs de déplacement

Tous tissus confondus, la structure des villes a un faible impact sur les consommations énergétiques des habitants par motifs de déplacement. Les villes monocentriques axialisée et périurbaine présentent ainsi des étiquettes énergétiques identiques, quel que soit le motif de déplacement. Des différences apparaissent cependant entre ces deux villes et la ville polycentrique hiérarchisée. Dans cette dernière, les consommations d’énergie des individus pour les motifs de déplacements « *Loisirs* », « *Réseau social* », « *Soin* » et « *Travail* » sont plus faibles.

- Structure urbaine et tissu urbain

Une analyse du croisement entre la structure urbaine et le tissu urbain permet cependant de voir plusieurs éléments importants :

- Tout d’abord, la forme urbaine globale impacte faiblement les consommations énergétiques des individus résidants dans le tissu urbain collectif haut discontinu. Ce tissu présente ainsi une étiquette énergétique B quelle que soit la ville.
- Dans les autres tissus urbains, la forme urbaine globale impacte plus fortement les consommations énergétiques des individus :
 - Les habitants du centre urbain de la ville monocentrique périurbaine consomment moins

- d'énergie que les habitants du centre urbain des deux autres villes archétypales ;
- Les habitants du tissu mixte et dense de la ville monocentrique axialisée consomment plus d'énergie que les habitants du même tissu des deux autres villes archétypales ;
- Les habitants du tissu individuel dense de la ville monocentrique périurbaine consomment plus d'énergie que les habitants du même tissu dans les deux autres villes archétypales ;
- Enfin, les habitants du tissu individuel peu dense de la ville polycentrique hiérarchisée consomment moins d'énergie que les habitants du même tissu des deux autres villes.

En complément de ces analyses, une cartographie des consommations énergétiques des trois villes archétypales est disponible en annexe (Annexe 34).

- Structure urbaine, tissu urbain et motifs de déplacement

Des différences de consommation apparaissent cependant avec le motif de déplacement « *Travail* ». L'analyse croisée de la structure urbaine et du tissu urbain sur les consommations énergétiques par motif de déplacement permet ainsi de mettre les éléments suivants en avant :

- Si les habitants du centre urbain des villes monocentrique axialisée et polycentrique hiérarchisée présentent des consommations tous motifs confondus similaires (étiquette B), le motif « *Travail* » génère des consommations plus importantes dans la ville polycentrique hiérarchisée ;
- Si les habitants du tissu mixte et dense des villes monocentrique périurbaine et polycentrique hiérarchisée présentent des consommations tous motifs confondus similaires (étiquette B), le motif « *Travail* » génère des consommations plus importantes dans la ville monocentrique périurbaine ;
- Si les habitants du tissu individuel dense des villes monocentrique axialisée et polycentrique hiérarchisée présentent des consommations tous motifs confondus similaires (étiquette C), le motif « *Travail* » génère des consommations plus importantes dans la ville monocentrique axialisée ;
- Enfin, si les habitants du tissu individuel peu dense des villes monocentrique axialisée et monocentrique périurbaine présentent des consommations tous motifs confondus similaires (étiquette D), le motif « *Travail* » génère des consommations plus importantes dans la ville monocentrique périurbaine.






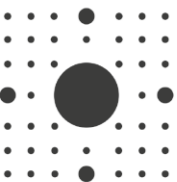


						Tous tissus	
	Centre urbain	Mixte et dense	Collectif haut discontinu	Individuel dense	Individuel peu dense		
 Monocentrique périurbaine	A 1,6	A 2,0	A 2,3	B 3,5	B 4,9	A 3,0	Accompagnement
	A 1,5	A 2,4	A 2,9	C 6,4	C 8,2	B 4,6	Commerces & services
	A 1,1	A 1,7	A 1,6	B 3,3	B 3,9	A 2,5	Etudes
	A 1,4	A 2,3	A 2,6	B 4,5	B 5,8	B 3,5	Loisirs
	A 2,9	B 4,1	B 3,9	D 9,1	D 12,0	C 6,9	Réseau social
	A 2,3	B 3,9	B 3,8	D 9,8	E 12,5	C 7,1	Soins
	B 5,1	D 10,1	C 6,4	G 18,5	G 20,5	E 13,9	Travail
	A 2,8	B 4,9	B 3,9	D 9,9	D 12,0	C 7,4	Total
 Monocentrique axialisée	A 1,7	A 1,9	A 2,4	A 2,2	B 3,6	A 2,3	Accompagnement
	A 1,6	A 3,0	A 2,9	B 4,2	B 6,0	B 3,7	Commerces & services
	A 1,3	A 2,5	A 1,7	A 2,6	B 3,1	A 2,4	Etudes
	A 1,6	A 3,0	A 2,7	B 3,6	B 4,6	B 3,2	Loisirs
	B 3,3	C 6,1	B 4,4	C 7,3	D 9,7	C 6,5	Réseau social
	A 2,4	C 6,6	B 3,9	C 8,0	D 9,7	C 6,7	Soins
	B 6,0	E 14,5	C 7,2	F 15,5	F 17,1	E 13,6	Travail
	B 3,2	C 6,8	B 4,2	C 7,9	D 9,7	C 6,9	Total
 Polycentrique hiérarchisée	A 1,6	A 2,3	A 2,4	A 2,5	B 3,9	A 2,4	Accompagnement
	A 1,5	A 2,5	A 3,0	B 4,5	B 5,9	B 3,3	Commerces & services
	A 1,4	A 1,6	A 1,8	A 2,0	A 2,7	A 1,8	Etudes
	A 1,6	A 2,3	A 2,6	B 3,3	B 4,3	A 2,7	Loisirs
	B 3,3	B 4,0	B 4,4	C 6,1	C 8,8	B 5,0	Réseau social
	A 2,4	B 3,4	B 4,1	C 6,2	C 8,8	B 4,6	Soins
	C 7,7	C 8,6	C 9,0	D 11,2	E 13,9	D 9,8	Travail
	B 3,7	B 4,5	B 4,7	C 6,4	C 8,4	B 5,3	Total

Figure 8-28 : Consommation énergétique des mobilités quotidiennes par habitant en fonction du motif, du tissu urbain et de la structure urbaine (en kWh/jour/personne).

Analyse détaillée par catégories d'individus et par tissus urbains

Les étiquettes énergétiques sont utilisées ici pour faciliter la lecture des résultats détaillés (Figure 8-29). Une cartographie des consommations énergétiques dans les trois villes archétypales par catégories d'individus est également disponible en annexe (Annexe 35). L'analyse de l'impact des structures urbaines tous tissus confondus sur les consommations énergétiques des différentes catégories d'individus montre différents éléments :

- Tout d'abord que la structure urbaine impacte peu les consommations énergétiques des scolaires, des retraités et des inactifs. Ces catégories d'individus présentent en effet toutes la même étiquette énergétique, quelle que soit la ville archétypale.
- La structure urbaine impacte cependant plus fortement les consommations énergétiques des autres catégories d'individus :
 - Les étudiants présentent une plus faible consommation dans les villes monocentriques axialisée et périurbaine que dans la ville polycentrique hiérarchisée ;
 - À l'inverse, les cadres, professions intermédiaires et ouvriers ont une consommation plus forte dans la ville polycentrique hiérarchisée ;
 - Les artisans sont ceux dont les consommations varient le plus en fonction de la structure urbaine. Un gradient croissant de leur consommation énergétique est ainsi visible, la ville polycentrique hiérarchisée génère les consommations les plus faibles tandis que la ville monocentrique périurbaine génère les plus fortes.

L'analyse croisée du rôle de la structure urbaine, du tissu urbain sur les consommations énergétiques des différentes catégories d'individus montre les éléments suivants :

- Si les habitants du centre urbain des villes monocentrique axialisée et polycentrique hiérarchisée présentent des consommations similaires (étiquette B), les artisans ont des consommations moins importantes dans la ville monocentrique axialisée ;
- Si les habitants du tissu mixte et dense des villes monocentrique périurbaine et polycentrique hiérarchisée présentent des consommations similaires (étiquette B), les artisans, les professions intermédiaires, les ouvriers et les employés ont des consommations plus faibles dans la ville polycentrique hiérarchisée ;
- Si les habitants du tissu individuel dense des villes monocentrique axialisée et polycentrique hiérarchisée présentent des consommations similaires (étiquette C), les étudiants et l'ensemble des actifs ont des consommations plus importantes dans la ville monocentrique axialisée ;
- Enfin, si les habitants du tissu individuel peu dense des villes monocentrique axialisée et monocentrique périurbaine présentent des consommations similaires (étiquette D), les retraités, les inactifs et l'ensemble des actifs ont des consommations plus importantes dans la ville monocentrique périurbaine.








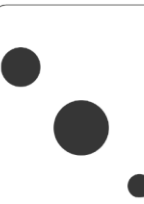
	 Centre urbain	 Mixte et dense	 Collectif haut discontinu	 Individuel dense	 Individuel peu dense	Ensemble des tissus	
 Monocentrique périurbaine	A 0,1	A 0,2	A 0,2	A 0,5	A 0,7	A 0,4	Scolaire
	A 1,3	A 2,0	A 1,9	B 4,4	B 5,6	B 3,2	Etudiant
	A 1,6	A 2,4	A 2,8	B 5,7	C 7,5	B 4,4	Retraité
	A 2,1	B 3,4	B 3,6	C 7,7	D 10,0	B 5,0	Inactif
	B 5,0	D 9,6	C 7,1	G 19,0	G 22,2	F 15,1	Artisan
	B 5,3	D 9,7	C 7,1	F 17,9	G 20,5	E 13,3	Cadre
	B 5,4	D 9,9	C 7,3	G 18,3	G 21,1	E 13,9	Prof. intermédiaire
	B 3,9	C 7,5	B 5,8	E 15,0	F 17,8	D 11,7	Employés
	B 5,4	D 9,7	C 7,2	F 17,6	G 20,3	E 13,8	Ouvriers
	A 2,8	B 4,9	B 3,9	D 9,9	D 12,0	C 7,4	Total
 Monocentrique axialisée	A 0,1	A 0,2	A 0,2	A 0,3	A 0,4	A 0,3	Scolaire
	A 1,4	A 2,9	A 2,1	B 3,4	B 4,4	A 2,9	Etudiant
	A 1,8	B 3,3	A 2,9	B 4,2	B 5,7	B 3,8	Retraité
	A 2,3	B 4,6	B 3,8	B 5,6	C 7,6	B 4,6	Inactif
	B 5,5	E 13,4	C 7,7	F 15,1	F 18,0	E 13,7	Artisan
	C 6,2	E 13,7	C 7,9	E 14,9	F 17,1	E 13,0	Cadre
	C 6,2	E 13,8	C 8,1	F 15,2	F 17,5	E 13,5	Prof. intermédiaire
	B 4,4	D 10,4	C 6,2	D 11,7	E 14,1	D 10,6	Employés
	C 6,3	E 13,5	C 8,0	E 14,7	F 17,0	E 13,3	Ouvriers
	B 3,2	C 6,8	B 4,2	C 7,9	D 9,7	C 6,9	Total
 Polycentrique hiérarchisée	A 0,1	A 0,2	A 0,2	A 0,3	A 0,5	A 0,3	Scolaire
	A 1,5	A 1,9	A 2,1	A 2,8	B 3,9	A 2,3	Etudiant
	A 1,7	A 2,5	A 3,0	B 4,1	B 5,5	B 3,2	Retraité
	A 2,3	B 3,4	B 3,9	B 5,1	C 7,2	B 3,8	Inactif
	C 6,2	C 7,9	C 8,8	D 11,5	F 15,1	D 9,8	Artisan
	C 7,9	D 9,1	D 9,7	D 11,7	E 14,7	D 10,2	Cadre
	C 7,7	C 8,9	D 9,7	D 11,8	E 15,0	D 10,3	Prof. intermédiaire
	B 4,7	B 6,0	C 6,8	C 8,9	D 11,8	C 7,5	Employés
	C 7,9	C 9,0	D 9,6	D 11,7	E 14,7	D 10,4	Ouvriers
	B 3,7	B 4,5	B 4,7	C 6,4	C 8,4	B 5,3	Total

Figure 8-29 : Consommations énergétiques liées aux mobilités quotidiennes par habitant en fonction de la catégorie d'individu, du tissu urbain et de la structure urbaine (en kWh/jour/personne).

8.3 Synthèse du chapitre 8

Dans ce chapitre nous avons simulé les déplacements quotidiens d'individus dans les trois villes archétypales modélisées. Pour cela, nous avons dans un premier temps généré une population synthétique dans ces trois villes à partir de l'analyse de données du recensement de la population des 19 villes réelles étudiées dans le chapitre 7. Nous avons ensuite calibré l'outil de simulation Mobisim-Soft, en utilisant les enquêtes déplacements de ces mêmes villes. Enfin, nous avons validé les résultats obtenus.

À partir de ces simulations, nous avons mis en évidence plusieurs éléments :






- Nous avons tout d'abord montré le rôle de la forme urbaine sur les pratiques de mobilité. Concernant la forme urbaine locale, nous avons observé des variations importantes des parts modales et des distances de déplacements entre les tissus urbains des trois villes, nous permettant de confirmer les conclusions du chapitre précédent. Concernant la forme urbaine globale, nous avons pu voir que la structure des villes n'impacte pas le choix du mode, mais impacte les distances de déplacements. Ainsi, quel que soit la catégorie d'individu, les déplacements quotidiens sont globalement plus longs dans la ville monocentrique périurbaine et plus courts dans la ville polycentrique hiérarchisée. L'analyse croisée de la forme urbaine globale et de la forme urbaine locale montre cependant que cette conclusion varie selon le tissu urbain.
- Nous avons ensuite estimé les consommations énergétiques associées aux déplacements simulés afin de mettre en avant le rôle de la forme urbaine sur les consommations énergétiques individuelles liées aux mobilités quotidiennes. Concernant la forme urbaine locale, nous avons montré que le centre urbain est le tissu qui présente la plus faible consommation énergétique, suivi par le tissu collectif haut discontinu, le tissu mixte et dense, le tissu individuel dense et enfin le tissu individuel peu dense. Concernant la forme urbaine globale, nous avons montré que la structure monocentrique périurbaine génère des consommations énergétiques par habitant plus importantes, suivies par la structure monocentrique axialisée et par la structure polycentrique hiérarchisée. Enfin, l'analyse croisée de l'impact de la forme urbaine locale et de celui de la forme urbaine globale nous a montré que les consommations énergétiques d'un habitant d'un même tissu sont différentes selon la structure urbaine, et inversement, que les consommations énergétiques d'un habitant d'une même structure urbaine sont différentes selon le tissu urbain. Nos sous-hypothèses 1c et 1d sont donc vérifiées.

La figure suivante résume l'ensemble des apports de ce chapitre sur l'impact de la forme urbaine sur les consommations énergétiques liées aux mobilités quotidiennes (Figure 8-30).

Si le rôle de la forme urbaine sur les consommations énergétiques liées aux mobilités quotidiennes a pu être mis en évidence dans ce chapitre, son rôle sur les consommations énergétiques résidentielles reste à montrer, tout comme les effets possibles de compensation entre ces deux secteurs que sont les transports et le bâtiment.

FORME URBAINE ET CONSOMMATIONS ÉNERGÉTIQUES LIÉES AUX MOBILITÉS QUOTIDIENNES






IMPACT CROISÉ DES STRUCTURES URBAINES ET DES TISSUS URBAINS

	MONOCENTRIQUE PÉRIURBAINE	MONOCENTRIQUE AXIALISÉE	POLYCENTRIQUE HIÉRARCHISÉE	
Hiérarchie énergétique*	1	2	3	CENTRE URBAIN
Écart avec le numéro 1		+ 14 %	+ 31 %	
Hiérarchie énergétique	8	10	6	MIXTE ET DENSE
Écart avec le numéro 1	+ 72 %	+ 139 %	+ 58 %	
Hiérarchie énergétique	4	5	7	COLLECTIF HAUT DISCONTINU
Écart avec le numéro 1	+ 38 %	+ 48 %	+ 66 %	
Hiérarchie énergétique	14	11	9	INDIVIDUEL DENSE
Écart avec le numéro 1	+ 248 %	+ 177 %	+ 124 %	
Hiérarchie énergétique	15	13	12	INDIVIDUEL PEU DENSE
Écart avec le numéro 1	+ 323 %	+ 241 %	+ 197 %	

* 1 : Consommations énergétiques par habitant les plus faibles

IMPACT DES STRUCTURES URBAINES EN FONCTION DES TISSUS URBAINS

Réponse à l'hypothèse 1c

	MONOCENTRIQUE PÉRIURBAINE	MONOCENTRIQUE AXIALISÉE	POLYCENTRIQUE HIÉRARCHISÉE	
Hiérarchie énergétique *	1	2	3	CENTRE URBAIN
Écart avec le numéro 1		+ 14 %	+ 31 %	
Hiérarchie énergétique	2	3	1	MIXTE ET DENSE
Écart avec le numéro 1	+ 9 %	+ 52 %		
Hiérarchie énergétique	1	2	3	COLLECTIF HAUT DISCONTINU
Écart avec le numéro 1		+ 8 %	+ 21 %	
Hiérarchie énergétique	3	2	1	INDIVIDUEL DENSE
Écart avec le numéro 1	+ 55 %	+ 24 %		
Hiérarchie énergétique	3	2	1	INDIVIDUEL PEU DENSE
Écart avec le numéro 1	+ 42 %	+ 15 %		

* 1 : Consommations énergétiques par habitant les plus faibles

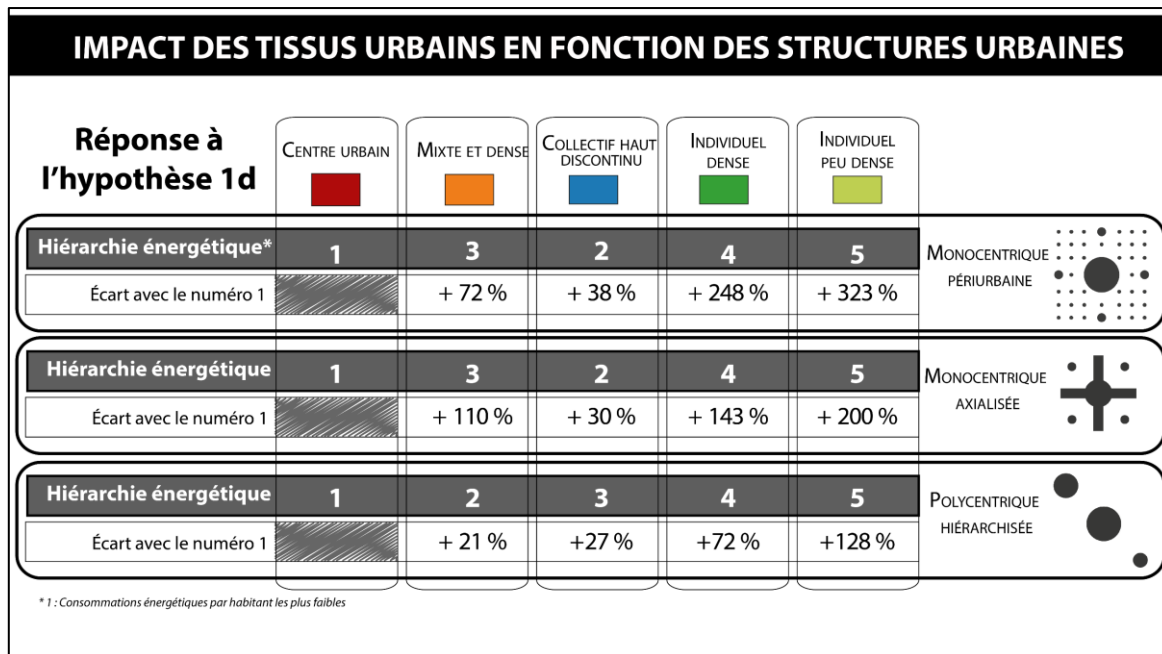


Figure 8-30 : L'impact de la forme urbaine sur les consommations énergétiques individuelles liées aux mobilités quotidiennes.

Chapitre 9

Une évaluation multisectorielle des consommations énergétiques individuelles

Dans le chapitre précédent, nous avons pu montrer les liens existants entre la forme urbaine et les pratiques de mobilités quotidiennes des individus ainsi qu'avec les consommations énergétiques liées à ces pratiques de mobilités. Nous avons ainsi répondu à deux de nos sous-hypothèses, à l'échelle croisée de l'agglomération et du quartier. Dans ce chapitre, nous souhaitons maintenant simuler les consommations énergétiques résidentielles afin de mettre en évidence le rôle de la forme urbaine sur ces consommations. Nous souhaitons également croiser les résultats de ces simulations avec les résultats du chapitre précédent, afin de mettre en évidence des possibles effets de compensation entre les consommations énergétiques résidentielles et celles liées aux mobilités quotidiennes.

Le premier objectif est ainsi de s'intéresser à deux de nos sous-hypothèses à l'échelle du quartier et du bâtiment (Figure 9-1) :

- Deux individus identiques résidant dans un même tissu auront des consommations résidentielles différentes selon la forme architecturale bâtie (sous-hypothèse 1a) ;
- Deux individus identiques résidant dans une même forme architecturale bâtie auront des consommations résidentielles différentes selon le tissu urbain (sous-hypothèse 1b).

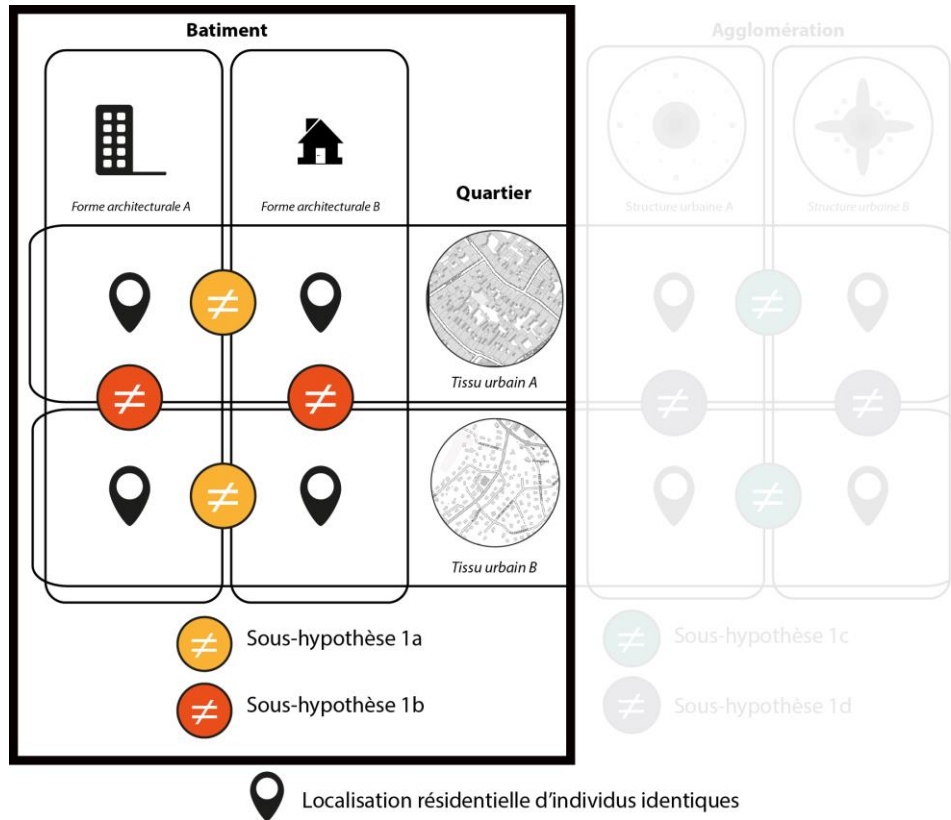


Figure 9-1 : Le premier objectif du chapitre 9.

Le second objectif de ce chapitre est de répondre à notre seconde hypothèse, qui est que selon la localisation résidentielle des individus, il peut exister des effets de compensations entre les consommations liées aux pratiques de mobilités quotidiennes et les consommations résidentielles.

Afin de répondre à ces objectifs, nous simulons dans un premier temps les consommations énergétiques résidentielles des individus dans les différentes formes architecturales générées dans le chapitre 6.1. Cette simulation est effectuée avec la plateforme CEA. Dans un second temps, les consommations énergétiques résidentielles simulées seront croisées avec celles liées aux mobilités quotidiennes. Les résultats obtenus sont ensuite présentés et analysés afin de valider ou d'invalider nos hypothèses.

9.1 Appréhender l'impact énergétique des pratiques résidentielles à l'aide d'un outil de simulation

Dans cette section, les consommations énergétiques résidentielles sont simulées dans les différentes formes architecturales bâties à l'aide de la plateforme de simulation CEA. Les résultats obtenus sont présentés et analysés afin de tester nos hypothèses.

9.1.1 Usage de City Energy Analyst (CEA) pour simuler les consommations énergétiques résidentielles

City Energy Analyst est un cadre de calcul open source pour l'analyse et l'optimisation des systèmes énergétiques des quartiers. Il est développé à l'école polytechnique fédérale de Zurich et à l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) depuis 2016 et présente de nombreux avantages développés dans la partie 1. L'architecture et le fonctionnement de CEA sont également décrits en détail dans l'article de Fonseca et al. (2016) ainsi que dans la documentation officielle du logiciel disponible en ligne²⁶.

9.1.1.1 L'usage des bâtiments

Nous utilisons dans ce travail les archétypes proposés par défaut dans CEA (Fonseca & Schlueter, 2015). Concernant l'usage des bâtiments, nous associons à nos différentes formes architecturales bâties les usages « *résidentiel collectif* » et « *résidentiel individuel* » proposés par CEA. À partir de ces usages, nous fixons des paramètres d'occupation différents. Nous associons tout d'abord à l'usage résidentiel collectif une surface de 30 m² par personne, correspondant à la moyenne française des logements collectifs (INSEE, 2017). Concernant l'usage résidentiel individuel, nous fixons une population identique pour chaque bâtiment, en considérant qu'un bâtiment correspond à un seul logement. Cette population est fixée à deux personnes par bâtiments, reflétant également la valeur moyenne française (INSEE, 2017). L'utilisation d'un usage unique pour chacune des formes architecturales entraîne une surestimation de la population (et donc de la consommation) dans les bâtiments. En effet, nous attribuons l'ensemble de la surface bâtie de la maille à un usage résidentiel, hors d'autres usages peuvent être présents en réalité (comme l'usage commercial par exemple). Cette simplification sera à prendre en compte dans l'analyse des résultats. La population de chaque

²⁶ Disponible sur le site de CEA : <https://cityenergyanalyst.com/>

type de maille d'architecture bâtie est présentée dans le tableau suivant (Tableau 9-1).

	Formes architecturales bâties	Tissus	Surface de plancher par bâtiment (m ²)	Nombre de bâtiments par maille	Surface de plancher maille (m ²)	Nombre d'habitants par maille
Forme 1	Grand collectif mitoyen ancien avec cour intérieure	Centre urbain	1750	100	175000	5800
Forme 2	Grand collectif isolé	Collectif haut discontinu	11000	9	99000	3303
Forme 3	Maison individuelle mitoyenne	Mixte et dense	96	247	23750	618
Forme 4	Petit collectif isolé		420	113	47500	1583
Forme 5	Petit collectif mitoyen		280	170	47500	1527
Forme 6	Grand collectif mitoyen		3500	24	83125	2779
Forme 7	Maison individuelle détachée	Individuel dense	98	128	12544	320
Forme 8	Maison individuelle mitoyenne		96	130	12480	325
Forme 9	Maison individuelle détachée	Individuel peu dense	98	36	3724	95
Forme 10	Villa isolée		200	19	3800	48

Tableau 9-1 : La population affectée aux différentes mailles d'architectures bâties

Concernant les autres paramètres d'occupation, nous faisons le choix de ne pas différencier le résidentiel collectif et individuel, afin de faciliter la comparaison des résultats entre les deux. Les différentes valeurs des paramètres sont ainsi celles proposées par défaut pour l'archétype résidentiel collectif. Concernant le confort intérieur, la température de consigne pour le chauffage est fixée à 21° et pour la climatisation à 26°. La température dite « *de recul* » correspond à la température souhaitée la nuit ou lors d'une absence prolongée. Cette température de recul est fixée par défaut à 18° pour le chauffage et à 28° pour la climatisation. Concernant le planning d'occupation du logement, nous utilisons des plannings déterministes et non stochastiques afin d'avoir des résultats comparables, sans phénomène aléatoire. Ainsi, la probabilité d'occupation mensuelle du logement est de 0,8 et les probabilités d'occupation journalière sont présentées dans le tableau suivant (Tableau 9-2).

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
WEEKDAY	1	1	1	1	1	1	0.6	0.4	0	0	0	0	0.8	0.4	0	0	0	0.4	0.8	0.8	0.8	1	1	1
SATURDAY	1	1	1	1	1	1	0.6	0.4	0	0	0	0	0.8	0.4	0	0	0	0.4	0.8	0.8	0.8	1	1	1
SUNDAY	1	1	1	1	1	1	0.6	0.4	0	0	0	0	0.8	0.4	0	0	0	0.4	0.8	0.8	0.8	1	1	1

Tableau 9-2 : Les probabilités de présence journalière fournies par CEA pour les usages résidentiels

Ces plannings sont des probabilités de présence dans les bâtiments. À titre d'exemple, entre 22h et 7h, la

probabilité de présence dans les bâtiments est de 100%. À partir de ce planning d'occupation, des probabilités d'usages énergétiques sont proposées par CEA (électricité spécifique, éclairage, ECS et CVC) (Annexe 36).

9.1.1.2 L'âge et le standard de construction des bâtiments

Concernant l'âge et le standard de construction des formes architecturales bâties, nous utilisons également les standards proposés par CEA. Ces six standards correspondent à différentes périodes de construction (allant de l'an 1000 à 2040). Certains standards étant parfois très proches, nous conservons uniquement les standards 1, 4 et 6 qui présentent des différences marquées. Les caractéristiques majeures des standards sélectionnés sont présentées dans le tableau suivant (Tableau 9-3). Le standard 1 correspond aux bâtiments construits avant 1920, le standard 4 correspond aux bâtiments construits entre 1920 et 2000 et le standard 6 aux bâtiments les plus récents, construits après 2000. Les standards décrivent les bâtiments dans leur état initial, c'est-à-dire non rénovés. Un bâtiment construit avant 1920 mais ayant subi des transformations et des améliorations thermiques peut ainsi être caractérisé par le standard 4.

	Standard 1	Standard 4	Standard 6
Année fin	1920	2000	2040
Type de construction	Construction lourde	Construction lourde	Construction lourde
Étanchéité	Moyenne	Moyenne	Très étanche
Types de fenêtre	Simple vitrage	Double vitrage	Double vitrage avec revêtement à faible émissivité
Type de toiture	Tuiles d'argile	Finition en béton ou en cailloux de roche	Verdure
Type de cloisons intérieures	Cloison intérieure en brique	Cloison intérieure en brique	Cloison intérieure en brique
Type de murs	Bloc de béton apparent- ancien bâtiment	Plâtre sur brique d'argile	Plâtre sur brique d'argile
Type de sol	Sol en béton, ancien	Sol en béton, nouveau	Sol en béton, nouveau
Type de plancher	Sol en béton, ancien - sous-sol	Plancher en béton, nouveau - sous-sol	Plancher en béton, nouveau - sous-sol
Type de système de fermeture des fenêtres	Stores vénitiens	Volets roulants	Volets roulants
Rapport fenêtre/mur toutes façades	0,16	0,21	0,15
Système de chauffage	Radiateur (90/70)	Radiateur (90/70)	Chauffage au sol (40/35)
Système de climatisation	Non	Non	Non
Système d'eau chaude sanitaire	Eau à haute température (60/10)	Eau à haute température (60/10)	Eau à haute température (60/10)
Type de contrôle du chauffage et de la climatisation	Non	Non	Régulateur avec réglage optimal
Type de ventilation	Ventilation des fenêtres	Ventilation des fenêtres	Ventilation mécanique avec contrôle de la demande
Mécanique	Faux	Faux	Vrai
Fenêtre	Vrai	Vrai	Faux
Récupération de chaleur	Faux	Faux	Vrai
Chasse d'eau nocturne activée	Vrai	Vrai	Vrai
Économiseur en marche	Faux	Faux	Faux
Chaudière chauffage et eau chaude	Chaudière au fioul	Chaudière au fioul	Chaudière à gaz naturel
Matière première	Pétrole	Pétrole	Gaz naturel

Tableau 9-3 : Les principales caractéristiques des différents standards de construction

À ce stade, nous ne posons pas d'hypothèse quant à l'âge et au standard des formes architecturales bâties

modélisées. Les différents standards seront testés sur l'ensemble des formes architecturales bâties.

9.1.1.3 Les autres éléments obligatoires

Les différentes formes architecturales bâties ont été simulées dans un SIG dans la partie 2. Nous disposons ainsi des données géométriques au format shapefile nécessaires au fonctionnement de CEA. Concernant les conditions météorologiques, nous utilisons un des jeux de données climatiques proposées par CEA. Ce jeu de donnée est une année typique (TMY) de Zurich, construite à partir de données recueillies entre 1990 et 2010. Zurich est une ville Suisse située sur la zone du Plateau. Cet espace est à la frontière entre un climat océanique (classification climatique de Köppen-Geiger) et un climat continental humide (classification climatique de Köppen), avec une moyenne de 30 jours d'été (température maximale égale ou supérieure à 25°C) et 5,8 jours dits de chaleur (température maximale égale ou supérieure à 30°C) par an. Il est important de se rappeler que les résultats de simulation énergétique produits par CEA dépendront de ces conditions climatiques. Enfin concernant le relief des villes archétypales, nous fixons une altitude unique pour les trois villes, correspondant à une absence de relief (0 mètre d'altitude).

9.1.2 Présentation et analyses des résultats de consommations résidentielles

9.1.2.1 Le recours aux étiquettes énergétiques territoriales

Sur le même modèle que les étiquettes énergétiques des consommations énergétiques générées par les mobilités quotidiennes, nous proposons de recourir aux étiquettes énergétiques. Ici, nous établissons une étiquette énergétique résidentielle basée sur la consommation par habitant (en kWh/jour/personne), ainsi qu'une étiquette sur la consommation par m² (en kWh/jour/m²) (Figure 9-2). Pour rappel, ces consommations correspondent à des consommations moyennes journalières annuelles. Les résultats des simulations détaillés par mois et par usages énergétiques sont également disponibles en annexes (Annexe 37 à Annexe 46).

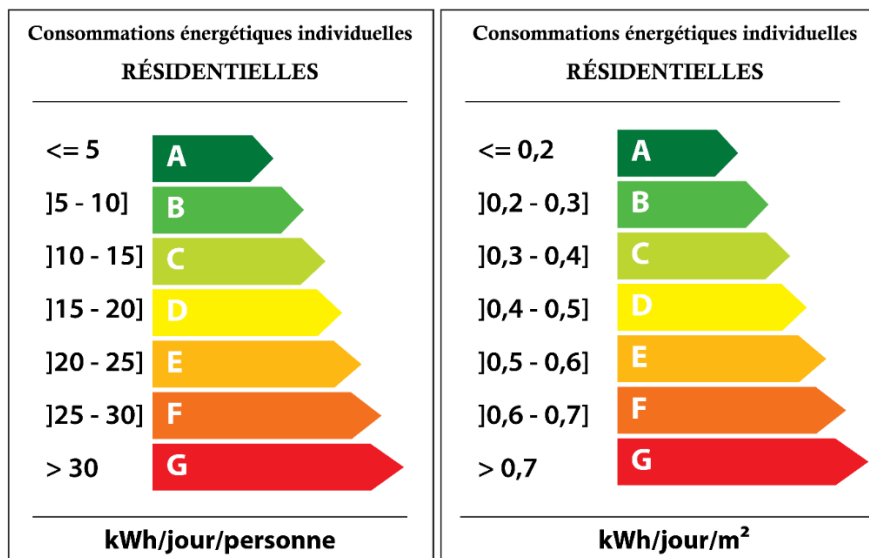


Figure 9-2 : Les étiquettes énergétiques pour les consommations liées aux usages résidentiels

9.1.2.2 L'impact de la forme architecturale et du tissu urbain sur les consommations énergétiques résidentielles

Une analyse combinée des effets de la forme architecturale et du tissu urbain est effectuée, les simulations étant effectuées avec une résolution à la maille et non au bâtiment (voir partie 3.1.2.2). Les résultats sont tout d'abord présentés à cette échelle de la maille, puis à celles agrégées des tissus et des structures urbaines.

Analyse des consommations énergétiques par types de mailles architecturales

L'analyse des consommations énergétiques résidentielles selon la forme architecturale nous montre qu'il existe un lien entre la forme et les consommations énergétiques. Dans la figure suivante (Figure 9-3), nous pouvons voir qu'à standard de construction équivalent, les formes les plus consommatrices en énergie par habitant sont les villas isolées (forme 10), les maisons mitoyennes (formes 3 et 8) et les maisons individuelles (formes 7 et 9). Ces formes présentent une consommation énergétique résidentielle supérieure à 30 kWh/jour/habitant (étiquette G) en standard de construction 1. Les formes les moins consommatrices d'énergies par habitant sont le grand collectif isolé (forme 2) et le grand collectif mitoyen (forme 6). Elles présentent une consommation énergétique inférieure à 15 kWh/jour/habitant. La comparaison des différents standards de construction nous montre que même avec le meilleur standard de construction (standard 6), les consommations énergétiques par habitant des formes les moins performantes restent plus élevées que les consommations énergétiques des formes les plus performantes au standard le moins performant (standard 1).

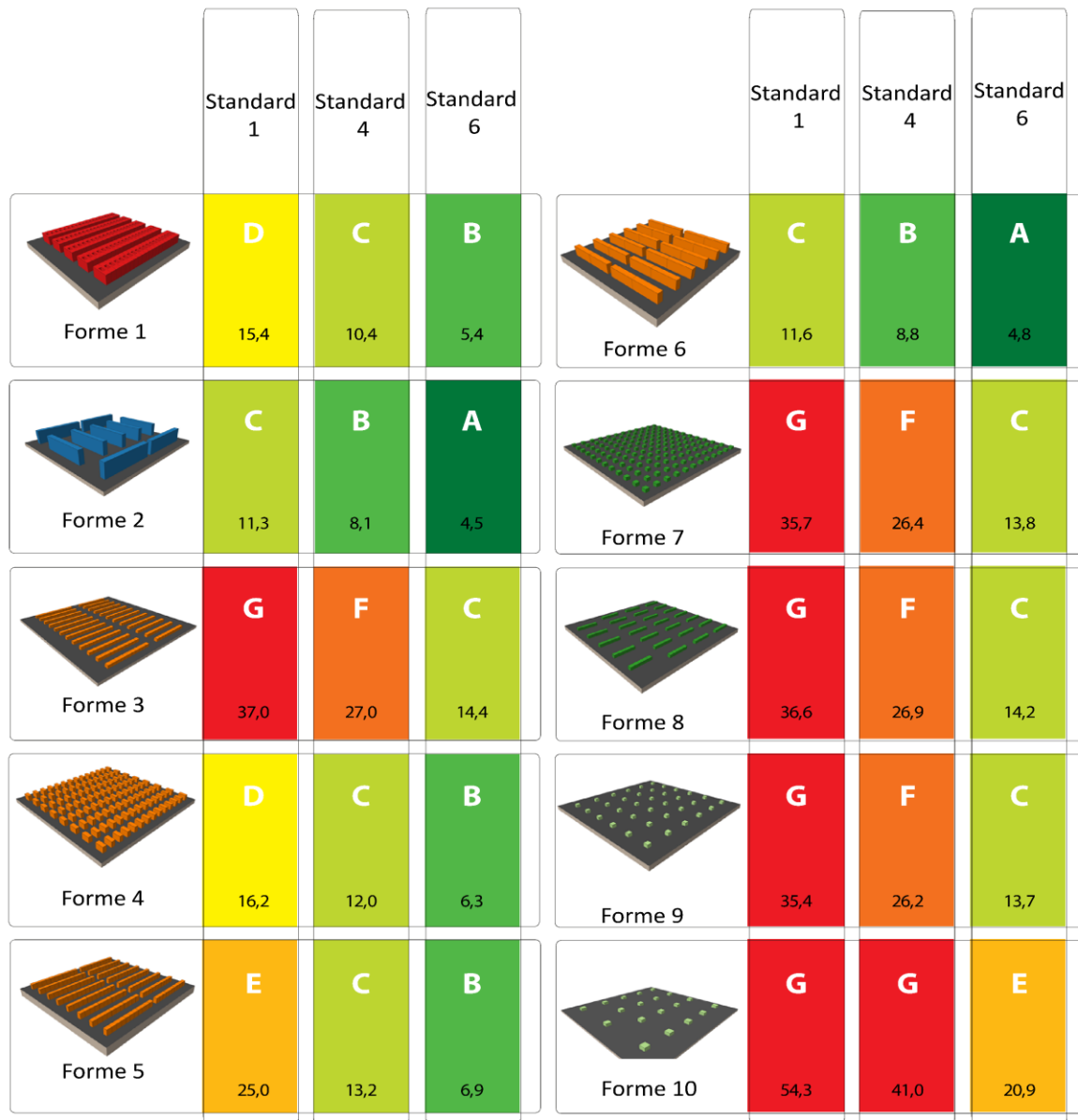


Figure 9-3 : Consommation énergétique résidentielle par habitant selon la forme architecturale et le standard de construction (en kWh/jour/personne)

Il est également possible de réaliser une analyse des consommations énergétiques résidentielles par m² de surface de plancher, les surfaces résidentielles associées aux individus n'étant pas similaires dans toutes les formes architecturales (Figure 9-4).

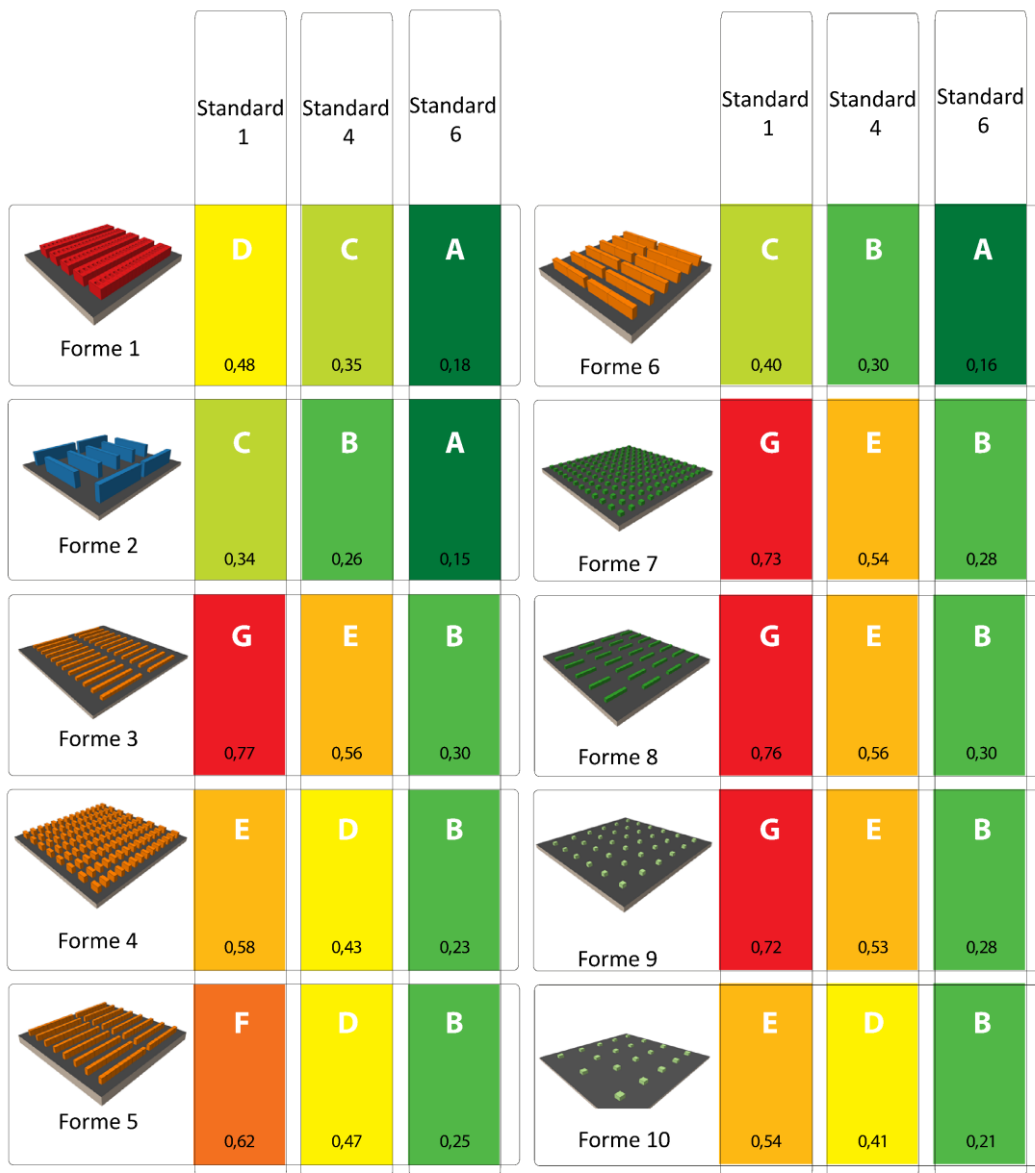


Figure 9-4 : Consommation énergétique résidentielle par mètre carré selon la forme architecturale et le standard de construction (en kWh/jour/m²)

À standard de construction équivalent, les formes les plus consommatrices en énergie par m² sont la forme 3 du tissu mixte et dense (maison individuelle mitoyenne) et les formes 7 et 8 du tissu individuel dense (maisons individuelles mitoyennes et maisons individuelles détachées). Les formes les moins consommatrices d'énergie sont le grand collectif mitoyen avec cour intérieure (forme 1), le grand collectif isolé (forme 2) et le grand collectif mitoyen (forme 6). Ces trois formes présentent une compacité et un ratio surface passive sur surface active faibles avec une densité élevée. À l'inverse, les formes les plus consommatrices d'énergie sont les formes qui présentent une compacité, un ratio surface passive sur surface active élevé et une densité de bâtie faible.

Nous voyons ainsi que la forme architecturale bâtie impacte les consommations d'énergies résidentielles (Figure 9-5).

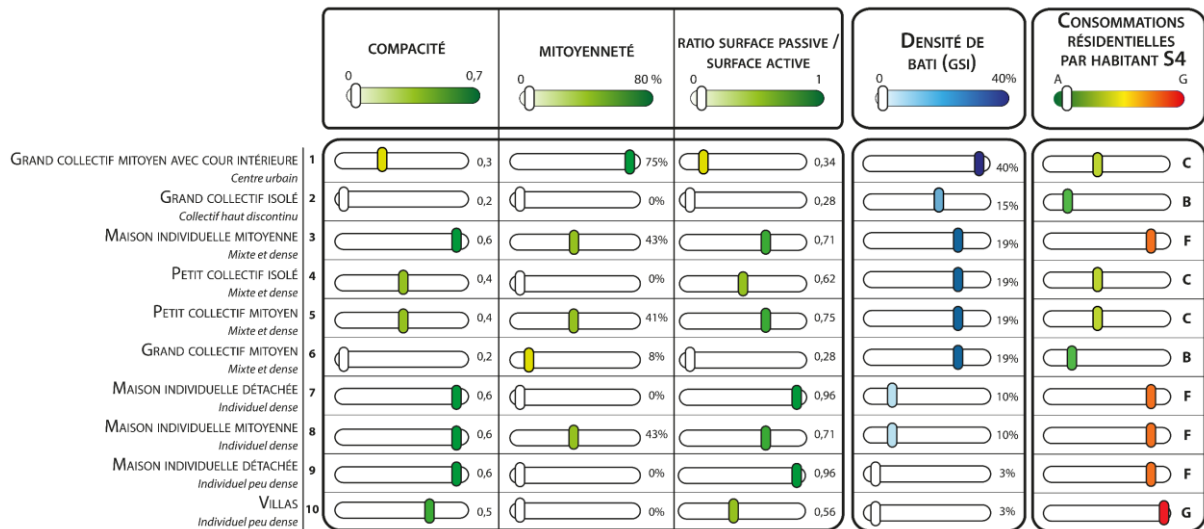


Figure 9-5 : L'impact de l'architecture bâtie et des tissus urbains sur la consommation d'énergie résidentielle des individus

Une analyse agrégée à l'échelle des tissus et des structures urbaines est menée par la suite permettant d'avoir une vision plus globale de ces consommations énergétiques.

Analyse agrégée des consommations énergétiques résidentielles par tissus urbains et structures urbaines

La figure présente les consommations énergétiques résidentielles moyennes par habitant à l'échelle des tissus urbains (Figure 9-6).

	Centre urbain	Mixte et dense	Collectif haut discontinu	Individuel dense	Individuel peu dense	Ensemble des tissus
Standard 1	D 15,4	E 22,3	C 11,3	G 36,1	G 44,7	F 27,9
Standard 4	C 10,4	D 15,1	B 8,1	F 26,6	G 33,4	E 20,1
Standard 6	B 5,4	B 8,0	A 4,5	C 14,0	D 17,3	C 10,6

Figure 9-6 : Les consommations énergétiques résidentielles par habitant par tissu urbain (en kWh/jour/personne)

Nous pouvons voir que le tissu urbain collectif haut discontinu est le plus économe en énergie, et ce quel que soit le standard de construction. Il présente ainsi une consommation énergétique par habitant quatre fois moins élevée que le tissu individuel peu dense, le plus consommateur en énergie. Le collectif haut discontinu est en effet composé d'une unique forme architecturale, la forme 2 (grand collectif isolé), qui est la moins consommatrice en énergie. Le centre urbain se positionne derrière le tissu collectif haut discontinu, avec des

consommations également faibles, comprises entre 5,4 et 15,4 kWh/jour/habitant. Le tissu mixte et dense présente des consommations énergétiques par habitant plus élevées. En standard de construction 4, il présente ainsi une consommation similaire à celle du centre urbain en standard 1 (étiquette énergétique D). Ce tissu est en effet composé des formes architecturales 3 à 6 qui sont plus consommatrices que les formes architecturales composant le centre urbain et le collectif haut discontinu. Enfin, les tissus les plus consommateurs en énergie par habitant sont l'individuel dense et l'individuel peu dense. Ils présentent ainsi des consommations 3 à 4 fois supérieures à celle du collectif haut discontinu. Ils sont composés des formes architecturales les plus consommatrices en énergies (formes 7 à 10).

Concernant les structures urbaines, nous pouvons voir que la ville monocentrique périurbaine présente la plus forte consommation énergétique résidentielle par habitant, comprise entre 11 et 29 kWh/jour/habitant selon le standard de construction (Tableau 9-4).

Structure urbaine	Consommation énergétique par habitant (en kWh/jour/habitant)		
	Standard 1	Standard 4	Standard 6
Monocentrique périurbaine	29,0	21,0	11,0
Monocentrique axialisée	28,8	20,8	10,9
Polycentrique hiérarchisée	26,5	19,0	10,0

Tableau 9-4 : Les consommations énergétiques résidentielles totales et par habitant par ville archétypale

Cette ville est en effet celle qui présente la part la plus importante de tissu individuel dense et peu dense. La ville polycentrique apparaît à l'inverse comme la moins consommatrice en énergie par habitant, avec une consommation comprise entre 10 et 27 kWh/jour/habitant. Cela s'explique par la faible part de tissus individuel dense et peu dense dans cette ville.

Une cartographie de la consommation énergétique résidentielle par habitant dans les trois villes archétypales est disponible en annexe (Annexe 47).

9.2 Analyse conjointe des consommations énergétiques individuelles

Dans cette section, les consommations énergétiques résidentielles simulées sont croisées avec celles liées aux mobilités quotidiennes. Les résultats obtenus sont présentés et analysés afin de tester nos hypothèses.

9.2.1 Méthode d'analyse des résultats

9.2.1.1 Le croisement des consommations énergétiques

Dans la partie 8.2.2.1 concernant l'estimation des consommations énergétiques liées aux mobilités quotidiennes, nous avons défini trois niveaux de consommations énergétiques différents (maximal, intermédiaire et minimal) en fonction du type de véhicule utilisé pour les déplacements en voiture et du taux de remplissage pour les déplacements en TC. Concernant les consommations résidentielles, nous avons également choisi plusieurs niveaux de consommation, en fonction du standard de construction (Standard 1, 4 ou 6). La méthode proposée pour croiser ces deux consommations sectorielles consiste à réaliser des croisements entre un standard unique et un niveau de mobilités. Avec cette méthode, nous obtenons une matrice de neuf croisements possibles à analyser (Figure 9-7).

		CONSOMMATIONS RÉSIDENTIELLES		
		STANDARD 1	STANDARD 4	STANDARD 6
CONSOMMATIONS LIÉES AUX MOBILITÉS QUOTIDIENNES	MAXIMALE	CROISEMENT 1	CROISEMENT 2	CROISEMENT 3
	INTERMÉDIAIRE	CROISEMENT 4	CROISEMENT 5	CROISEMENT 6
	MINIMALE	CROISEMENT 7	CROISEMENT 8	CROISEMENT 9

Figure 9-7 : Les différents croisements de consommations énergétiques possibles

Si cette méthode est simple à mettre en œuvre et permet une compréhension des effets de la forme urbaine sur les consommations énergétiques individuelles, elle ne permet cependant pas d'obtenir des résultats très réalistes. Une autre méthode de croisement des consommations énergétiques résidentielles avec celles liées aux mobilités quotidiennes consiste à construire des scénarios, en affectant aux différentes mailles de tissu urbain des standards et des niveaux de mobilités différents en fonction de certains critères. Si cette méthode nous permettrait d'obtenir des résultats plus réalistes, elle ne permet pas de répondre à nos hypothèses et n'est donc pas appliquée ici.

9.2.1.2 Le recours aux étiquettes énergétiques territoriales

Sur le même modèle que les étiquettes énergétiques des consommations énergétiques générées par les mobilités quotidiennes et des consommations énergétiques résidentielles, nous proposons de recourir aux étiquettes énergétiques pour l'analyse des résultats combinés. Ici, nous établissons une étiquette énergétique totale, combinaison des consommations résidentielles et de celles liées aux mobilités quotidiennes, basée sur la consommation par habitant (en kWh/jour/habitant) (Figure 9-8).

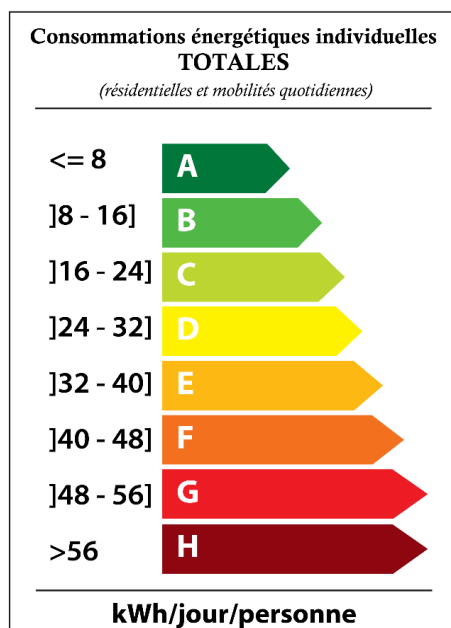


Figure 9-8 : L'étiquette énergétique pour les consommations énergétiques totales des individus

9.2.2 Analyse croisée des consommations énergétiques individuelles

La première constatation que nous pouvons faire est que la consommation individuelle résidentielle représente une part dominante de la consommation énergétique totale pour la majorité des croisements de consommations énergétiques possibles (

Tableau 9-5).

Part des consommations résidentielles		Standard de construction résidentiel		
		Standard 1	Standard 4	Standard 6
Niveau des consommations liées aux mobilités	Maximal	71%	64%	48%
	Intermédiaire	81%	76%	62%
	Minimal	88%	84%	74%

*en gras les valeurs inférieures à 50%.

Tableau 9-5 : La part du résidentiel dans les consommations énergétiques totales

Elle représente ainsi jusqu'à 88% de la consommation énergétique totale dans le cas du croisement du

standard 1 avec le niveau minimal de consommation liée aux mobilités quotidiennes. Le croisement du standard 6 avec le niveau maximal des mobilités est le seul cas où la consommation liée aux mobilités quotidiennes est majoritaire. L'analyse des liens entre la forme urbaine et les consommations énergétiques totales sera ainsi marquée par cette prédominance du secteur résidentiel.

9.2.2.1 L'impact de la forme urbaine locale sur les consommations énergétiques totales

Analyse globale

L'analyse des consommations énergétiques totales nous montre que le tissu urbain a un impact sur ces consommations (Figure 9-9).

CONSOMMATIONS RÉSIDENTIELLES						CONSOMMATION LIÉES AUX MOBILITÉS QUOTIDIENNES
	Standard 1		Standard 4		Standard 6	
Centre urbain	C 21,4	C	16,4	B	11,4	
Mixte et dense	D 31,8	D	24,6	C	17,5	
Collectif haut discontinu	C 19,2	B	16,0	B	12,4	
Individuel dense	G 49,9	F	40,4	D	27,8	
Individuel peu dense	H 63,3	G	52,1	E	35,9	
Centre urbain	C 18,8	B	13,7	B	8,7	Intermédiaire
Mixte et dense	D 27,6	C	20,4	B	13,3	
Collectif haut discontinu	B 15,6	B	12,4	B	8,8	
Individuel dense	F 43,8	E	34,3	C	21,7	
Individuel peu dense	G 55,0	F	43,8	D	27,6	
Centre urbain	C 17,4	B	12,4	A	7,4	Minimale
Mixte et dense	D 25,4	C	18,3	B	11,2	
Collectif haut discontinu	B 13,9	B	10,7	A	7,1	
Individuel dense	F 40,7	D	31,2	C	18,6	
Individuel peu dense	G 50,9	E	39,6	C	23,5	

Figure 9-9 : Les consommations énergétiques individuelles totales par habitant en fonction des tissus urbains

Nous observons globalement les mêmes tendances que celles observées lors de l'analyse des consommations énergétiques résidentielles et de celle des consommations liées aux mobilités quotidiennes. Ainsi, à hypothèses de consommation équivalentes (standard de construction et niveau de consommation associé aux mobilités) :

- Le tissu individuel peu dense présente les consommations énergétiques par habitant les plus élevées, comprises entre 23 et 63 kWh/jour/personne (étiquettes C à H) ;
- Le tissu individuel dense présente les secondes consommations énergétiques par habitant les plus importantes, 1,2 fois inférieures à celles du tissu individuel peu dense. Elles sont comprises entre 19 et 50 kWh/jour/personne (étiquettes C à G) ;

- Le tissu mixte et dense se positionne en troisième place, avec des consommations énergétiques par habitant plus de trois fois inférieures à celles du tissu individuel peu dense. Elles sont comprises entre 7 et 19 kWh/jour/personne (étiquettes B à D).

Les tissus centre urbain et collectif haut discontinu présentent les consommations énergétiques totales par habitant les plus faibles avec des consommations comprises entre 7 et 21 kWh/jour/personne (étiquettes A à C). Cependant, selon les hypothèses retenues, on observe une hiérarchie énergétique différente entre ces deux tissus :

- Quand le niveau de consommations des mobilités est intermédiaire ou maximal et que le standard de construction est le meilleur (standard 6), la consommation par habitant est plus élevée dans le tissu collectif haut discontinu. On retrouve alors une hiérarchie énergétique des tissus urbains identiques à celle observée lors de l'analyse des consommations énergétiques liées aux mobilités quotidiennes. Dans ces situations, les consommations énergétiques résidentielles plus faibles des habitants du collectif haut discontinu sont compensées par de plus fortes consommations énergétiques liées aux mobilités quotidiennes.
- Dans les autres croisements, le tissu centre urbain présente une consommation énergétique par habitant plus importante et on retrouve une hiérarchie énergétique identique à celle observée pour les consommations résidentielles. Dans ces situations, les consommations énergétiques des mobilités quotidiennes plus faibles des habitants du centre urbain sont compensées par de plus fortes consommations énergétiques résidentielles.

La figure suivante propose une synthèse des analyses des consommations énergétiques totales par habitant en fonction des tissus urbains (Figure 9-10).

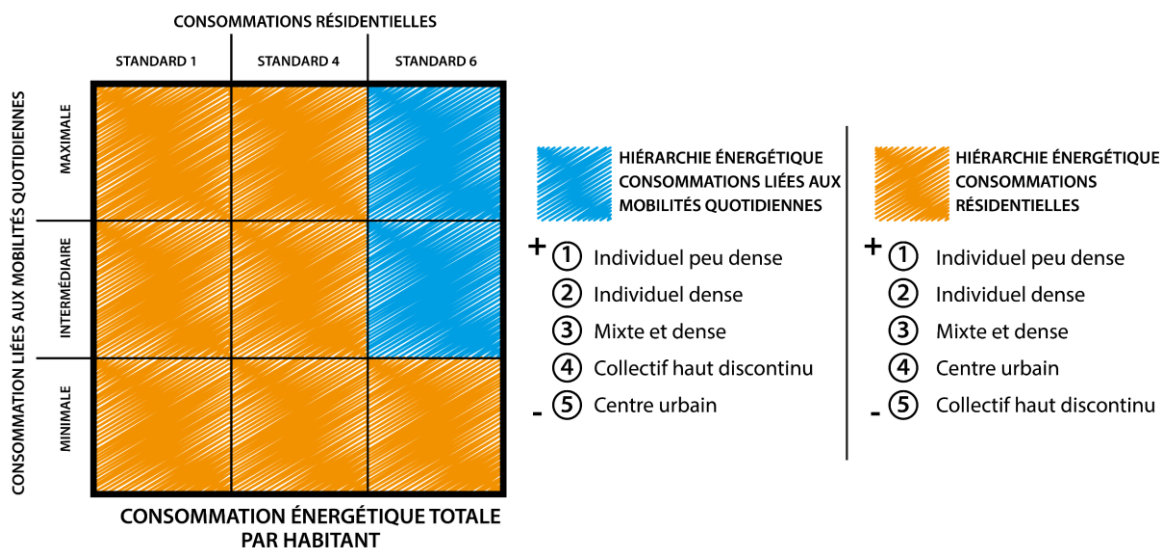


Figure 9-10 : Synthèse de l'analyse des consommations énergétiques totales par habitant en fonction des tissus urbains

Une analyse approfondie des consommations énergétiques totales par habitant par catégories d'individus est

conduite par la suite.

Analyse détaillée par catégories d'individus

L'analyse détaillée des consommations énergétiques totale par catégories d'individu nous apporte plusieurs enseignements concernant l'impact du tissu urbain (Figure 9-12). Tout d'abord, nous pouvons voir que le tissu urbain impacte les consommations énergétiques totales et ce quel que soit la catégorie d'individu. Ainsi, à hypothèse de consommation équivalentes (standard de construction et niveau de consommation associé aux mobilités) et pour toutes les catégories d'individus :

- Les habitants du tissu individuel peu dense apparaissent comme les plus consommateurs en énergie. Leurs consommations sont comprises entre 18 et 76 kWh/jour/personne (étiquettes C à H).
- Les habitants du tissu individuel dense présentent les secondes consommations énergétiques les plus importantes, 1,2 fois inférieures à celles du tissu individuel peu dense. Elles sont comprises entre 14 et 60 kWh/jour/personne (étiquettes B à G) ;
- Les habitants du tissu mixte et dense se positionnent en troisième place, avec des consommations énergétiques environ deux fois inférieures à celles du tissu individuel peu dense. Elles sont comprises entre 8 et 40 kWh/jour/personne (étiquettes B à F) ;
- Enfin, les tissus centre urbain et collectif haut discontinu présentent les consommations énergétiques totales par habitant les plus faibles avec des consommations comprises entre 4,6 et 27 kWh/jour/personne (étiquettes A à D).

Cependant, selon les hypothèses retenues et la catégorie d'individu concernée, on observe une hiérarchie énergétique différente entre ces deux tissus :

- Le centre urbain apparaît moins consommateurs en énergie que le collectif haut discontinu dans plusieurs cas :
 - En standard 4, avec un niveau de consommation des mobilités maximal, pour les habitants inactifs et pour l'ensemble des actifs ;
 - En standard 6, avec un niveau de consommation des mobilités maximal, pour toutes les catégories d'individus sauf les scolaires ;
 - En standard 6, avec un niveau de consommation des mobilités intermédiaire, pour toutes les catégories d'individus sauf les scolaires et les étudiants ;
 - En standard 6, avec un niveau de consommation des mobilités minimal, pour l'ensemble des actifs.

Dans ces différents cas, on retrouve alors une hiérarchie énergétique des tissus urbains identiques à celle observée lors de l'analyse des consommations énergétiques liées aux mobilités quotidiennes. Les consommations énergétiques résidentielles plus fortes des habitants du centre urbain sont compensées par de plus faibles consommations énergétiques liées aux mobilités quotidiennes.

- Dans tous les autres cas, le centre urbain présente une consommation énergétique par habitant plus

importante et on retrouve une hiérarchie énergétique identique à la hiérarchie énergétique résidentielle. Dans ces situations, les consommations énergétiques des mobilités quotidiennes plus fortes des habitants du collectif haut discontinu sont compensées par de plus faibles consommations énergétiques résidentielles.

La figure suivante propose une synthèse des analyses des consommations énergétiques totales par habitant en fonction des tissus urbains et des types d'individus (Figure 9-11).

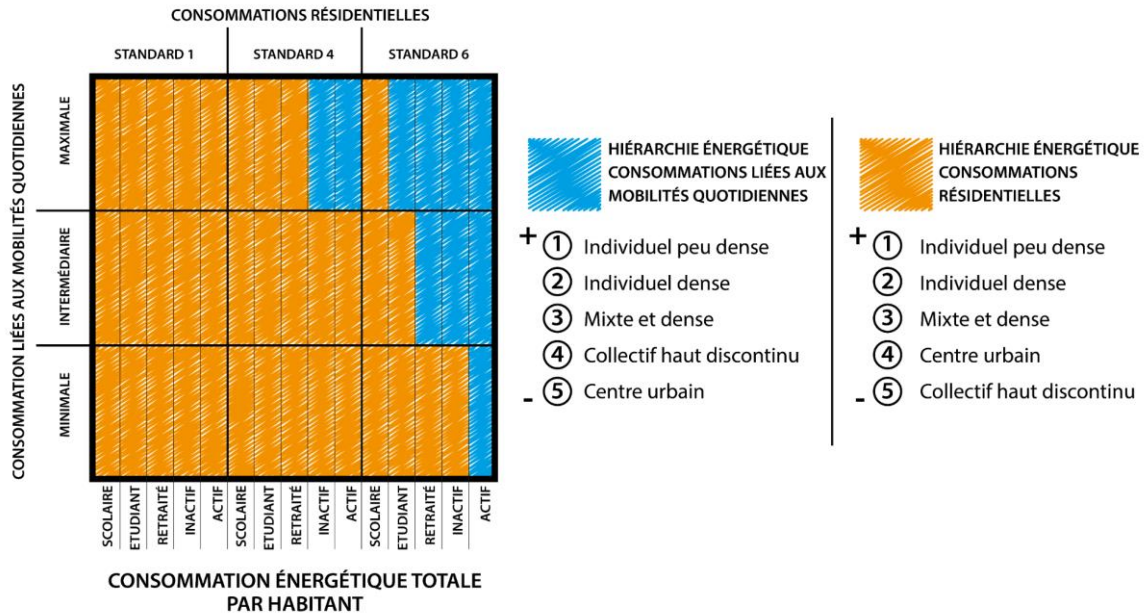


Figure 9-11 : Synthèse de l'analyse des consommations énergétiques totales par habitant en fonction des tissus urbains et des catégories d'individus

	Standard 1									Standard 4									Standard 6									
Centre urbain	16,0	18,8	18,4	19,6	25,2	27,1	27,0	23,3	27,1	11,0	13,8	13,4	14,5	20,2	22,1	22,0	18,2	22,1	6,0	8,8	8,4	9,5	15,2	17,1	17,0	13,3	17,1	Maximale
Mixte et dense	23,1	27,5	27,1	29,0	39,4	40,8	40,8	35,9	40,5	15,9	20,3	20,0	21,9	32,2	33,6	33,7	28,7	33,4	8,8	13,2	12,9	14,8	25,1	26,5	26,6	21,6	26,3	
Collectif haut discontinu	12,2	16,1	16,5	18,1	25,1	26,1	26,2	22,6	26,0	9,0	12,9	13,3	14,9	21,9	22,9	23,0	19,4	22,8	5,4	9,3	9,7	11,3	18,3	19,2	19,4	15,8	19,2	
Individuel dense	37,4	43,9	44,1	46,7	61,0	60,9	61,3	56,0	60,5	27,9	34,4	34,6	37,2	51,5	51,4	51,8	46,5	51,0	15,3	21,8	22,0	24,6	38,9	38,8	39,2	33,9	38,4	
Individuel peu dense	46,7	55,6	55,9	60,0	77,5	76,0	76,8	71,4	75,6	35,5	44,3	44,7	48,8	66,3	64,8	65,6	60,2	64,4	19,3	28,2	28,5	32,6	50,1	48,6	49,4	44,0	48,2	
Centre urbain	15,6	16,8	17,1	17,7	21,1	22,1	22,0	19,8	22,2	10,5	11,8	12,1	12,7	16,1	17,1	17,0	14,8	17,1	5,6	6,8	7,1	7,7	11,1	12,1	12,0	9,8	12,2	Intermédiaire
Mixte et dense	22,5	24,5	25,0	26,0	32,2	32,9	32,9	29,9	32,8	15,3	17,4	17,9	18,9	25,0	25,7	25,7	22,8	25,6	8,2	10,3	10,8	11,8	17,9	18,6	18,6	15,7	18,5	
Collectif haut discontinu	11,5	13,4	14,2	15,1	19,3	19,8	19,9	17,7	19,8	8,3	10,2	11,0	11,9	16,1	16,5	16,6	14,5	16,6	4,7	6,5	7,4	8,3	12,5	12,9	13,0	10,8	13,0	
Individuel dense	36,5	39,5	40,6	42,0	50,6	50,3	50,5	47,3	50,2	27,0	30,0	31,1	32,5	41,1	40,8	41,0	37,8	40,7	14,4	17,4	18,5	19,9	28,5	28,2	28,4	25,2	28,1	
Individuel peu dense	45,2	49,4	51,1	53,2	63,8	62,6	63,1	59,8	62,5	34,0	38,2	39,8	41,9	52,5	51,4	51,9	48,5	51,3	17,8	22,0	23,6	25,8	36,4	35,2	35,7	32,3	35,1	
Centre urbain	15,5	16,3	16,4	16,8	18,8	19,4	19,4	18,1	19,5	10,5	11,2	11,4	11,8	13,8	14,4	14,4	13,0	14,4	5,5	6,2	6,4	6,8	8,8	9,4	9,4	8,1	9,5	Minimale
Mixte et dense	22,4	23,6	23,9	24,5	28,2	28,6	28,7	26,9	28,6	15,2	16,4	16,8	17,4	21,1	21,5	21,5	19,7	21,4	8,1	9,3	9,7	10,3	14,0	14,4	14,4	12,6	14,3	
Collectif haut discontinu	11,4	12,5	13,1	13,6	16,1	16,4	16,4	15,1	16,4	8,2	9,3	9,8	10,4	12,9	13,2	13,2	11,9	13,2	4,6	5,7	6,2	6,7	9,3	9,5	9,6	8,3	9,6	
Individuel dense	36,3	38,1	38,8	39,6	44,8	44,6	44,8	42,8	44,5	26,8	28,6	29,3	30,1	35,3	35,1	35,3	33,3	35,1	14,2	16,0	16,7	17,5	22,7	22,5	22,7	20,7	22,4	
Individuel peu dense	45,0	47,5	48,5	49,7	56,1	55,4	55,7	53,7	55,4	33,7	36,2	37,3	38,5	44,9	44,2	44,5	42,5	44,1	17,6	20,0	21,1	22,3	28,7	28,0	28,3	26,3	27,9	
	Scolaire	Etudiant	Retraité	Inactif	Artisan	Cadre	Prof inter.	Employé	Ouvrier	Scolaire	Etudiant	Retraité	Inactif	Artisan	Cadre	Prof inter.	Employé	Ouvrier	Scolaire	Etudiant	Retraité	Inactif	Artisan	Cadre	Prof inter.	Employé	Ouvrier	

Figure 9-12 : Consommations énergétiques totales par habitant en fonction du tissu et de la catégorie d'individu (en kWh/jour/personne)

9.2.2.2 L'impact de la structure urbaine sur les consommations énergétiques individuelles

Analyse globale

L'analyse des consommations énergétiques totales par habitant nous montre que la structure urbaine a un faible impact sur ces consommations (Figure 9-13). Nous retrouvons cependant les mêmes tendances que celles observées lors de l'analyse des consommations énergétiques résidentielles ou de l'analyse des consommations énergétiques des mobilités quotidiennes. La hiérarchie énergétique étant identique pour ces deux secteurs, le même classement apparaît pour la consommation énergétique totale. Ainsi, la ville monocentrique périurbaine présente les consommations les plus fortes, suivies par la ville monocentrique axialisée avec des consommations légèrement plus faibles, puis par la ville polycentrique hiérarchisée avec les consommations par habitant les plus faibles.

		CONSOMMATIONS RÉSIDENTIELLES				
		Standard 1	Standard 4	Standard 6		
Monocentrique axialisée	F	41,3	E 33,2	C 23,4	Maximale	CONSOMMATION LIÉE AUX MOBILITÉS QUOTIDIENNES
Monocentrique périurbaine	F	42,4	E 34,4	D 24,4		
Polycentrique hiérarchisée	E	36,1	D 28,6	C 19,6		
Monocentrique axialisée	E	35,7	D 27,7	C 17,8	Intermédiaire	
Monocentrique périurbaine	E	36,4	D 28,4	C 18,4		
Polycentrique hiérarchisée	D	31,8	D 24,3	B 15,3		
Monocentrique axialisée	E	32,9	D 24,9	B 15,1	Minimale	
Monocentrique périurbaine	E	33,4	D 25,5	B 15,5		
Polycentrique hiérarchisée	D	29,7	C 22,2	B 13,2		

Figure 9-13 : Consommation énergétique totale par habitant en fonction de la structure urbaine

Une analyse approfondie par tissus urbains est conduite par la suite.

Analyse détaillée par tissu urbain

L'analyse détaillée des consommations énergétiques totale par type de tissu urbain nous apporte plusieurs enseignements concernant l'impact de la forme urbaine (Figure 9-14) :

- Tout d'abord, quels que soient le standard de construction et le niveau de mobilités, la forme urbaine globale a un faible impact sur les consommations énergétiques des habitants des différents tissus urbains :
 - La hiérarchie énergétique des tissus urbains n'est pas affectée par la forme urbaine globale.

Nous retrouvons les éléments d'analyse montrés dans la sous-partie précédente. Quand le niveau de consommations des mobilités est intermédiaire ou maximal et que le standard de construction est le meilleur (standard 6), la consommation par habitant est plus élevée dans le tissu collectif haut discontinu ; dans les autres croisements, le tissu centre urbain présente une consommation énergétique par habitant plus importante.

- Au sein d'un même tissu, les consommations varient ainsi peu d'une ville à une autre (moins de 25% d'écart entre la ville qui présente la consommation maximale et celle avec la consommation minimale). Ces écarts sont particulièrement faibles lorsque le niveau de mobilité est minimal et inversement, ce qui montre que la structure urbaine impacte essentiellement les consommations liées aux mobilités quotidiennes.
- Une analyse fine des consommations montre que si l'effet de la forme urbaine globale est faible, il n'impacte pas les consommations énergétiques de la même manière selon le tissu urbain :
- Les habitants résidants dans les tissus individuel dense et peu denses présentent une consommation énergétique plus élevée dans la ville monocentrique périurbaine que dans la ville monocentrique axialisée et que dans la ville polycentrique hiérarchisée ;
 - Les habitants du tissu mixte et dense consomment plus d'énergie dans la ville monocentrique axialisée que dans les deux autres villes ;
 - Les habitants des tissus centre urbain et collectif haut discontinu consomment plus d'énergie plus élevée dans la ville polycentrique hiérarchisée.

Une analyse des consommations énergétiques détaillées par tissu urbain et par catégorie d'individu a également été conduite (Annexe 48, Annexe 49 et Annexe 50). Cette analyse confirme le faible impact de la structure urbaine sur les consommations énergétiques totales, notamment pour les individus se déplaçant peu (scolaires, étudiants, retraités et inactifs). Une cartographie de la consommation énergétique totale par habitant dans les trois villes archétypales est également disponible en annexe (Annexe 51).

	Standard 1			Standard 4			Standard 6			
Centre urbain	C 20,6	C 21,3	C 22,1	B 15,5	C 16,2	C 17,1	B 10,6	B 11,3	B 12,1	Maximale
Mixte et dense	D 31,9	E 34,2	D 30,2	D 24,5	D 27,0	C 23,2	C 17,1	C 20,1	C 16,1	
Collectif haut discontinu	C 18,4	C 19,0	C 19,9	B 15,2	B 15,8	C 16,7	B 11,6	B 12,2	B 13,1	
Individuel dense	G 54,0	G 50,2	F 47,6	F 44,5	F 40,7	E 38,1	D 31,8	D 28,1	D 25,5	
Individuel peu dense	H 66,6	H 61,9	H 59,7	G 55,3	G 50,7	G 48,5	E 39,0	E 34,6	E 32,4	
Centre urbain	C 18,3	C 18,7	C 19,1	B 13,2	B 13,6	B 14,1	B 8,3	B 8,6	B 9,1	Intermédiaire
Mixte et dense	D 28,0	D 28,8	D 26,6	C 20,6	C 21,5	C 19,6	B 13,2	B 14,6	B 12,5	
Collectif haut discontinu	B 15,2	B 15,5	B 16,0	B 12,0	B 12,3	B 12,8	B 8,4	B 8,7	B 9,2	
Individuel dense	F 46,1	F 44,0	F 42,5	E 36,6	E 34,5	E 33,0	C 23,9	C 21,9	C 20,4	
Individuel peu dense	H 57,0	G 54,1	G 52,9	F 45,7	F 43,0	F 41,7	D 29,4	D 26,9	D 25,6	
Centre urbain	C 17,1	C 17,4	C 17,6	B 12,1	B 12,3	B 12,6	A 7,1	A 7,3	A 7,6	Minimale
Mixte et dense	D 26,1	D 26,1	D 24,8	C 18,7	C 18,8	C 17,8	B 11,3	B 11,9	B 10,7	
Collectif haut discontinu	B 13,6	B 13,8	B 14,1	B 10,4	B 10,6	B 10,9	A 6,8	A 7,0	A 7,3	
Individuel dense	F 42,1	F 40,8	E 39,9	E 32,6	D 31,3	D 30,4	C 20,0	C 18,7	C 17,8	
Individuel peu dense	G 52,1	G 50,2	G 49,5	F 40,9	E 39,1	E 38,3	D 24,6	C 23,0	C 22,2	
	Monocentrique périurbaine	Monocentrique axialisée	Polycentrique hiérarchisée	Monocentrique périurbaine	Monocentrique axialisée	Polycentrique hiérarchisée	Monocentrique périurbaine	Monocentrique axialisée	Polycentrique hiérarchisée	

Figure 9-14 : Consommation énergétique individuelle totale en fonction du tissu urbain et de la structure urbaine (en kWh/jour/personne)

9.3 Synthèse du chapitre 9

Dans ce chapitre nous avons simulé les consommations énergétiques résidentielles dans les différentes formes d'architectures bâties. Pour cela, nous avons utilisé la plateforme de simulation CEA.

À partir de ces simulations, nous avons tout d'abord montré le rôle de la forme urbaine sur les consommations énergétiques résidentielles. Nous avons ainsi observé des variations importantes des consommations énergétiques des habitants entre les différentes formes architecturales bâties. Nous avons ainsi montré qu'à standard de construction équivalent, les formes les moins consommatrices en énergie sont le grand collectif isolé, le grand collectif mitoyen et le grand collectif mitoyen avec cour intérieure. À l'inverse, les formes les plus consommatrices sont les villas isolées et les maisons individuelles mitoyennes. Cette analyse nous a également montré que les consommations énergétiques d'un habitant d'un même tissu sont différentes selon la forme architecturale, validant notre sous-hypothèse 1a. Notre hypothèse 1b n'est cependant pas validé, les consommations énergétiques d'un habitant des maisons individuelles mitoyennes et des maisons individuelles détachées étant identiques dans les tissus urbains individuels dense et peu dense. La figure suivante résume l'ensemble des apports de ce chapitre sur l'impact de la forme urbaine sur les consommations énergétiques résidentielles (Figure 9-15).

FORME URBAINE ET CONSOMMATIONS ÉNERGÉTIQUES RÉSIDENIELLES							
IMPACT DES ARCHITECTURES BÂTIES							
FORME	HIERARCHIE ÉNERGÉTIQUE*	STANDARD 1		STANDARD 4		STANDARD 6	
		Écart avec le numéro 1	Écart avec le précédent	Écart avec le numéro 1	Écart avec le précédent	Écart avec le numéro 1	Écart avec le précédent
FORME 2 Grand collectif isolé Collectif haut discontinu	1						
FORME 6 Grand collectif mitoyen Mixte et dense	2	+ 3 %	+ 3 %	+ 9 %	+ 9 %	+ 8 %	+ 8 %
FORME 1 Grand collectif mitoyen avec cour intérieure Centre urbain	3	+ 36 %	+ 33 %	+ 28 %	+ 17 %	+ 21 %	+ 12 %
FORME 4 Grand collectif isolé Mixte et dense	4	+ 44 %	+ 5 %	+ 48 %	+ 15 %	+ 40 %	+ 16 %
FORME 5 Petit collectif mitoyen Mixte et dense	5	+ 121 %	+ 54 %	+ 63 %	+ 10 %	+ 53 %	+ 9 %
FORME 9 Maisons individuelles détachées Individuel peu dense	6	+ 213 %	+ 42 %	+ 224 %	+ 98 %	+ 206 %	+ 100 %
FORME 7 Maisons individuelles détachées Individuel dense	7	+ 216 %	+ 1 %	+ 226 %	+ 1 %	+ 208 %	+ 1 %
FORME 8 Maisons individuelles mitoyennes Individuel dense	8	+ 223 %	+ 2 %	+ 232 %	+ 2 %	+ 217 %	+ 3 %
FORME 3 Maisons individuelles mitoyennes Mixte et dense	9	+ 227 %	+ 1 %	+ 234 %	+ 1 %	+ 220 %	+ 1 %
FORME 10 Villas Individuel peu dense	10	+ 380 %	+ 47 %	+ 407 %	+ 52 %	+ 366 %	+ 46 %

* 1 : Consommations énergétiques par habitant les plus faibles

Figure 9-15 : L'impact de la forme urbaine sur les consommations énergétiques individuelles résidentielles

Nous avons ensuite combiné les consommations énergétiques résidentielles aux consommations

énergétiques liées aux mobilités quotidiennes, simulées dans le chapitre précédent. Plusieurs éléments ont été mis en avant :

- Nous avons ainsi pu voir que la consommation individuelle résidentielle représente une part dominante de la consommation énergétique totale dans la majorité des cas.
- Ensuite, concernant la forme urbaine locale, nous avons pu voir que les consommations énergétiques totales sont très impactées par les tissus urbains. À hypothèses de consommations équivalentes, le tissu individuel peu dense présente les consommations énergétiques par habitant les plus fortes, suivi par le tissu individuel dense et le tissu mixte et dense. Les tissus centre urbain et collectif haut discontinu présentent les consommations énergétiques totales par habitant les plus faibles, mais selon les hypothèses retenues, le classement énergétique varie. Quand le niveau de consommations des mobilités est intermédiaire ou maximal et que le standard de construction est le meilleur (standard 6), la consommation par habitant est plus élevée dans le tissu collectif haut discontinu. Dans ces situations, les consommations énergétiques résidentielles plus faibles des habitants du collectif haut discontinu sont compensées par de plus fortes consommations énergétiques liées aux mobilités quotidiennes. Dans les autres cas, le tissu centre urbain présente une consommation énergétique par habitant plus importante. Dans ces situations, les consommations énergétiques des mobilités quotidiennes plus faibles des habitants du centre urbain sont compensées par de plus fortes consommations énergétiques résidentielles. Notre hypothèse 2 n'est ainsi qu'en partie validée : il existe des effets de compensation, mais uniquement pour certaines hypothèses et entre les deux tissus urbains les moins consommateurs.
- Enfin, concernant la forme urbaine globale, nous avons pu voir que celle-ci impacte faiblement les consommations énergétiques totales. Ainsi, la ville monocentrique périurbaine présente les consommations les plus fortes, suivies par la ville monocentrique axialisée, puis par la ville polycentrique hiérarchisée avec les consommations par habitant les plus faibles. L'analyse croisée de l'impact de la forme urbaine locale et de celui de la forme urbaine globale montre cependant que cette hiérarchie énergétique des structures urbaines varie selon le tissu urbain considéré. À l'inverse, la hiérarchie énergétique des tissus urbains n'est pas modifiée par l'impact de la structure urbaine, elle est identique dans les trois villes.

La figure suivante résume les apports principaux de ce chapitre sur l'impact de la forme urbaine sur les consommations énergétiques globales (Figure 9-16).

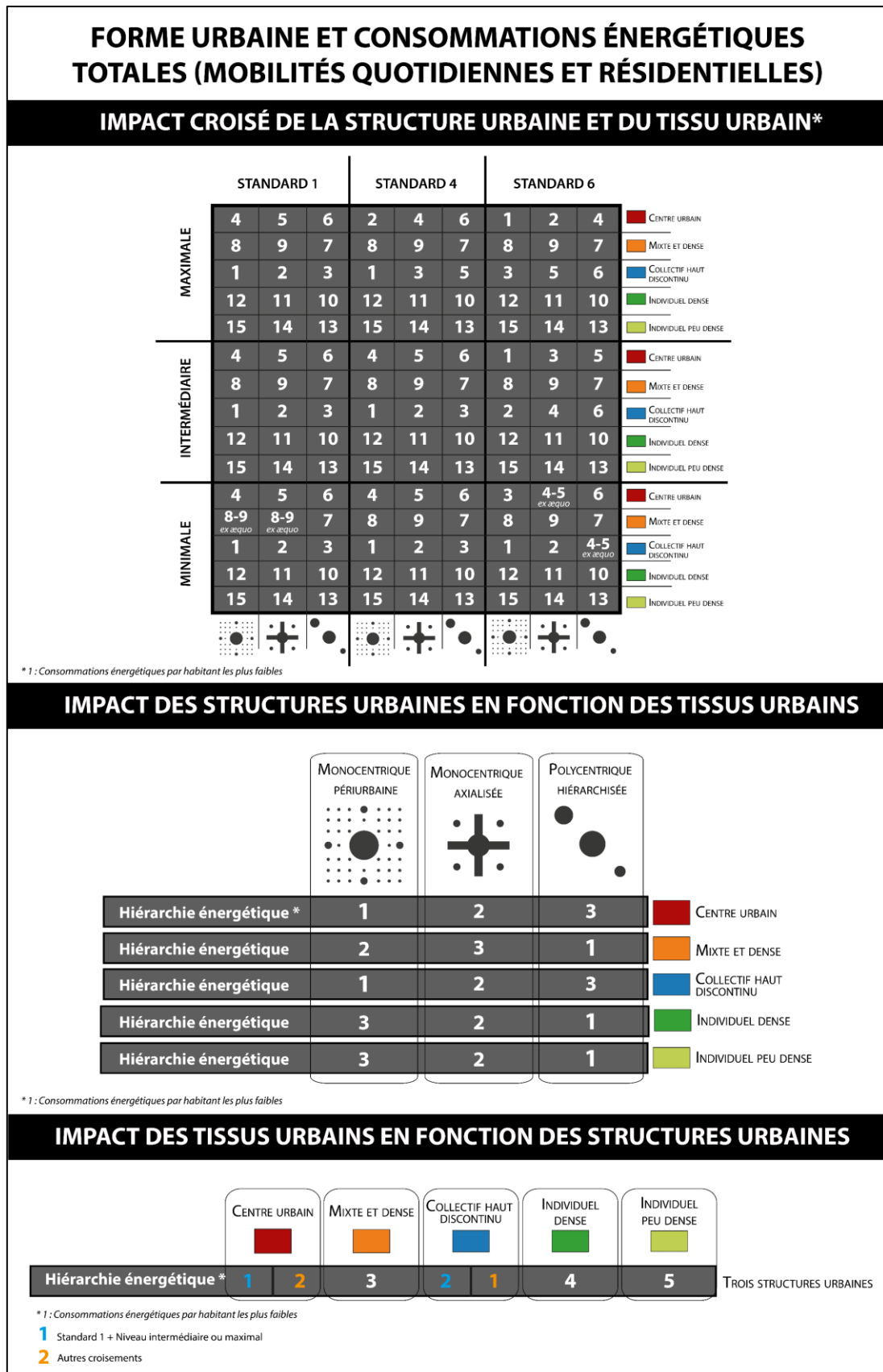


Figure 9-16 : l'impact de la forme urbaine sur les consommations énergétiques globales

Conclusion de la partie 3

Cette troisième partie constitue le cœur de notre travail. L'objectif a été de comprendre le rôle de la forme urbaine sur les consommations énergétiques relevant à la fois du secteur résidentiel et des mobilités quotidiennes afin d'identifier les formes urbaines les plus durables du point de vue des consommations énergétiques.

Concernant les consommations énergétiques liées aux mobilités quotidiennes, deux approches complémentaires ont été mises en place pour comprendre le rôle de la forme urbaine. La première, par une analyse des déplacements de plusieurs grandes villes françaises, a permis d'acquérir une première compréhension des liens entre la forme urbaine et les pratiques de mobilités. La seconde, par une modélisation et une simulation des déplacements dans les trois villes archétypales, a permis de mettre en évidence les liens existants entre les consommations énergétiques liées aux mobilités quotidiennes et la forme urbaine, aux deux échelles de l'agglomération et du quartier. Concernant les consommations énergétiques résidentielles, leur simulation avec CEA a également mis en évidence le rôle de la forme urbaine sur ces consommations, aux deux échelles du quartier de bâtiment. Enfin, le croisement des consommations résidentielles et de celles liées aux mobilités quotidiennes a permis de montrer l'impact de la forme urbaine sur ces consommations plus globales, et surtout de montrer l'existence d'effets de compensation entre ces deux consommations. Nous avons ainsi pu tester nos différentes hypothèses de recherche et répondre à notre objectif.

L'ensemble des éléments abordés dans ce travail ont soulevé des questions d'ordre à la fois théorique et méthodologique. Dans la conclusion de notre travail, nous proposerons donc un retour critique sur les méthodes adoptées et sur les résultats obtenus.

Conclusion générale

L'énergie est au cœur des politiques publiques d'aménagement et les questionnements sur la durabilité des formes urbaines sont aujourd'hui multiples. Les formes urbaines actuelles ne semblent en effet plus répondre aux besoins actuels des sociétés et génèrent de nombreux impacts négatifs. La raréfaction des ressources fossiles et leurs impacts négatifs sur le climat entraînent également un changement de paradigme : l'énergie qui a permis le développement des villes devient progressivement une contrainte pour leur aménagement. Les formes urbaines doivent ainsi s'adapter à un nouvel objectif qui est celui de la transition énergétique. Les enjeux sont majeurs, le modèle énergétique actuel nous entraînant dans une impasse évidente du point de vue des ressources, mais également d'un point de vue environnemental. Ainsi, le dernier rapport du GIEC (GIEC, 2021) sur le changement climatique est plus qu'alarmant. En France, les économies d'énergie sont l'un des axes prioritaires de la transition énergétique. La programmation pluriannuelle de l'énergie adoptée en avril 2020 pour la période 2019-2028, affiche ainsi des objectifs ambitieux : la consommation énergétique finale de la France doit diminuer de 16,5 % par rapport à 2012 d'ici 2028. Les villes abritent plus de 80 % de la population française et sont ainsi le principal lieu de consommation. Au sein de ces espaces, les consommations liées aux pratiques des individus, c'est-à-dire aux mobilités quotidiennes et à leurs activités à domicile constituent un champ d'action majeur, 32 % de l'énergie finale consommée en France étant dédiée aux transports (voyageurs et fret) et 29 % au résidentiel (SDES - Ministère de la Transition Écologique, 2020b). La question qui se pose alors est de savoir de quelle manière faire évoluer les formes urbaines actuelles pour atteindre ces objectifs. Une compréhension des interactions entre la forme urbaine et les consommations énergétiques individuelles est donc nécessaire afin d'apporter des éclairages sur les politiques publiques.

Partant du constat qu'il n'existe pas de consensus sur la nature des liens entre la forme urbaine et les consommations énergétiques individuelles, nous avons décidé d'orienter nos recherches pour répondre à cette question : quel est l'impact énergétique de la forme urbaine sur les consommations énergétiques individuelles ? Si ce questionnement, pourtant crucial pour la mise en œuvre d'une planification urbaine durable n'a toujours pas trouvé de réponse malgré de très nombreuses études sur le sujet, c'est en partie dû au fait qu'il sollicite des connaissances de plusieurs champs disciplinaires, que sont l'urbanisme, l'aménagement du territoire et l'énergétique urbaine. Par ailleurs, nous avons pu voir que cette question soulève de nombreuses difficultés méthodologiques. Ces difficultés nous ont conduits à adopter une démarche modélisatrice pour évaluer les effets de la forme urbaine sur les consommations énergétiques individuelles. Nous avons ainsi choisi de modéliser d'une part des villes archétypales comme terrains d'étude et d'autres part les consommations énergétiques des individus relevant à la fois des mobilités quotidiennes mais également résidentielles.

Cette approche est originale dans la mesure où la combinaison des deux secteurs que sont les transports et le résidentiel a fait l'objet de très peu d'études jusqu'à présent tout comme le recours à des villes archétypales pour répondre à cette question. D'un côté, la plupart des autres travaux scientifiques s'intéressant à l'impact de la forme urbaine sur les pratiques de mobilités quotidiennes se concentrent sur l'étude d'un ou plusieurs territoires particuliers.

De l'autre, les nombreuses études simulant les consommations énergétiques résidentielles peuvent avoir recours à des archétypes mais restent à l'échelle du bâtiment.

Les principaux apports de cette thèse sont tournés, d'une part, sur l'intérêt didactique de ses résultats pour alimenter les débats actuels sur les enjeux de la durabilité des villes, et d'autre part, sur l'intérêt méthodologique de cette approche de modélisation combinée bâtiment-transport sur des villes archétypales. Ainsi, ce travail a permis de questionner l'impact de la structure urbaine, du tissu urbain et de la forme architecturale, qui sont les trois échelles de la forme urbaine sur les pratiques de mobilités et les consommations associées, ainsi que sur les consommations résidentielles mais également sur les consommations globales, combinant ces deux secteurs. Les principaux résultats sont les suivants :

1. Le tissu urbain de résidence d'un individu a des effets sur ses pratiques de mobilités et sur les consommations qui leur sont associées. Ces effets sont différents selon la structure urbaine de résidence, mais également selon la catégorie d'individu et le motif de déplacement.
2. La structure urbaine de résidence d'un individu a des effets sur ses pratiques de mobilités et sur les consommations qui leur sont associées. Ces effets sont différents selon le tissu urbain de résidence, mais également selon la catégorie d'individu et le motif de déplacement.
3. L'architecture bâtie du lieu de résidence d'un individu a des effets sur ses consommations énergétiques résidentielles.
4. Il peut exister des effets de compensation entre les consommations énergétiques résidentielles et celles liées aux mobilités quotidiennes, mais uniquement pour les résidents des tissus urbains centre urbain et collectif haut discontinu et sous certaines hypothèses de consommations.

Concernant les développements méthodologiques, une des contributions importantes de ce travail de thèse a été de proposer une méthode de classification des tissus urbains. Ces classifications en tissus urbains sont une source de données en partie comparable à ce qui peut être extrait des MOS ou de l'Urban Atlas. La méthode que nous proposons présente l'avantage d'être plus automatisable que les méthodes de photo-interprétation utilisées actuellement pour construire les MOS et plus précise que les données de l'Urban Atlas, dont la caractérisation en milieu urbain se limite à un seul critère de densité de bâti. De la même manière, une autre contribution a été de proposer une méthode d'identification des caractéristiques fonctionnelles des tissus urbains. La méthode que nous proposons permet ainsi de connaître le nombre mais surtout l'organisation spatiale des aménités d'un territoire. Ces deux méthodes offrent un support de connaissance qui peut être utilisé pour différentes problématiques d'aménagement. Elles sont applicables, quelle que soit l'agglomération étudiée, et sans connaissance spécifique de l'espace à analyser. De plus, les règles d'affectation des aménités produites à partir de ces méthodes peuvent être utilisées lors de la modélisation d'autres agglomérations, réelles ou non, permettant par exemple de pallier à une absence de données. Un commentaire plus général peut également être fait concernant les villes archétypales générées. Elles ont ici été construites afin de répondre à un objectif précis, qui est celui d'identifier l'impact des formes urbaines sur les consommations énergétiques individuelles. Elles ne sont cependant pas utilisables exclusivement dans ce cadre, et pourraient également servir de terrains d'étude à d'autres problématiques de recherche en lien avec les formes urbaines, telles que la question des îlots de chaleur urbains ou encore de la pollution atmosphérique pour

citer des exemples.

Une autre contribution méthodologique originale réside dans la calibration du modèle de simulation des mobilités quotidiennes Mobisim-Soft. Le recours à 19 enquêtes déplacements de grandes agglomérations de France permet en effet d'obtenir des comportements par type d'individus qui sont standardisés, c'est-à-dire qui ne sont pas spécifiques à un seul territoire. Nous modélisons ainsi le comportement « *moyen* » d'un résident dans une grande aire urbaine française. Ce choix nous permet ainsi de pallier en partie à un des principaux inconvénients des approches modélisatrices, qui est la multiplicité des modèles. Dans les études sur le sujet recourant à une approche par la modélisation, le modèle utilisé est adapté à une zone d'étude. À chaque zone étudiée correspond ainsi modèle différent. L'acquisition et/ou le traitement de données similaires pour un autre terrain d'étude nécessitent un temps de travail important, tout comme la calibration du modèle, qui est une étape généralement longue et fastidieuse. Par ailleurs, certains types de données ne sont pas forcément toujours disponibles pour certains terrains d'étude. La méthode de calibration de notre modèle permet son utilisation sans modifications dans des agglomérations de taille équivalente, ce qui constitue une contribution majeure pour la modélisation des déplacements quotidiens.

Un certain nombre de limites ont été rencontrées lors de la réalisation de la thèse, et la plupart des choix méthodologiques faits pour la mise en œuvre des différents modèles peuvent être discutés. Il est nécessaire de les avoir à l'esprit pour pouvoir mettre correctement en perspective les résultats du travail. Concernant la modélisation et la génération des villes archétypales, certains paramètres de forme, qui ont été vus dans la littérature comme impactant les consommations énergétiques individuelles n'ont pas été pris en compte. La taille des villes et le design des tissus urbains sont ainsi deux dimensions de la forme urbaine dont nous n'évaluons pas l'impact sur les consommations énergétiques. Si cela n'enlève rien à la pertinence de nos résultats, il faut être conscient que l'intégration de nouveaux paramètres de formes pourrait venir modifier nos conclusions. Concernant la modélisation des déplacements quotidiens, des limites sont également à souligner. Tout d'abord concernant les données d'entrées, il est important de rappeler que les enquêtes déplacements françaises (EMD, EDVM et EDGT) sont des données agrégées. L'information précise du lieu d'habitation n'est pas disponible et seule une zone de résidence, appelée « *zone fine* » est donnée. Ces zones sont relativement fines dans le centre des villes, mais s'élargissent avec l'éloignement au centre. Ainsi, lorsque l'on mène une analyse sur les effets des caractéristiques du lieu de résidence, une perte d'information est inévitable. Constituant une autre limite, le modèle Mobisim-Soft distingue cinq modes de transports et repose sur la représentation de chaînes de déplacements (sortie du domicile), et non des déplacements. Ces choix ne permettent pas la modélisation d'intermodalité, par exemple l'utilisation du train puis du vélo pour un même déplacement. Pour autant le développement des modes de déplacements en libre-service et de l'électro-mobilité appelle à prendre en compte cette question dans notre modèle. De plus, contrairement aux modèles à quatre étapes classiques, nous n'affectons pas les déplacements sur le réseau et la capacité des réseaux de transports n'est pas un paramètre de notre modèle. La congestion n'est ainsi pas prise en compte dans notre évaluation de la consommation énergétique liée aux mobilités quotidiennes, alors même que l'on sait qu'elle génère une surconsommation lors des déplacements en voiture. Cependant cela permet de s'affranchir de la temporalité de la journée et de simplifier grandement la modélisation. De plus, il est possible d'intégrer de manière indirecte l'impact de la congestion, en choisissant une condition de circulation de type « *ville* » lors de l'estimation des consommations à partir des distances parcourues en voiture.

Le choix méthodologique le plus sensible de cette thèse est sans doute celui d'utiliser un modèle de simulation des consommations énergétiques résidentielles basé sur une approche par l'espace plutôt que par l'individu. Ce modèle, CEA, modélise directement l'impact du comportement agrégé des occupants d'un espace. C'est une approche régie par les caractéristiques du bâtiment et non par les caractéristiques des individus, contrairement à Mobisim-Soft. Nous avons vu dans notre état de l'art sur les modèles énergétiques résidentiels, qu'il est plus simple et moins coûteux de recourir à des modèles basés sur une approche espace et que pour les études mensuelles ou annuelles, l'effet du comportement peut ne pas être significatif en raison des effets de moyenne (Brøgger & Wittchen, 2018). Dans notre cas, il serait cependant intéressant d'utiliser un modèle résidentiel basé sur une approche individu, afin d'obtenir des résultats ayant le même degré de finesse que ceux de Mobisim-Soft. L'échelle d'agrégation des résultats ne serait alors plus la maille, mais l'individu, ce qui permettrait d'apporter une plus grande précision à nos conclusions. Concernant CEA, une autre limite peut être soulignée et concerne les données d'entrées utilisées. Nous avons dans ce travail fait le choix d'utiliser les standards de construction et les usages types proposés par CEA. Ces données très fines sont en effet difficiles à obtenir, notamment sur des zones importantes. Ces bases de données ont été construites à partir d'enquêtes réalisées en Suisse. Cela constitue en soi une limite, notre recherche se positionnant dans un contexte français. Cependant, il convient de rappeler que ce travail n'a pas pour ambition de fournir des valeurs « exactes » de la consommation énergétique individuelle, mais plutôt un ordre de grandeur de ces valeurs. Nous raisonnons essentiellement par comparaison entre les différents standards, toutes choses égales par ailleurs. De plus, la relative proximité entre les standards suisses et français en matière de construction et d'architecture nous amène à penser que si des différences existent, elles restent négligeables dans le cadre de ce travail. Enfin, une autre limite réside dans la réalisation des simulations pour un unique climat, celui de la zone de Zurich. Avec nos hypothèses de températures de consigne et de recul, ce climat ne nécessite pas l'utilisation de la climatisation, mais à l'inverse entraîne une très forte demande en chauffage pendant les mois d'hiver. Les résultats de cette thèse sont donc très liés à ce choix. Afin de pouvoir généraliser les résultats obtenus, il aurait été intéressant de réaliser des simulations avec les mêmes formes architecturales bâties mais dans des climats différents. Cet objectif constitue d'ailleurs une des pistes de travail identifiées pour la suite.

De manière générale, notre approche basée sur la modélisation peut être critiquée par la simplification parfois outrancière de la réalité. L'utilisation d'un maillage régulier pour la modélisation des réseaux de transports secondaires dans nos villes archétypales est un bon exemple de cette simplification parfois jugée extrême. Mais il faut être conscient que les approches non modélisatrices ne présentent pas non plus des résultats exhaustifs, et qu'ils sont souvent limités à ce que l'on observe sur une zone d'étude. Rappelons également que nous nous positionnons dans une approche de modélisation des espaces urbains et de leur fonctionnement avec un niveau d'abstraction « stylisé » et non « particulier » (Banos & Sanders, 2013). Ensuite, la modélisation est un outil de recherche qui nous offre la possibilité de tester le rôle de plusieurs formes urbaines stylisées sur les consommations énergétiques, en nous abstrayant de la complexité du réel. Ainsi, elle nous permet de tester des hypothèses et d'affiner progressivement les connaissances. Enfin, bien que cette thèse ait essentiellement eu un caractère de recherche fondamentale, les enjeux qu'elle a soulevés sont en plusieurs points reliés à des questionnements opérationnels. Notre approche peut ainsi également se positionner comme un véritable support de communication et d'aide à la décision pour la planification urbaine. Un modèle est aussi un moyen de faciliter les interactions et le transfert de connaissances (Brunet, 2000).

Ce travail de thèse a conduit à différentes contributions originales et débouche sur un certain nombre de résultats, mais également de limites. Il ouvre la voie à de nombreux questionnements, qui pourraient faire l'objet de prolongements intéressants à mener. Plusieurs pistes ont ainsi été identifiées :

1. Valider l'utilisation des archétypes Suisses dans CEA

Afin de valider l'utilisation des bases Suisses pour la modélisation des consommations énergétiques résidentielles, une comparaison des résultats obtenus avec des données de consommations résidentielles françaises pourrait apporter la confirmation que les standards de construction suisses et français sont relativement proches.

2. Vérifier le caractère transposable de Mobisim-Soft

Mobisim-Soft pourrait être appliqué avec la calibration actuelle sur une ville réelle (non utilisée dans ce travail), puis avec une calibration réalisée sur des données d'enquêtes déplacements locales de cette ville. La comparaison des résultats pourrait permettre de vérifier le caractère transposable de la calibration faite à partir des 19 enquêtes déplacements. Les résultats d'un autre modèle de simulation des déplacements quotidiens finement calibré sur un territoire pourraient également être utilisés dans cet objectif.

3. Prendre en compte les consommations énergétiques individuelles dans leur ensemble

La prise en compte des consommations énergétiques au lieu de travail mais également celles liées aux mobilités occasionnelles, pourrait permettre de compléter l'analyse en mesurant des potentiels effets de compensations. Concernant ce dernier point, plusieurs recherches ont déjà étudié le rôle de la forme urbaine sur les mobilités occasionnelles et la controversée notion « *d'effet barbecue* » a été avancée (Munafò, 2016).

4. Intégrer l'évaluation des consommations énergétiques dans une approche prospective

Les énergies renouvelables (EnR) constituent le troisième volet de la transition énergétique. Pour rappel, en France, la loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte (LTECV) promulguée en août 2015 a fixé comme objectif d'augmenter la part des énergies renouvelables à 32% de la consommation finale brute d'énergie en 2030. De plus, les investissements massifs dans ces secteurs ont engendré une réduction importante de la taille des systèmes de production d'énergie renouvelable. Devant ces constats, ils seraient intéressants de tester dans une approche prospective l'impact de la forme urbaine sur le potentiel de production en énergie renouvelable. Des effets compensatoires entre la consommation et la production énergétiques pourraient ainsi être mis en lumière.

5. Utiliser un modèle de simulation des consommations énergétiques résidentielles basée sur une approche individu

Enfin, il serait intéressant d'utiliser un modèle de simulations des consommations énergétiques résidentielles basé sur une approche individu. L'utilisation du modèle Smart-E (Berthou et al., 2015) pourrait ainsi être envisagée, utilisant les enquêtes emplois du temps de l'Insee et proposant une simulation fine des consommations énergétiques par types d'individus. Pour le moment, ce modèle est encore en développement, ne dispose pas d'interface et est peu adapté aux zones de la taille d'une agglomération urbaine. Pour autant, l'utilisation d'un outil de ce type ouvrirait

de nouvelles perspectives de recherche. Il serait par exemple possible de tester l'impact de l'augmentation du télétravail sur les consommations énergétiques individuelles, questionnement qui prend tout son sens depuis le début de la crise sanitaire de la Covid-19.

Alors finalement, quel crédit peut-on accorder à nos résultats ? Les résultats obtenus dans la thèse sont présentés dans les chapitres 8 et 9. Nous avons pu montrer que la ville monocentrique périurbaine présente les consommations énergétiques totales par habitant les plus fortes, suivies par la ville monocentrique axialisée avec des consommations légèrement plus faibles, puis la ville polycentrique hiérarchisée avec les consommations par habitant les plus faibles. Nous avons également pu montrer que le tissu urbain individuel peu dense présente les consommations énergétiques par habitant les plus élevées tandis que les tissus collectif haut discontinu et centre urbain présentent les consommations énergétiques totales par habitant les plus faibles. Ces résultats viennent conforter les études qui soutiennent que les villes polycentriques et compactes sont les plus économes en énergie. Faut-il pour autant préconiser ces formes d'urbanisation pour un urbanisme durable ? Nos analyses permettent d'évaluer les impacts des formes urbaines sur un seul critère : les consommations énergétiques résidentielles des individus et celles liées aux mobilités quotidiennes. Nous ne prenons pas en compte tous les autres effets, positifs ou négatifs, d'une urbanisation compacte et polycentrique. Ainsi, les émissions de GES, les îlots de chaleurs urbains, la connectivité des réseaux écologiques, la fragmentation paysagère, sont d'autres critères d'évaluation des formes urbaines. Ainsi, si nos résultats ne sont pas exhaustifs, ils peuvent apporter des éléments de réponse aux aménageurs et servir d'appui pour une planification urbaine plus durable.

Annexes

Catégories	Variables	Descriptions
Enveloppe "Enveloppe assemblées"	type_cons	Type de construction
	type_leak	Type d'étanchéité
	type_win	Types de fenêtre
	type_roof	Type de toiture
	type_part	Type de cloisons intérieures
	type_wall	Type de murs
	type_floor	Type de plancher
	type_base	Type de sol
	type_shade	Type de système de fermeture des fenêtres
	Es	Fraction de la surface brute de plancher avec des demandes électriques
	Ns	Fraction de la surface brute de plancher nette
	Hs_ag	Fraction de la surface brute de plancher au-dessus du sol climatisée
	Hs_bg	Fraction de la surface brute au sol climatisée
	void_deck	Fraction de la façade qui est vide (ex. parking ouvert)
	wwr_north	Rapport fenêtre/mur dans les façades orientées au nord
	wwr_south	Rapport fenêtre/mur dans les façades exposées au sud
	wwr_east	Rapport fenêtre/mur dans les façades orientées vers l'est
wwr_west	Rapport fenêtre/mur dans les façades orientées vers l'ouest	
Chauffage, ventilation et climatisation "HVAC assemblées"	type_hs	Type de système de chauffage
	type_cs	Type de système de refroidissement
	type_dhw	Type de système de production d'eau chaude sanitaire
	type_ctrl	Type de contrôle du chauffage et de la climatisation
	type_vent	Type de système de ventilation
	heat_starts	Date de début de saison de chauffe
	heat_ends	Date de fin de saison de chauffe
	cool_starts	Date de début de saisons de climatisation
	cool_ends	Date de fin de saison de climatisation
Approvisionnement "Supplies assemblées"	type_hs	Type d'approvisionnement pour le chauffage
	type_cs	Type d'approvisionnement pour le refroidissement
	type_dhw	Type d'approvisionnement pour l'eau chaude sanitaire
	type_el	Type d'approvisionnement pour l'électricité

Annexe 1 : Les différentes variables de la base de données par défaut « Architecture » de CEA

Catégories	Variables	Descriptions
Planning d'occupation "Schedules"	Monthly_multiplier	Probabilité mensuelle d'occupation du bâtiment
	Saturday	Probabilité d'occupation maximale par heure un samedi
	Sunday	Probabilité d'occupation maximale par heure un dimanche
	Weekday	Probabilité d'occupation maximale par heure jour de semaine
Charge interne "Internal loads"	Occ_m2pax	Densité d'occupation
	Qs_Wpax	Chaleur sensible libérée par l'occupation en conditions de pointe
	X_ghpax	Humidité libérée par l'occupation dans des conditions de pointe
	Ea_Wm2	Pic de charge électrique spécifique dû aux ordinateurs et aux appareils
	El_Wm2	Pic de charge électrique spécifique dû à l'éclairage artificiel
	Epro_Wm2	Pic de charge électrique spécifique dû aux processus industriels
	Ed_Wm2	Pic de charge électrique spécifique dû aux datacenters
	Vww_lpdpx	Pic de consommation journalière spécifique d'eau chaude
	Vw_lpdpx	Pic de consommation d'eau douce (incluant l'eau froide et l'eau chaude)
	Qcre_Wm2	Pic de consommation dû à la réfrigération (salles de refroidissement)
	Qhpro_Wm2	Pic de consommation dû au refroidissement
	Qcpro_Wm2	Pic de consommation dû au chauffage
Ev_kWveh	Pic de capacité de la batterie électrique par véhicule	
Confort intérieur "indoor comfort"	Ths_set_C	Température de consigne pour le système de chauffage
	Ths_setb_C	Point de recul de la température pour le système de chauffage
	Tcs_set_C	Température de consigne pour le système de refroidissement
	Tcs_setb_C	Point de recul de la température pour le système de refroidissement
	Ve_lps	Besoins en ventilation intérieure par personne

Annexe 2 : Les différentes variables de la base de données par défaut « Usages des bâtiments » de CEA

Indicateurs		Centre ancien	Mixte et dense	Collectif haut discontinu	Individuel dense	Individuel peu dense
Surf_m_bat	1st Qu.	111	110	485	114	116
	Mean	179	160	970	140	145
	Median	150	139	713	132	136
	3rd Qu.	231	192	1149	155	163
Surf_env_m	1st Qu.	585	510	2134	478	481
	Mean	1000	722	3690	577	578
	Median	829	636	2953	546	554
	3rd Qu.	1314	861	4296	642	648
h_m_bati	1st Qu.	8	6	8	5	5
	Mean	10	7	11	6	5
	Median	10	7	10	6	5
	3rd Qu.	12	8	12	6	6
comp_m_bat	1st Qu.	0,6	0,8	0,5	0,8	0,8
	Mean	0,7	0,8	0,6	0,8	0,8
	Median	0,7	0,8	0,6	0,8	0,8
	3rd Qu.	0,8	0,9	0,7	0,9	0,9

Annexe 3 : Les différents indicateurs de composition des tissus urbains identifiés dans les villes réelles

Indicateurs		Centre ancien	Mixte et dense	Collectif haut discontinu	Individuel peu dense	Individuel dense
nb_bati	1st Qu.	143	72	9	38	9
	Mean	200	97	23	52	16
	Median	196	94	19	49	13
	3rd Qu.	248	118	32	63	21
nb_par	1st Qu.	146	98	17	71	28
	Mean	214	128,	37	89	42
	Median	209	125	31	86	40
	3rd Qu.	267	153	50	104	54
fsi	1st Qu.	1,1	0,4	0,3	0,2	0,0
	Mean	1	0,5	0,7	0,2	0,1
	Median	1,5	0,5	0,6	0,2	0,1
	3rd Qu.	2,1	0,6	0,9	0,3	0,1
gsi	1st Qu.	0,34	0,16	0,09	0,07	0,02
	Mean	0,40	0,19	0,15	0,10	0,03
	Median	0,39	0,18	0,14	0,10	0,03
	3rd Qu.	0,45	0,22	0,20	0,12	0,04

Annexe 4 : Les différents indicateurs de configuration des tissus urbains identifiés dans les villes réelles

Type de répartition	Uniforme		Hiérarchisée		Intermédiaire	
	X	Y	X	Y	X	Y
Coordonnées	0	0,0	0	0,0	0	0,0
	0,1	0,1	0,1	0,5	0,1	0,3
	0,2	0,2	0,2	0,9	0,2	0,4
	0,3	0,3	0,3	0,9	0,3	0,5
	0,4	0,4	0,4	0,9	0,4	0,6
	0,5	0,5	0,5	0,9	0,5	0,7
	0,6	0,6	0,6	0,9	0,6	0,8
	0,7	0,7	0,7	1,0	0,7	0,8
	0,8	0,8	0,8	1,0	0,8	0,9
	0,9	0,9	0,9	1,0	0,9	0,9
	1	1,0	1	1,0	1	1,0

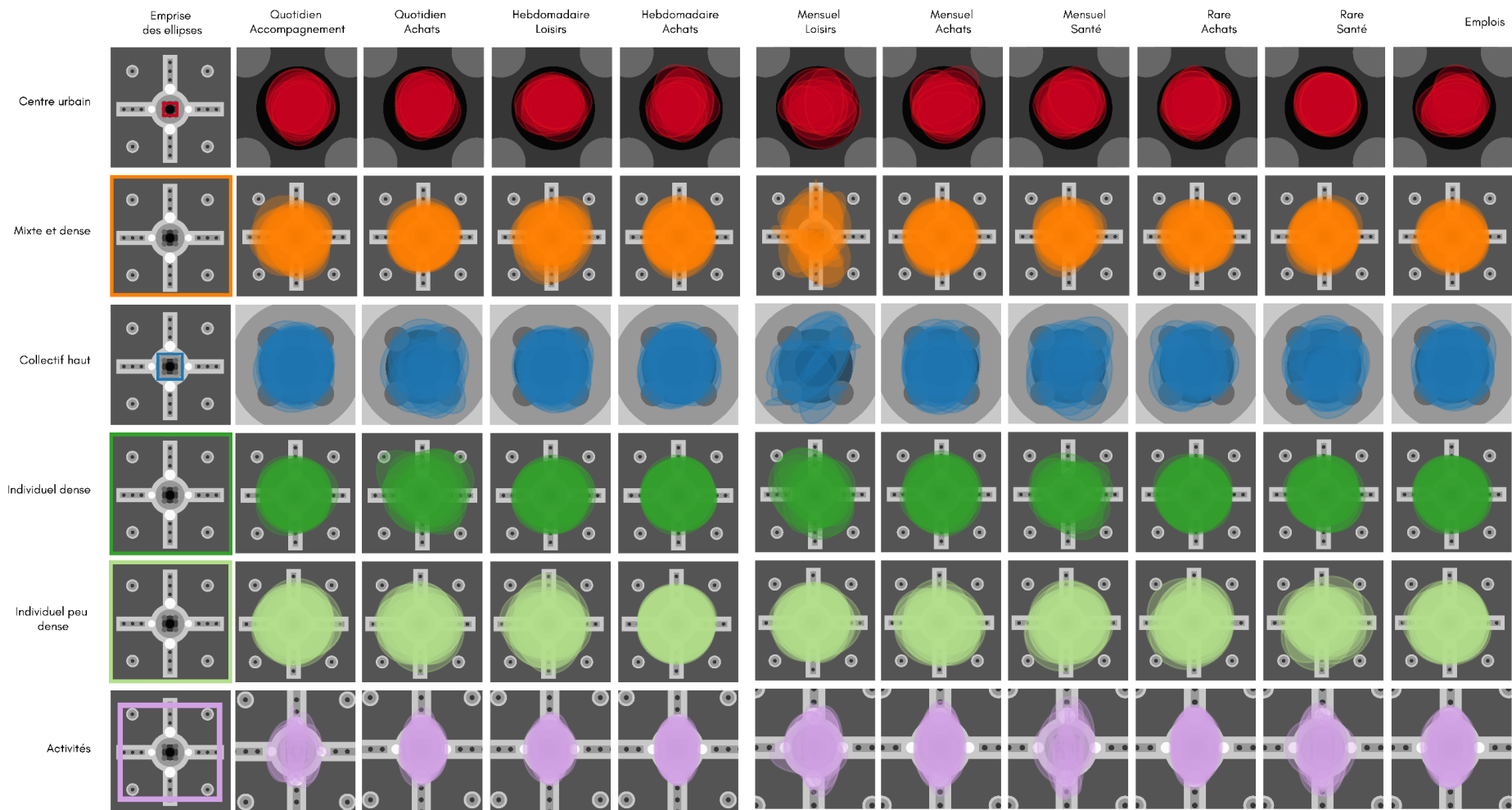
Annexe 5 : Création des courbes de hiérarchie de la distribution des aménités fonctionnelles

Structures urbaines	Villes	Surface bâtie (km²)
Monocentriques périurbaines	Besançon	163
	Amiens	133
	Limoges	278
Monocentriques axialisées	Mulhouse	218
	Grenoble	226
	Bordeaux	485
Polycentriques hiérarchisées	Chambéry	233
	Clermont-Ferrand	238
	Nîmes	210
Moyenne toutes villes		243

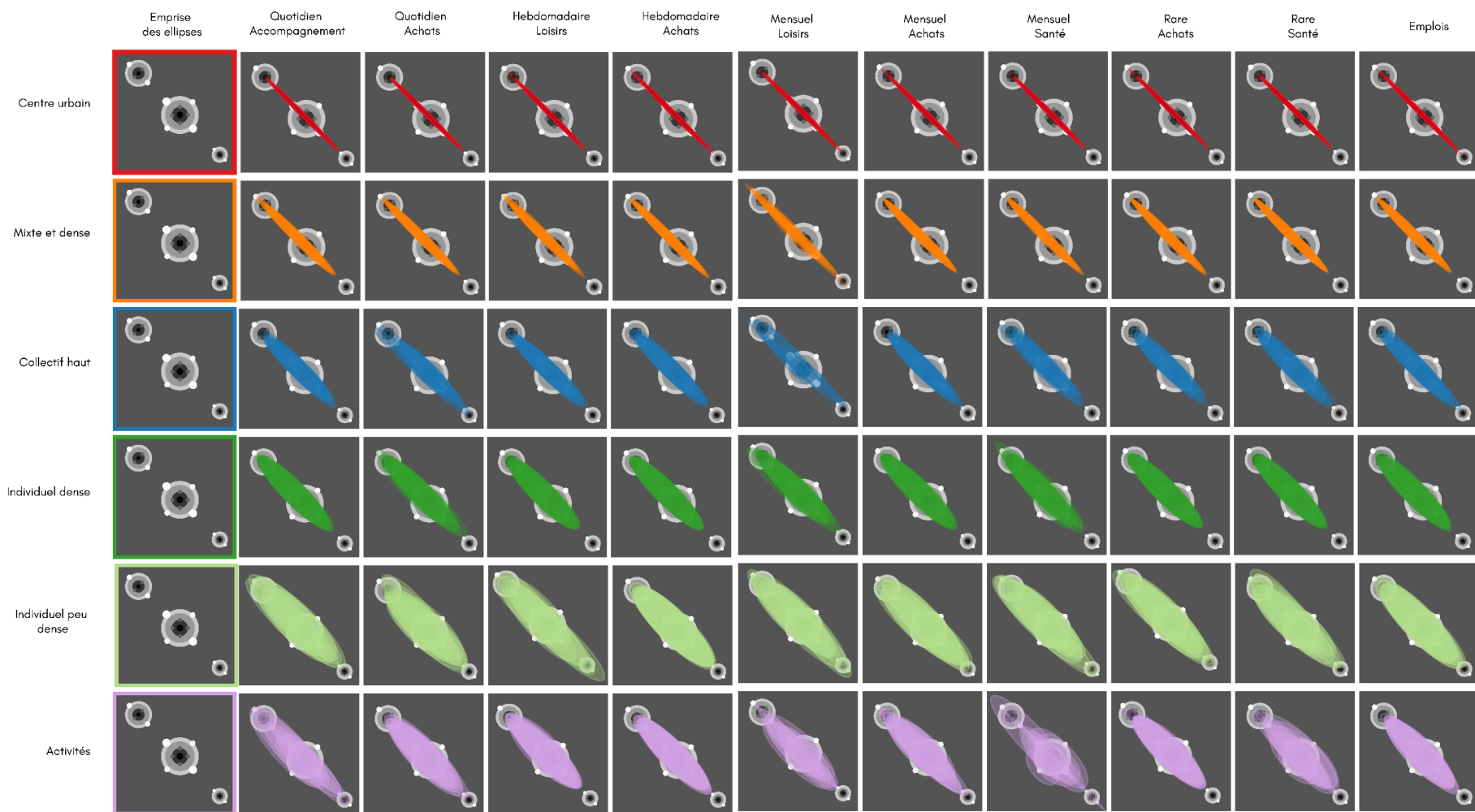
Annexe 6 : Surface bâtie des neuf villes réelles étudiées

		Surfaces													
		Centre urbain		Mixte et dense		Collectif discontinu haut		Individuel dense		Individuel peu dense		Activités		Total cellules bâties	
		Km²	%	Km²	%	Km²	%	Km²	%	Km²	%	Km²	%	Km²	%
Monocentriques périurbaines	Besançon	1,1	1%	9,4	6%	9,5	6%	47,3	29%	84,4	52%	11,6	7%	163,3	100%
	Amiens	4,2	3%	16,1	12%	6,1	5%	39,4	30%	52,5	39%	14,9	11%	133,2	100%
	Limoges	2,4	1%	13,0	5%	5,0	2%	37,9	14%	208,1	75%	11,5	4%	277,9	100%
	Total trois villes réelles	7,7	1%	38,5	7%	20,6	4%	124,6	22%	345,0	60%	38,0	7%	574,4	100%
Monocentriques axialisées	Mulhouse	3,1	1%	39,4	18%	6,1	3%	90,1	41%	53,0	24%	26,8	12%	218,5	100%
	Grenoble	3,8	2%	22,1	10%	21,8	10%	59,3	26%	93,8	42%	24,8	11%	225,6	100%
	Bordeaux	13,6	3%	48,8	10%	19,3	4%	137,6	28%	220,3	45%	46,1	9%	485,7	100%
	Total trois villes réelles	20,5	2%	110,3	12%	47,2	5%	287,0	31%	367,1	39%	97,7	11%	929,8	100%
Polycentriques hiérarchisées	Chambéry	1,3	1%	13,1	6%	7,9	3%	61,9	27%	134,8	58%	14,4	6%	233,4	100%
	Clermont-Ferrand	7,0	3%	32,8	14%	8,4	4%	71,5	30%	95,8	40%	22,9	10%	238,4	100%
	Nîmes	5,2	2%	20,3	10%	5,4	3%	54,1	26%	104,0	49%	21,2	10%	210,2	100%
	Total trois villes réelles	13,5	2%	66,2	10%	21,7	3%	187,5	27%	334,6	49%	58,5	9%	682,0	100%

Annexe 7 : Répartition des tissus urbains dans les différentes villes réelles



Annexe 8 : Ellipses directionnelles des ventilations des différents équipements dans la ville archétypale monocentrique axialisée



Annexe 9 : Ellipses directionnelles des ventilations des différents équipements dans la ville archétypale polycentrique hiérarchisée

	Quotidien Accomp.	Quotidien Achats	Hebdo. Loisirs	Hebdo. Achats	Mensuel Loisirs	Mensuel Achats	Mensuel Santé	Rare Achats	Rare Santé	Emplois	
Centre urbain	1	858	844	873	923	986	908	870	838	884	746
	2	976	803	789	930	1009	857	759	914	880	871
	3	922	844	815	893	859	911	868	799	875	807
	4	862	822	868	781	856	869	814	943	876	824
	5	857	806	873	775	864	890	877	923	905	832
	6	750	841	872	841	883	993	934	852	916	884
	7	899	859	897	810	704	831	863	831	846	752
	8	903	858	903	914	899	918	888	879	890	758
	9	831	879	870	825	701	808	854	843	904	842
	10	929	911	879	802	810	903	869	883	868	966
Mixte et dense	1	10377	8850	9904	9674	10056	9935	8507	9060	9355	9232
	2	10406	9670	9700	9973	7869	9939	8156	9459	10084	9244
	3	9235	9322	8541	10289	9915	9457	8771	9613	8837	9665
	4	10837	9430	10681	10054	7675	10452	9183	10054	9965	9710
	5	9094	9270	10784	9865	7336	9371	9031	9669	9535	9474
	6	9415	9787	10508	10206	7674	9936	7941	9577	9478	9184
	7	9924	9235	9336	9104	10685	9953	9098	8621	10039	9415
	8	9751	10166	9412	9605	9833	9910	9152	9868	9544	9782
	9	8066	9895	9921	9637	6771	10035	9368	9976	10006	10181
	10	9341	9825	8909	9718	8618	9844	9752	9039	9498	10196
Collectif haut	1	2163	2036	2271	2245	2141	2267	2227	2313	2156	2270
	2	2344	1896	2216	2179	1675	2326	2258	2122	2123	2038
	3	2311	2200	2330	2347	2051	2106	2274	2003	2124	2270
	4	2258	2233	2280	2297	2342	2226	2132	2064	2043	2256
	5	2197	2238	2144	2284	425	2218	2266	2163	2147	2317
	6	2345	2164	2219	2310	2357	2118	2212	2278	2282	2364
	7	2283	2106	2219	2324	2469	2267	2150	2187	2230	2292
	8	2238	1956	2264	2235	2041	2259	2087	2092	2088	2141
	9	2243	2247	2323	2155	2444	2329	2263	2239	2259	2180
	10	2266	2260	2196	2252	1760	2315	1920	2179	1929	2073
Individuel dense	1	9961	10824	10046	9875	10041	9854	8989	10157	9804	9974
	2	9548	10333	9057	9966	10036	9766	9769	9920	9596	9874
	3	9872	8910	9631	9927	8761	10471	9448	10486	9907	10357
	4	9503	11525	9922	9926	10169	10459	9030	10082	9835	10047
	5	10329	10398	10644	10354	10973	10149	9689	10188	9679	10232
	6	9832	8183	9874	9962	9266	9903	8990	9358	9585	10025
	7	9809	8978	9533	9718	8381	9667	8293	10035	9481	9367
	8	9970	9560	10769	9749	8569	10461	9549	10125	10090	9877
	9	9904	11044	9456	9714	8329	9939	10350	9728	9195	9893
	10	9145	8339	10148	9984	9287	10164	9157	9813	9009	9812
Individuel peu dense	1	10461	10674	11260	10451	9856	9921	9842	11515	9966	10669
	2	10453	9815	11767	10144	10504	10710	10380	10760	10087	10105
	3	10762	10010	9763	10308	10079	9845	10615	10879	10995	10263
	4	10743	10421	10344	10710	11242	10026	11186	10107	9190	10211
	5	9827	9950	10693	10459	9882	10542	11005	10351	9726	10259
	6	9806	10769	10195	10197	10657	9928	9430	10051	10645	11229
	7	10027	10596	9654	10146	9866	10918	9876	9269	9779	10197
	8	10972	11050	9882	10255	9754	9801	11253	11153	9448	10147
	9	10736	10642	9983	10339	9983	10866	10095	10460	10703	10730
	10	11109	10032	10792	10513	10232	9877	9226	9354	9983	10516
Activités	1	4857	5401	5525	5570	5230	5337	5285	5625	5679	5400
	2	5441	5321	5440	5572	4480	5492	5452	5451	5547	5703
	3	5422	5663	5672	5571	5755	5716	4605	5612	5324	5535
	4	5298	5751	5510	5573	5230	5268	5043	5509	5503	5760
	5	3833	5648	5495	5526	5263	5484	3613	5584	5312	5518
	6	4126	5588	5617	5750	5812	5654	5604	5607	5706	5629
	7	5293	5479	5421	5501	5044	5202	5684	5543	5357	5511
	8	4925	5513	5621	5523	5233	5570	5448	5577	5535	5509
	9	4861	5566	5335	5554	5288	5635	4601	5561	5299	5431
	10	5226	5798	5595	5546	6063	5624	4860	5591	5169	5519

* En hachurée : valeur ayant le plus faible écart avec la valeur moyenne des 10 ventilations

Annexe 10 : Comparaison des distances standards de chaque ventilation par type de tissus et type d'équipements pour la ville monocentrique axialisée

	Quotidien Accomp.	Quotidien Achats	Hebdo. Loisirs	Hebdo. Achats	Mensuel Loisirs	Mensuel Achats	Mensuel Santé	Rare Achats	Rare Santé	Emplois	
Centre urbain	1	15550	13054	12172	10410	11370	11209	13081	12238	12258	11413
	2	11248	13223	13796	11400	12287	11658	11478	10249	10947	12660
	3	11778	10770	12606	10858	13024	13045	11577	13622	13032	11438
	4	13164	11899	10535	12176	12806	13200	11877	11351	11484	12456
	5	12594	12752	13798	11818	11128	12458	12518	12160	12442	12706
	6	13513	10791	13208	14122	12447	11391	10342	10318	11413	13271
	7	13597	10901	11986	14352	11387	12431	13311	13015	12785	12247
	8	10837	11245	9527	11397	12472	11277	12042	13745	11242	12099
	9	12497	12194	12958	7367	11954	11284	12400	11791	12829	12397
	10	11794	10906	14054	10402	11262	12273	12108	9902	13471	12658
Mixte et dense	1	13165	12705	13823	14576	13145	13672	13486	13860	14600	13195
	2	12745	13015	14013	9506	13245	13717	13289	13666	12916	13312
	3	14111	14029	14438	13540	12828	13826	11763	12468	13605	13789
	4	13862	13002	13550	13941	12804	12788	14821	13106	13615	13777
	5	12255	12960	13830	11592	12170	14094	12493	14354	13305	13981
	6	13207	12961	13318	14873	13619	13997	12174	13279	13937	13166
	7	12851	12616	13834	10740	12873	13331	12621	13932	14277	13654
	8	13448	12358	14351	13869	13651	13570	13223	12868	13490	13596
	9	13025	14005	14387	12892	13216	12644	12990	13959	12413	13927
	10	13108	13969	13688	18572	13295	11942	13913	13482	13568	13776
Collectif haut	1	9943	12066	11144	15181	12872	10883	12011	11739	9317	14477
	2	12110	11728	12314	15090	11014	10891	12204	10547	11839	11499
	3	12414	11989	12165	10331	10253	10877	11275	10022	11706	13028
	4	12872	13816	12651	15154	10803	9488	12096	13455	11830	11628
	5	13022	11925	13749	11114	11939	12457	12531	12609	8656	12937
	6	10818	13032	10581	9559	11211	12465	11562	8751	12490	7208
	7	12224	11360	13627	9995	12216	12442	10372	8610	11810	11609
	8	14404	12016	11721	17419	10043	10961	11350	10521	11943	11034
	9	11686	10869	12889	2772	13546	10005	13162	12537	10932	12578
	10	10595	13334	12711	2594	12395	12835	10508	15359	9366	12016
Individuel dense	1	13140	12930	13071	9152	13269	12117	12428	11502	12444	13257
	2	13492	12311	13269	13945	12212	13136	13931	13659	13731	12323
	3	12958	12682	12588	13448	13397	13946	13067	13314	12975	13687
	4	12805	12160	13090	10151	12605	11381	12933	13129	13605	12920
	5	12945	13172	13007	11723	12958	16133	12417	15705	13576	12707
	6	13569	12712	12856	14376	13803	13453	13348	15131	12496	12461
	7	13661	12394	13318	13780	12950	12408	13146	12252	12010	12442
	8	12660	12725	13263	12768	13538	12862	12466	12038	13123	12715
	9	13303	12471	12927	15646	13152	13215	13541	11630	13777	12012
	10	13366	12357	12980	11248	12561	11801	12961	11521	12799	13595
Individuel peu dense	1	14833	13734	14602	14310	16872	13409	14747	12752	14750	13250
	2	14579	16736	14925	16032	15767	14182	13557	12355	16566	14144
	3	15381	16401	14785	16890	14029	16151	14558	15153	15900	16682
	4	15022	14527	14304	15965	14881	14924	15422	14611	16820	16814
	5	15378	16296	14151	15456	15427	14795	11934	14109	15527	13354
	6	14114	12538	14464	16143	12922	14211	16170	15519	14427	14608
	7	14124	13369	14968	15004	16141	14930	15416	12855	14468	14636
	8	14271	12893	15133	14247	16251	14411	14629	12465	14318	13711
	9	14786	12278	14791	13347	15579	16238	14516	14855	12855	9560
	10	14165	15580	14755	13652	14902	13526	15917	13657	16211	12849
Activités	1	11959	13593	12960	13145	11654	6355	13537	13082	12692	9938
	2	12854	12625	13599	13215	13122	10555	10177	12079	13443	13792
	3	11980	13815	13566	12065	11361	10991	11338	12159	14342	7917
	4	14438	12892	13744	10022	16273	9964	12998	11495	11646	12340
	5	13092	13923	13273	9446	12013	17069	10791	14632	12690	12496
	6	12744	11501	12537	9874	15635	6223	13559	13061	13136	13639
	7	12640	13158	13655	12401	10392	8581	10003	13217	12836	9771
	8	12084	11635	14314	12503	12689	15642	12287	12727	12485	9561
	9	12700	11689	13142	11166	14692	13127	14079	14794	13423	15698
	10	12923	13741	12322	15749	12416	8068	12579	12068	12834	11874

* En hachurée : valeur ayant le plus faible écart avec la valeur moyenne des 10 ventilations

Annexe 11 : Comparaison des distances standards de chaque ventilation par type de tissus et type d'équipements pour la ville polycentrique hiérarchisée

Ville	Motifs	Centre urbain	Mixte et dense	Collectif haut	Individuel dense	Individuel peu dense	Activités	Total
Monocentrique axialisée	Quotidien accompagnement	132	130	43	470	100	122	996
	Quotidien achat	132	130	43	49	100	122	576
	Hebdomadaire loisirs	132	130	43	470	100	122	996
	Hebdomadaire achat	764	571	187	470	100	122	2214
	Mensuel loisirs	30	14	4	49	100	13	210
	Mensuel achat	764	130	43	470	100	538	2044
	Mensuel santé	132	130	43	49	100	13	467
	Rare achat	132	130	43	470	100	122	996
	Rare santé	764	571	187	470	100	122	2214
	Total	2981	1936	634	2966	900	1298	10715
Monocentrique périurbaine	Quotidien accompagnement	130	87	43	313	105	105	783
	Quotidien achat	130	87	43	33	105	105	503
	Hebdomadaire loisirs	130	87	43	313	105	105	783
	Hebdomadaire achat	754	381	187	313	105	105	1845
	Mensuel loisirs	30	9	4	33	105	11	193
	Mensuel achat	754	87	43	313	105	461	1763
	Mensuel santé	130	87	43	33	105	11	409
	Rare achat	130	87	43	313	105	105	783
	Rare santé	754	381	187	313	105	105	1845
	Total	2944	1290	634	1978	948	1112	8906
Polycentrique hiérarchisée	Quotidien accompagnement	195	218	63	618	55	173	1322
	Quotidien achat	195	218	63	65	55	173	769
	Hebdomadaire loisirs	195	218	63	618	55	173	1322
	Hebdomadaire achat	1131	957	277	618	55	173	3211
	Mensuel loisirs	44	23	7	65	55	18	213
	Mensuel achat	1131	218	63	618	55	758	2844
	Mensuel santé	195	218	63	65	55	18	615
	Rare achat	195	218	63	618	55	173	1322
	Rare santé	1131	957	277	618	55	173	3211
	Total	4416	3243	940	3902	498	1830	14828

Annexe 12 : Nombre de commerces et services détaillés par type d'équipements par tissus urbains par villes archétypales

Équipements	Tissus	Amiens	Besançon	Limoges	Moyenne trois villes réelles	Monocentrique périurbaine	Écart	Écart relatif (%)
Quotidien accompagnement	Centre urbain	15,0	16,6	15,5	15,7	19,1	3,4	22%
	Mixte et dense	18,1	20,1	17,0	18,4	20,2	1,8	10%
	Collectif haut	18,6	17,3	16,4	17,4	18,5	1,0	6%
	Individuel dense	21,3	23,1	21,0	21,8	23,4	1,6	8%
	Individuel peu dense	22,8	25,3	25,1	24,4	24,9	0,5	2%
	Activités	19,3	19,6	17,8	18,9	19,9	1,0	5%
Quotidien achats	Centre urbain	13,2	15,8	14,6	14,5	17,5	3,0	21%
	Mixte et dense	16,8	19,5	16,2	17,5	19,0	1,5	8%
	Collectif haut	17,3	16,6	15,7	16,5	17,2	0,7	4%
	Individuel dense	20,2	22,6	20,4	21,1	22,7	1,6	8%
	Individuel peu dense	21,8	24,8	24,6	23,8	24,3	0,5	2%
	Activités	18,0	19,1	17,2	18,1	19,0	1,0	5%
Hebdomadaire loisirs	Centre urbain	16,6	18,7	16,3	17,2	19,0	1,8	11%
	Mixte et dense	19,3	21,7	17,8	19,6	20,1	0,5	2%
	Collectif haut	19,8	19,1	17,4	18,8	18,4	-0,4	-2%
	Individuel dense	22,2	24,3	21,8	22,8	23,2	0,5	2%
	Individuel peu dense	23,6	26,5	25,8	25,3	24,6	-0,6	-3%
	Activités	20,3	21,1	18,6	20,0	19,6	-0,4	-2%
Hebdomadaire achats	Centre urbain	14,3	17,0	15,1	15,5	20,8	5,3	34%
	Mixte et dense	17,5	20,4	16,6	18,2	21,5	3,3	18%
	Collectif haut	18,1	17,6	16,1	17,3	20,0	2,8	16%
	Individuel dense	20,8	23,3	20,8	21,6	24,0	2,4	11%
	Individuel peu dense	22,4	25,5	24,9	24,3	25,2	0,9	4%
	Activités	18,8	19,9	17,5	18,7	20,6	1,8	10%
Mensuel loisirs	Centre urbain	15,3	18,5	20,4	18,1	22,4	4,3	24%
	Mixte et dense	18,9	22,2	21,6	20,9	23,0	2,1	10%
	Collectif haut	19,3	20,2	21,3	20,2	21,7	1,5	7%
	Individuel dense	21,9	26,0	24,7	24,2	25,3	1,1	4%
	Individuel peu dense	23,4	27,8	28,1	26,4	26,4	-0,1	0%
	Activités	20,2	22,7	22,2	21,7	21,9	0,2	1%
Mensuel achats	Centre urbain	13,5	14,9	14,3	14,2	17,8	3,6	25%
	Mixte et dense	16,9	18,6	15,9	17,1	19,1	2,0	12%
	Collectif haut	17,4	15,6	15,4	16,1	17,4	1,2	8%
	Individuel dense	20,3	21,9	20,1	20,8	22,6	1,9	9%

	Individuel peu dense	21,9	24,2	24,4	23,5	24,1	0,7	3%
	Activités	18,1	18,1	16,8	17,7	18,9	1,3	7%
Mensuel santé	Centre urbain	12,8	14,9	13,7	13,8	18,7	4,9	35%
	Mixte et dense	16,4	18,8	15,5	16,9	20,0	3,1	19%
	Collectif haut	17,0	15,7	15,0	15,9	18,4	2,5	16%
	Individuel dense	20,0	22,0	19,9	20,6	23,5	2,9	14%
	Individuel peu dense	21,7	24,3	24,2	23,4	25,0	1,7	7%
	Activités	17,8	18,3	16,6	17,6	19,9	2,3	13%
	Rares achats	Centre urbain	14,7	17,1	15,3	15,7	18,6	2,9
Mixte et dense		17,8	20,4	16,8	18,3	19,7	1,4	7%
Collectif haut		18,3	17,5	16,2	17,4	18,0	0,6	4%
Individuel dense		21,0	23,2	20,8	21,7	22,9	1,2	5%
Individuel peu dense		22,6	25,4	25,0	24,3	24,3	-0,1	0%
Activités		18,8	19,7	17,5	18,7	19,2	0,6	3%
Rare santé	Centre urbain	13,0	15,7	14,7	14,5	17,4	2,9	20%
	Mixte et dense	16,6	19,4	16,3	17,4	18,9	1,5	8%
	Collectif haut	17,1	16,5	15,8	16,5	17,1	0,6	4%
	Individuel dense	20,1	22,5	20,6	21,1	22,7	1,6	8%
	Individuel peu dense	21,8	24,9	24,8	23,8	24,4	0,5	2%
	Activités	18,0	19,0	17,4	18,1	19,0	0,9	5%
Emplois et études	Centre urbain	15,8	17,9	16,9	16,9	20,2	3,4	20%
	Mixte et dense	18,7	21,0	18,2	19,3	21,0	1,7	9%
	Collectif haut	19,2	18,1	17,6	18,3	19,4	1,1	6%
	Individuel dense	21,7	23,6	21,9	22,4	23,7	1,3	6%
	Individuel peu dense	23,2	25,8	25,9	24,9	24,9	0,0	0%
	Activités	19,7	20,2	18,8	19,6	20,1	0,6	3%

Annexe 13 : Comparaison des temps d'accès moyens aux différents équipements par tissu urbain pour les villes monocentriques périurbaines

Équipements	Tissus	Bordeaux	Grenoble	Mulhouse	Moyenne villes réelles	Monocentrique axialisée	Écart absolu	Écart relatif (%)
Quotidien accompagnement	Centre urbain	16,4	15,1	18,7	16,7	20,1	3,4	20%
	Mixte et dense	18,9	19,0	21,3	19,7	22,3	2,5	13%
	Collectif haut	19,7	17,5	20,6	19,3	19,0	-0,3	-2%
	Individuel dense	24,0	23,3	23,8	23,7	22,9	-0,8	-3%
	Individuel peu dense	27,2	26,9	25,1	26,4	24,0	-2,4	-9%
	Activités	21,8	19,1	21,9	20,9	19,1	-1,8	-9%
Quotidien achats	Centre urbain	16,0	14,2	17,3	15,8	19,7	3,8	24%
	Mixte et dense	18,6	18,3	20,1	19,0	21,8	2,8	15%
	Collectif haut	19,5	16,8	19,3	18,5	18,7	0,2	1%
	Individuel dense	23,8	22,7	23,0	23,1	22,5	-0,6	-3%
	Individuel peu dense	27,0	26,3	24,3	25,9	23,6	-2,3	-9%
	Activités	21,6	18,4	20,6	20,2	18,7	-1,5	-8%
Hebdomadaire loisirs	Centre urbain	18,9	16,1	19,4	18,1	20,0	1,9	10%
	Mixte et dense	21,1	19,8	21,7	20,9	22,0	1,1	5%
	Collectif haut	21,7	18,4	21,1	20,4	18,8	-1,6	-8%
	Individuel dense	25,5	23,9	24,1	24,5	22,6	-1,9	-8%
	Individuel peu dense	28,2	27,5	25,4	27,0	23,7	-3,3	-12%
	Activités	23,5	19,9	22,2	21,9	18,8	-3,1	-14%
Hebdomadaire achats	Centre urbain	17,8	16,6	18,3	17,6	21,3	3,7	21%
	Mixte et dense	19,9	20,3	20,9	20,3	22,5	2,1	10%
	Collectif haut	20,7	18,9	20,2	19,9	20,0	0,0	0%
	Individuel dense	24,6	24,3	23,5	24,2	23,0	-1,2	-5%
	Individuel peu dense	27,9	28,0	24,8	26,9	24,0	-2,9	-11%
	Activités	22,5	20,3	21,3	21,4	19,2	-2,2	-10%
Mensuel loisirs	Centre urbain	19,0	13,0	19,0	17,0	21,2	4,2	25%
	Mixte et dense	22,0	17,5	21,9	20,5	22,6	2,2	11%
	Collectif haut	22,6	15,9	20,9	19,8	20,0	0,2	1%
	Individuel dense	26,3	22,1	24,5	24,3	23,2	-1,1	-5%
	Individuel peu dense	27,9	25,7	25,6	26,4	24,1	-2,3	-9%
	Activités	24,6	17,6	22,4	21,6	19,3	-2,3	-10%
Mensuel achats	Centre urbain	16,8	14,8	17,7	16,4	19,3	2,8	17%
	Mixte et dense	19,1	18,8	20,3	19,4	21,6	2,2	12%
	Collectif haut	19,9	17,3	19,6	18,9	18,2	-0,7	-4%
	Individuel dense	24,0	23,0	23,1	23,4	22,3	-1,1	-5%
	Individuel peu dense	27,3	26,7	24,5	26,2	23,4	-2,7	-10%
	Activités	21,8	18,8	20,8	20,5	18,3	-2,2	-11%
Mensuel santé	Centre urbain	15,3	14,2	16,2	15,3	19,3	4,0	26%
	Mixte et dense	18,0	18,3	19,5	18,6	22,2	3,7	20%
	Collectif haut	18,9	16,8	18,5	18,1	18,5	0,5	3%
	Individuel dense	23,4	22,6	22,5	22,8	23,0	0,2	1%
	Individuel peu dense	26,8	26,3	23,9	25,7	24,2	-1,5	-6%

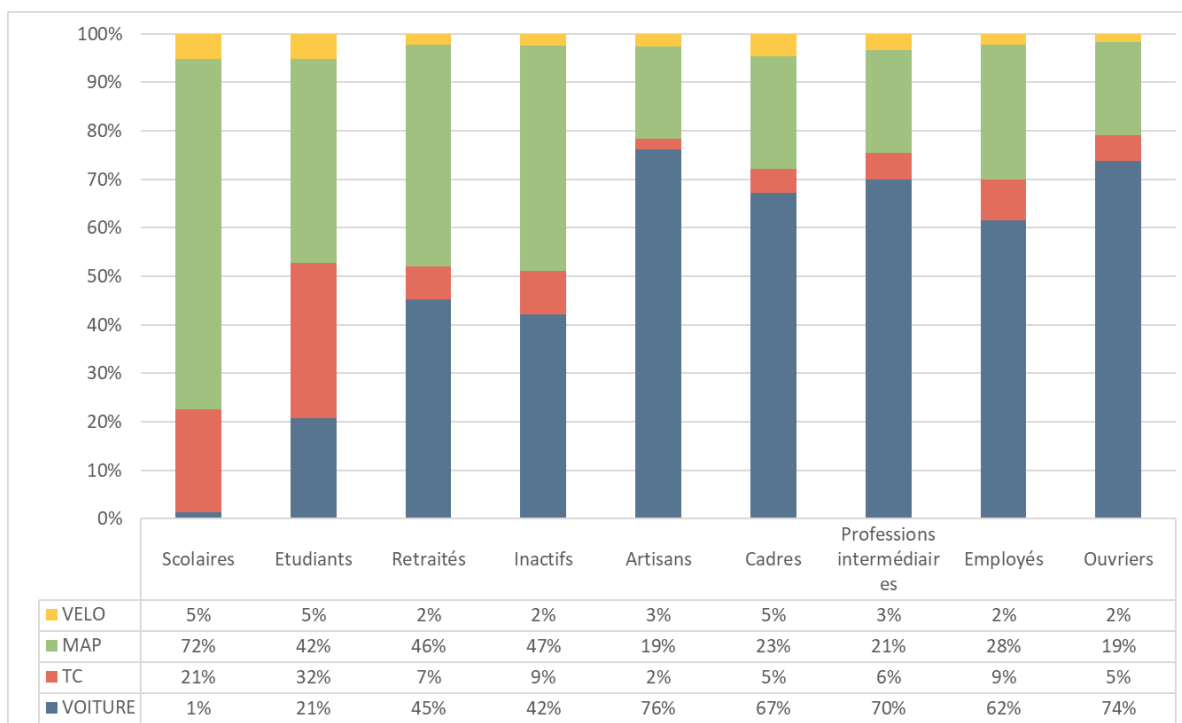
	Activités	21,1	18,4	20,0	19,8	19,1	-0,7	-3%
Rares achats	Centre urbain	17,6	15,3	18,0	17,0	20,2	3,2	19%
	Mixte et dense	19,8	19,1	20,5	19,8	21,7	1,9	10%
	Collectif haut	20,6	17,7	19,8	19,4	18,9	-0,5	-2%
	Individuel dense	24,5	23,4	23,3	23,7	22,3	-1,5	-6%
	Individuel peu dense	27,7	27,0	24,7	26,5	23,3	-3,2	-12%
	Activités	22,4	19,1	20,8	20,8	18,3	-2,4	-12%
Rare santé	Centre urbain	16,7	15,2	17,5	16,4	19,2	2,8	17%
	Mixte et dense	19,0	19,0	20,3	19,5	21,8	2,3	12%
	Collectif haut	19,9	17,6	19,5	19,0	18,3	-0,7	-4%
	Individuel dense	24,1	23,2	23,1	23,5	22,5	-1,0	-4%
	Individuel peu dense	27,4	27,0	24,5	26,3	23,7	-2,6	-10%
	Activités	22,0	19,2	20,8	20,7	18,6	-2,1	-10%
Emplois et études	Centre urbain	19,0	17,1	19,2	18,4	21,1	2,7	15%
	Mixte et dense	21,0	20,6	21,5	21,0	22,4	1,3	6%
	Collectif haut	21,6	19,3	20,9	20,6	19,8	-0,8	-4%
	Individuel dense	25,3	24,6	23,9	24,6	22,9	-1,7	-7%
	Individuel peu dense	28,3	28,2	25,2	27,3	23,9	-3,4	-12%
	Activités	23,3	20,7	21,9	21,9	19,1	-2,9	-13%

Annexe 14 : Comparaison des temps d'accès moyens aux différents équipements par tissu urbain pour les villes monocentriques axialisées

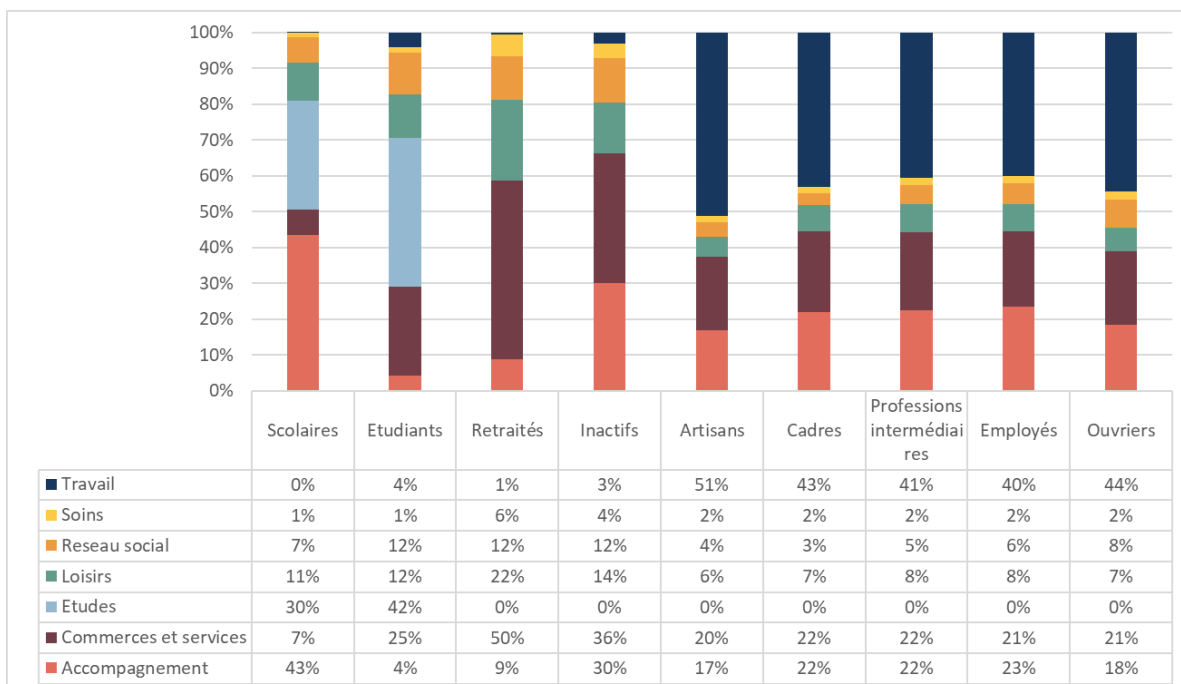
Équipements	Tissus	Chambéry	Clermont-Ferrand	Nîmes	Moyenne villes réelles	Monocentrique axialisée	Écart absolu	Écart relatif (%)
Quotidien accompagnement	Centre urbain	21,3	19,8	21,4	20,8	23,5	2,7	13%
	Mixte et dense	23,7	20,3	22,4	22,2	24,0	1,8	8%
	Collectif haut	21,5	18,8	20,5	20,3	22,9	2,6	13%
	Individuel dense	27,1	22,5	24,1	24,6	24,2	-0,3	-1%
	Individuel peu dense	30,2	25,6	25,5	27,1	25,5	-1,6	-6%
	Activités	22,7	18,9	23,7	21,8	23,6	1,8	8%
Quotidien achats	Centre urbain	20,3	18,6	20,6	19,8	23,3	3,5	18%
	Mixte et dense	23,1	19,3	21,6	21,3	23,9	2,6	12%
	Collectif haut	20,8	17,6	19,6	19,3	23,0	3,7	19%
	Individuel dense	26,5	21,7	23,4	23,9	24,5	0,6	3%
	Individuel peu dense	29,7	24,8	24,9	26,5	25,7	-0,8	-3%
	Activités	22,1	18,0	22,8	21,0	23,5	2,5	12%
Hebdomadaire loisirs	Centre urbain	21,4	20,0	22,7	21,4	23,8	2,4	11%
	Mixte et dense	23,7	20,6	23,5	22,6	24,3	1,7	8%
	Collectif haut	21,5	19,2	21,6	20,8	23,1	2,4	11%
	Individuel dense	27,0	22,7	25,0	24,9	24,5	-0,4	-1%
	Individuel peu dense	30,3	25,8	26,3	27,5	25,7	-1,8	-7%
	Activités	22,6	19,3	24,8	22,2	23,6	1,4	6%
Hebdomadaire achats	Centre urbain	21,2	18,9	22,0	20,7	24,0	3,3	16%
	Mixte et dense	23,7	19,5	22,9	22,0	24,4	2,4	11%
	Collectif haut	21,5	17,9	21,1	20,2	23,3	3,2	16%
	Individuel dense	27,0	21,8	24,5	24,4	24,6	0,1	1%
	Individuel peu dense	30,2	25,0	25,9	27,1	25,6	-1,5	-5%
	Activités	22,6	18,1	24,1	21,6	23,6	1,9	9%
Mensuel loisirs	Centre urbain	19,5	23,4	23,6	22,2	23,6	1,5	7%
	Mixte et dense	22,6	23,9	24,4	23,6	24,3	0,7	3%
	Collectif haut	20,2	22,6	23,0	21,9	23,1	1,2	5%
	Individuel dense	26,1	25,6	25,8	25,8	24,4	-1,4	-5%
	Individuel peu dense	28,7	27,8	27,0	27,8	25,5	-2,4	-9%
	Activités	21,5	23,0	25,9	23,5	23,5	0,0	0%
Mensuel achats	Centre urbain	20,0	17,9	21,1	19,7	23,3	3,6	18%
	Mixte et dense	22,7	18,6	22,0	21,1	23,8	2,8	13%
	Collectif haut	20,3	16,9	20,0	19,1	22,8	3,7	19%
	Individuel dense	26,1	21,0	23,7	23,6	24,2	0,6	2%
	Individuel peu dense	29,3	24,3	25,2	26,3	25,4	-0,9	-3%
	Activités	21,6	17,1	23,2	20,6	23,2	2,6	12%
Mensuel santé	Centre urbain	19,2	18,6	19,8	19,2	23,4	4,2	22%
	Mixte et dense	22,0	19,3	21,0	20,8	24,0	3,2	15%
	Collectif haut	19,6	17,5	18,7	18,6	23,0	4,4	24%
	Individuel dense	25,5	21,7	22,8	23,3	24,5	1,2	5%
	Individuel peu dense	28,7	24,8	24,3	26,0	25,8	-0,2	-1%

	Activités	20,9	18,0	22,2	20,4	23,7	3,3	16%
Rares achats	Centre urbain	20,6	18,5	21,3	20,1	23,7	3,6	18%
	Mixte et dense	22,8	19,2	22,2	21,4	24,2	2,8	13%
	Collectif haut	20,6	17,5	20,5	19,6	23,2	3,6	18%
	Individuel dense	26,3	21,4	23,9	23,9	24,5	0,6	3%
	Individuel peu dense	29,5	24,7	25,5	26,6	25,5	-1,1	-4%
	Activités	21,7	17,6	23,2	20,9	23,4	2,5	12%
Rare santé	Centre urbain	20,0	18,5	21,7	20,0	23,3	3,3	16%
	Mixte et dense	22,7	19,2	22,6	21,5	23,9	2,4	11%
	Collectif haut	20,3	17,4	20,8	19,5	22,8	3,3	17%
	Individuel dense	26,1	21,6	24,2	24,0	24,3	0,3	1%
	Individuel peu dense	29,3	24,8	25,7	26,6	25,6	-1,0	-4%
	Activités	21,6	18,0	23,9	21,2	23,5	2,4	11%
Emplois et études	Centre urbain	21,6	19,8	22,5	21,3	24,0	2,7	13%
	Mixte et dense	24,2	20,3	23,3	22,6	24,4	1,8	8%
	Collectif haut	21,9	18,9	21,5	20,8	23,3	2,5	12%
	Individuel dense	27,4	22,4	24,8	24,9	24,6	-0,3	-1%
	Individuel peu dense	30,5	25,6	26,2	27,4	25,6	-1,8	-7%
	Activités	23,1	18,8	24,5	22,2	23,6	1,4	6%

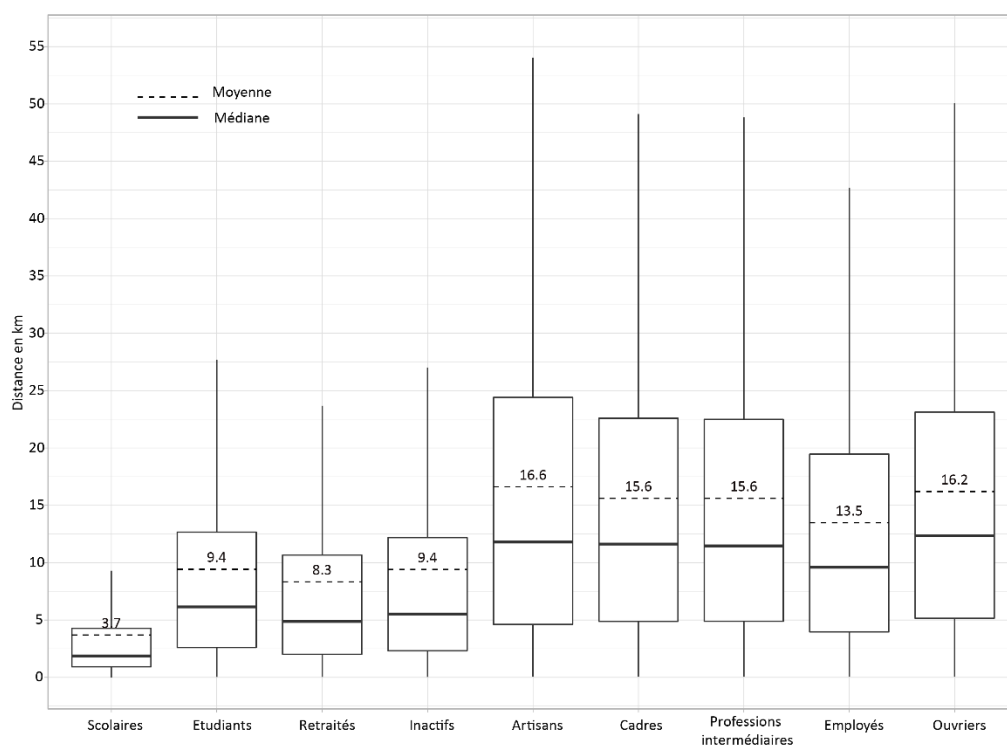
Annexe 15 : Comparaison des temps d'accès moyens aux différents équipements par tissu urbain pour les villes polycentriques hiérarchisées



Annexe 16 : Parts modales de déplacements en fonction des catégories d'individus dans les différents territoires sélectionnés



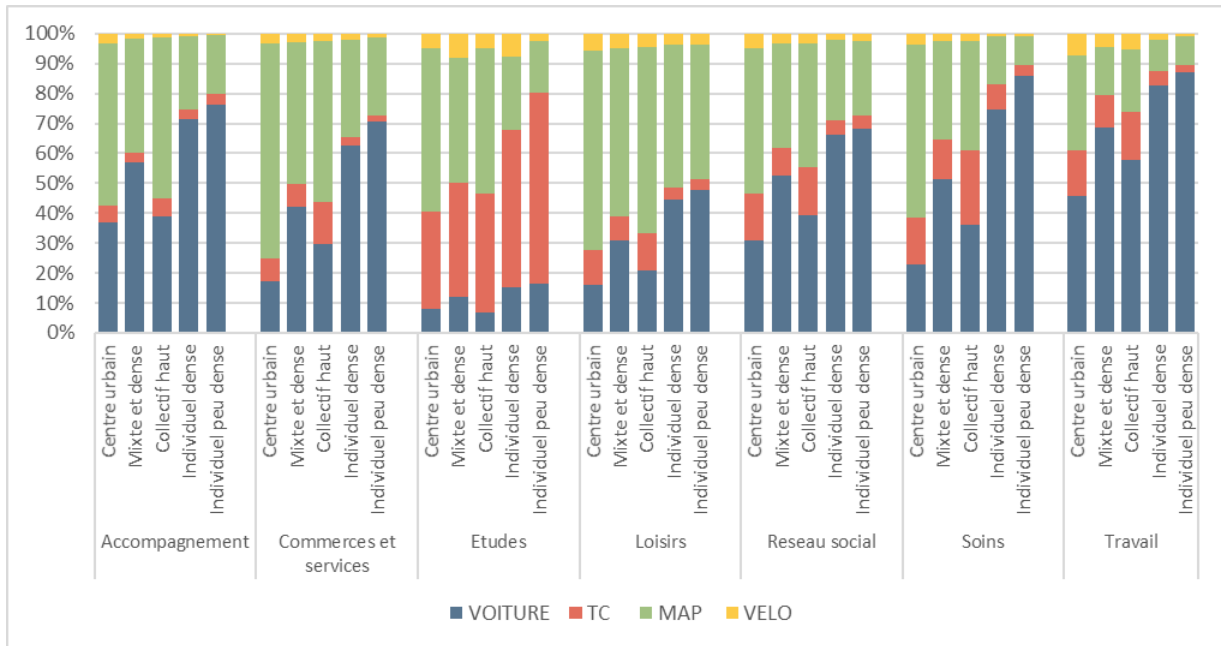
Annexe 17 : Motifs de déplacements en fonction des catégories d'individus dans les différents territoires sélectionnés



Annexe 18 : Distance moyenne de déplacements par personne par jour dans les différents territoires sélectionnés

Variable à expliquer	Variable explicative	Chi-squared X ²	Chi-squared df	Chi-squared p-value	V Cramer	Relation
Mode	Tissu	32622	12	< 2.2e-16	0.20	Moyenne
Motif	Tissu	2624	28	< 2.2e-16	0.05	Très faible
Distance	Tissu	22429	24	< 2.2e-16	0.15	Faible
Durée	Tissu	1163	48	< 2.2e-16	0.03	Très faible

Annexe 19 : Test de la relation entre les variables de pratiques de mobilités et le tissu urbain



Annexe 20 : Parts modales de déplacements en fonction du motif et de la localisation résidentielle dans les différents territoires sélectionnés

	Variable à expliquer	Variable explicative	Chi-squared X ²	Chi-squared df	Chi-squared p-value	V Cramer	Relation
Ensemble	Mode	Structure urbaine	4676.4	15	< 2.2e-16	0.08	Très faible
	Motif	Structure urbaine	2012.9	35	< 2.2e-16	0.04	Très faible
	Distance	Structure urbaine	2919.4	30	< 2.2e-16	0.05	Très faible
	Durée	Structure urbaine	2845	60	< 2.2e-16	0.05	Très faible

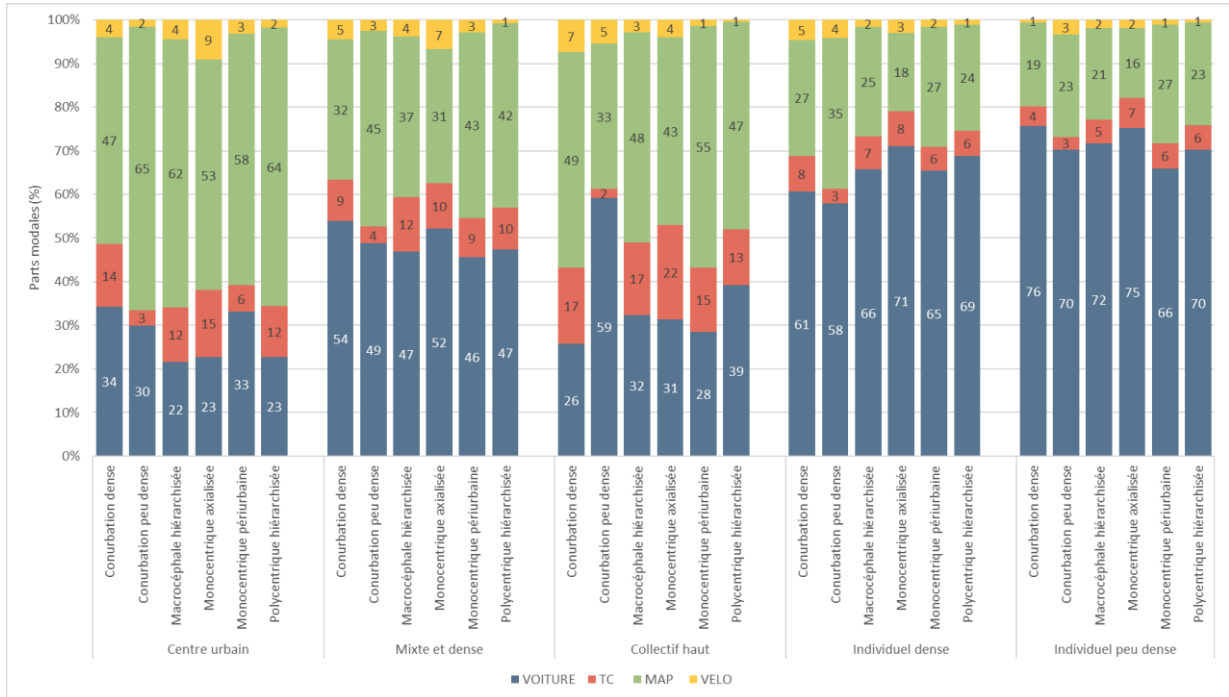
Annexe 21 : Test de la relation deux à deux entre les variables de pratiques de mobilités et la structure urbaine des villes

			Centre urbain	Mixte et dense	Collectif haut	Individuel dense	Individuel peu dense	Global
SCOLAIRES	Nombre de déplacements par jour et par personne		3,1	2,8	3,3	2,5	2,3	2,8
	Distance moyenne parcourue par personne par jour (km)	Accompagnement	1,6	2,0	1,8	3,2	3,6	2,4
		Commerces et services	1,6	1,6	1,9	1,8	2,3	1,8
		Études	3,0	3,8	3,4	7,3	11,0	6,0
		Loisirs	2,8	2,6	2,6	2,7	3,5	2,9
		Réseau social	2,6	1,7	2,0	2,3	3,2	2,3
		Soins	2,0	2,4	3,0	3,4	9,3	3,3
		Travail	NC	2,9	NC	13,3	7,5	6,6
Tous motifs (Retour au domicile compris)		2,5	2,6	2,8	4,3	5,9	3,7	
ÉTUDIANTS	Nombre de déplacements par jour et par personne		3,6	3,2	3,5	3,0	2,9	3,3
	Distance moyenne parcourue par personne par jour (km)	Accompagnement	5,5	6,3	4,6	10,8	16,4	8,1
		Commerces et services	2,9	3,8	3,8	5,6	6,7	3,9
		Études	6,0	8,5	5,7	13,8	19,3	9,3
		Loisirs	4,4	5,6	5,4	7,4	9,1	6,0
		Réseau social	3,7	5,2	4,5	7,4	9,8	5,6
		Soins	3,0	3,8	3,3	5,9	6,9	4,0
		Travail	7,5	9,5	7,6	17,4	20,1	10,6
Tous motifs (Retour au domicile compris)		6,2	8,4	7,0	13,7	18,1	9,4	
RETRAITES	Nombre de déplacements par jour et par personne		3,7	3,5	3,6	3,5	3,4	3,5
	Distance moyenne parcourue par personne par jour (km)	Accompagnement	6,7	8,3	7,7	10,2	14,2	10,1
		Commerces et services	3,3	4,4	4,1	6,7	9,4	5,6
		Études	3,3	6,5	1,7	1,3	17,7	5,2
		Loisirs	5,4	5,8	5,5	7,3	8,3	6,6
		Réseau social	5,8	6,2	6,7	8,6	9,8	7,7
		Soins	2,8	4,5	4,2	7,5	10,5	5,9
		Travail	5,2	8,6	10,7	15,4	13,5	11,3
Tous motifs (Retour au domicile compris)		5,5	6,7	6,4	9,6	12,3	8,3	
INACTIFS	Nombre de déplacements par jour et par personne		4,3	4,3	4,2	4,3	4,1	4,2
	Distance moyenne parcourue par personne par jour (km)	Accompagnement	6,0	6,8	5,1	9,7	14,0	8,4
		Commerces et services	4,0	5,4	4,3	7,4	11,6	6,4
		Études	8,6	9,5	2,2	15,8	13,0	9,3
		Loisirs	5,1	5,9	5,5	7,3	8,8	6,5
		Réseau social	5,5	6,1	5,2	8,7	11,6	7,4
		Soins	3,6	4,6	4,6	8,8	12,5	6,5
Travail	4,3	7,8	7,9	13,0	17,1	9,0		

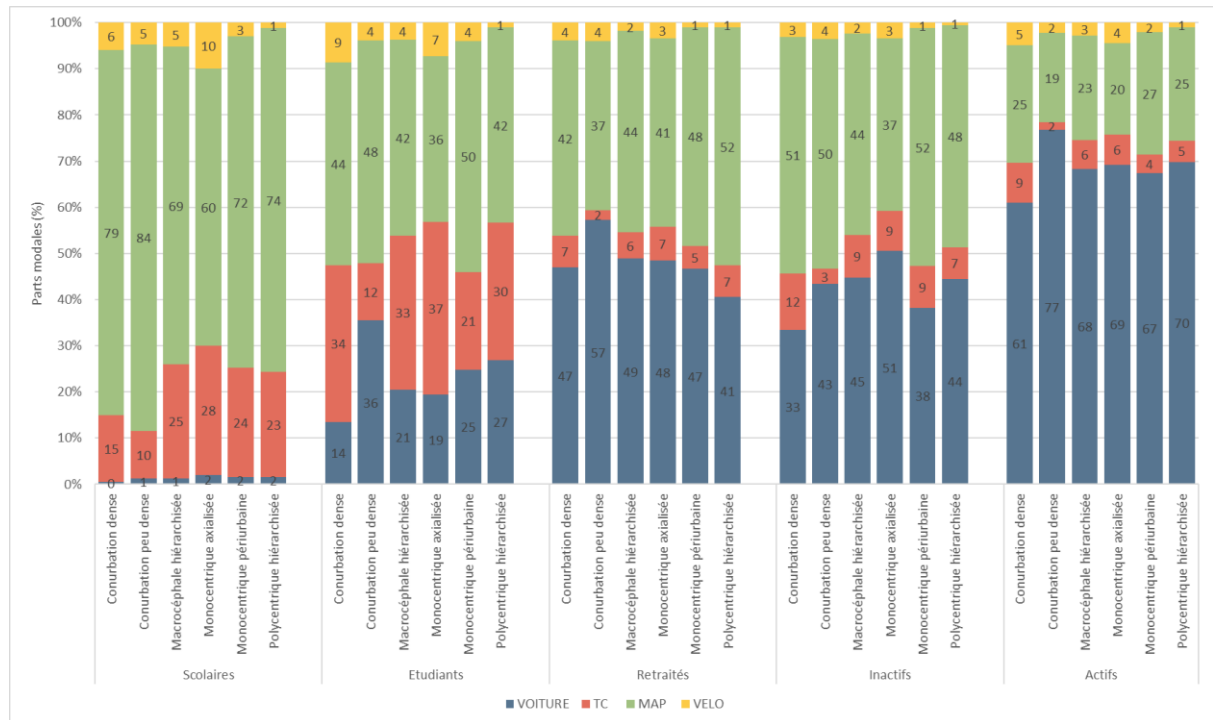
			Centre urbain	Mixte et dense	Collectif haut	Individuel dense	Individuel peu dense	Global
		Tous motifs (Retour au domicile compris)	6,4	8,0	6,6	11,1	15,1	9,4
ARTISANS	Nombre de déplacements par jour et par personne		4,4	4,4	4,1	4,5	4,5	4,4
	Distance moyenne parcourue par personne par jour (km)	Accompagnement	5,6	7,3	4,0	13,1	11,9	9,9
		Commerces et services	4,5	7,5	5,3	10,1	12,1	9,0
		Études	NC	NC	NC	22,1	NC	22,1
		Loisirs	4,1	6,0	3,7	6,6	8,8	6,5
		Réseau social	6,5	9,1	5,6	7,6	7,9	7,6
		Soins	7,5	4,5	6,1	9,5	8,4	7,2
		Travail	10,1	15,9	14,8	21,2	22,8	18,6
Tous motifs (Retour au domicile compris)		8,9	13,5	12,3	19,7	20,6	16,6	
CADRES	Nombre de déplacements par jour et par personne		4,4	4,3	4,1	4,2	4,1	4,2
	Distance moyenne parcourue par personne par jour (km)	Accompagnement	5,9	7,7	6,7	10,4	14,9	10,0
		Commerces et services	3,7	5,8	4,4	7,8	10,7	6,6
		Études	8,5	8,2	2,9	33,8	10,6	10,6
		Loisirs	4,6	5,4	5,2	7,9	9,6	6,5
		Réseau social	6,2	7,4	6,7	7,0	10,2	7,6
		Soins	3,7	6,4	5,0	8,4	9,9	6,9
		Travail	10,4	13,2	10,2	18,7	23,7	15,9
Tous motifs (Retour au domicile compris)		9,6	12,8	10,6	18,3	23,7	15,6	
PROFESSIONS INTERMÉDIAIRES	Nombre de déplacements par jour et par personne		4,1	4,1	4,1	4,3	4,2	4,2
	Distance moyenne parcourue par personne par jour (km)	Accompagnement	5,6	8,2	7,2	10,5	13,9	10,1
		Commerces et services	3,9	5,8	5,4	8,7	11,7	7,5
		Études	4,3	11,2	5,8	NC	31,9	10,3
		Loisirs	4,5	5,4	5,1	8,2	8,0	6,4
		Réseau social	7,2	7,6	6,8	8,8	12,8	9,1
		Soins	4,5	5,3	5,8	10,2	12,1	8,1
		Travail	10,2	12,8	10,8	17,9	23,2	15,7
Tous motifs (Retour au domicile compris)		9,4	12,5	11,1	17,9	22,9	15,6	
EMPLOYÉS	Nombre de déplacements par jour et par personne		4,1	4,1	3,9	4,2	4,2	4,1
	Distance moyenne parcourue par	Accompagnement	5,3	7,7	5,6	9,8	13,0	9,4
		Commerces et services	4,0	5,3	4,4	7,8	9,6	6,6
		Études	6,5	7,1	5,5	8,2	20,6	7,1
		Loisirs	4,4	5,1	4,4	6,0	6,7	5,5
		Réseau social	5,5	7,0	6,1	8,2	9,6	7,5

			Centre urbain	Mixte et dense	Collectif haut	Individuel dense	Individuel peu dense	Global
		Soins	4,5	5,5	4,3	8,8	12,1	7,5
		Travail	7,7	9,8	8,4	16,0	19,6	13,1
		Tous motifs (Retour au domicile compris)	8,3	10,3	8,7	16,1	19,7	13,5
OUVRIERS	Nombre de déplacements par jour et par personne		3,9	3,8	3,6	3,8	3,9	3,8
	Distance moyenne parcourue par personne par jour (km)	Accompagnement	6,6	8,8	7,3	9,6	12,2	9,6
		Commerces et services	4,6	6,1	4,9	9,3	11,2	7,6
		Études	8,8	11,4	8,2	5,3	17,2	10,4
		Loisirs	5,1	5,9	4,1	6,3	9,6	6,7
		Réseau social	6,6	8,1	7,5	10,3	11,5	9,2
		Soins	4,2	6,7	4,4	8,1	9,6	7,2
		Travail	12,7	15,4	12,8	19,2	22,7	17,3
Tous motifs (Retour au domicile compris)		11,2	14,1	12,0	17,6	21,9	16,2	
ACTIFS	Nombre de déplacements par jour et par personne		4,2	4,1	3,9	4,2	4,1	4,1
	Distance moyenne parcourue par personne par jour (km)	Accompagnement	5,7	7,9	6,4	10,3	13,5	9,8
		Commerces et services	4,0	5,8	4,8	8,4	10,8	7,1
		Études	6,6	9,5	5,9	16,6	23,0	9,7
		Loisirs	4,5	5,4	4,7	7,2	8,2	6,2
		Réseau social	6,3	7,5	6,6	8,6	10,8	8,3
		Soins	4,3	5,7	4,9	9,1	11,1	7,5
		Travail	9,9	12,5	10,4	17,9	22,0	15,4
Tous motifs (Retour au domicile compris)		9,4	12,2	10,3	17,5	21,7	15,1	

Annexe 22 : Nombre de déplacement et distance moyenne parcourue par type d'individu en fonction du tissu urbain dans les différents territoires sélectionnés



Annexe 23 : Parts modales de déplacements en fonction du tissu urbain de résidence dans les différents territoires des EMD



Annexe 24 : Parts modales de déplacements par type d'individus en fonction de la structure urbaine dans les différents territoires des EMD

Tissu urbain	Type d'individu	Monocentrique axialisée		Monocentrique périurbaine		Polycentrique hiérarchisée	
		Population	% du total	Population	% du total	Population	% du total
Centre urbain	Artisan	1035	0,3%	1022	0,4%	1533	0,3%
	Cadre	5849	1,6%	5775	2,0%	8662	1,8%
	Employé	5185	1,4%	5120	1,8%	7680	1,6%
	Étudiant	6865	1,9%	6778	2,4%	10167	2,1%
	Inactif	8708	2,4%	8597	3,0%	12896	2,7%
	Ouvrier	2415	0,7%	2384	0,8%	3576	0,8%
	Profession intermédiaire	5420	1,5%	5351	1,9%	8027	1,7%
	Retraité	8923	2,5%	8810	3,1%	13215	2,8%
	Scolaire	5366	1,5%	5299	1,8%	7948	1,7%
Mixte et dense	Artisan	1682	0,5%	1121	0,4%	2818	0,6%
	Cadre	8489	2,4%	5659	2,0%	14223	3,0%
	Employé	11384	3,2%	7589	2,6%	19073	4,0%
	Étudiant	12066	3,4%	8044	2,8%	20216	4,3%
	Inactif	9671	2,7%	6447	2,2%	16203	3,4%
	Ouvrier	5874	1,6%	3916	1,4%	9841	2,1%
	Profession intermédiaire	9690	2,7%	6460	2,2%	16235	3,4%
	Retraité	19950	5,6%	13300	4,6%	33426	7,1%
	Scolaire	12152	3,4%	8101	2,8%	20360	4,3%
Collectif haut	Artisan	466	0,1%	466	0,2%	690	0,1%
	Cadre	2493	0,7%	2493	0,9%	3695	0,8%
	Employé	4042	1,1%	4042	1,4%	5991	1,3%
	Étudiant	5227	1,5%	5227	1,8%	7748	1,6%
	Inactif	4913	1,4%	4913	1,7%	7282	1,5%
	Ouvrier	2014	0,6%	2014	0,7%	2985	0,6%
	Profession intermédiaire	2792	0,8%	2792	1,0%	4137	0,9%
	Retraité	5639	1,6%	5639	2,0%	8358	1,8%
	Scolaire	4251	1,2%	4251	1,5%	6300	1,3%
Individuel dense	Artisan	2818	0,8%	1878	0,7%	3707	0,8%
	Cadre	12570	3,5%	8380	2,9%	16537	3,5%
	Employé	17172	4,8%	11448	4,0%	22591	4,8%
	Étudiant	15150	4,2%	10100	3,5%	19930	4,2%
	Inactif	10393	2,9%	6928	2,4%	13672	2,9%
	Ouvrier	8405	2,3%	5603	1,9%	11057	2,3%
	Profession intermédiaire	14530	4,1%	9687	3,4%	19115	4,0%
	Retraité	26642	7,4%	17761	6,2%	35048	7,4%
	Scolaire	19861	5,5%	13241	4,6%	26128	5,5%

Tissu urbain	Type d'individu	Monocentrique axialisée		Monocentrique périurbaine		Polycentrique hiérarchisée	
		Population	% du total	Population	% du total	Population	% du total
Individuel peu dense	Artisan	1740	0,5%	1833	0,6%	962	0,2%
	Cadre	5582	1,6%	5879	2,0%	3087	0,7%
	Employé	9158	2,6%	9646	3,4%	5065	1,1%
	Étudiant	6368	1,8%	6707	2,3%	3522	0,7%
	Inactif	4515	1,3%	4756	1,7%	2497	0,5%
	Ouvrier	3998	1,1%	4211	1,5%	2211	0,5%
	Profession intermédiaire	6285	1,8%	6619	2,3%	3476	0,7%
	Retraité	10916	3,0%	11497	4,0%	6037	1,3%
	Scolaire	9573	2,7%	10082	3,5%	5294	1,1%
TOTAL		358237	100%	287868	100,0%	473219	100,0%

Annexe 25 : La population générée dans les trois villes archétypales détaillée par catégories d'individus

Motifs principaux	Motifs détaillés	Classement
Travail	Travail	1
	Télétravail	2
	Recherche d'un emploi	3
Études	Université	4
	Lycée	5
	Collège	6
Soin	Santé	7
Réseau social	Visiter des parents ou des amis	8
	Résidence secondaire	9
Loisirs	Loisirs, activité sportive, culturelle ou associative	10
	Promenade, lèche-vitrine	11
Commerces et services	Démarches	12
	Achats en grand magasin, supermarché et hypermarché	13
	Multi-motifs en centre commercial	14
	Restauration hors du domicile	15
	Achats en marche couvert ou de plein vent	16
	Achats en petit et moyen commerce	17
Accompagnement	Nourrice, crèche	18
	École maternelle ou primaire	19
	Accompagner quelqu'un	20
	Aller chercher quelqu'un	21

Annexe 26 : Classement des motifs et des sous-motifs de déplacements dans Mobisim-Soft

```

> lrtest(regm_trivial, regm2)
Likelihood ratio test

Model 1: mode_rec ~ 1
Model 2: mode_rec ~ log(dvol_km) + motif + Typo_menages
  #Df  LogLik Df  Chisq Pr(>Chisq)
1    3 -135501
2   90 -81997 87 107008 < 2.2e-16 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

> PseudoR2(regm2, which = c("McFadden", "Nagelkerke" ))
McFadden Nagelkerke
0.3948582 0.6483357

> car::Anova(regm2, type = "II")
Analysis of Deviance Table (Type II tests)

Response: mode_rec
          LR Chisq Df Pr(>Chisq)
log(dvol_km)  49414  3 < 2.2e-16 ***
motif         16831 60 < 2.2e-16 ***
Typo_menages  8367 24 < 2.2e-16 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

> chisq.test(matrice)

        Pearson's Chi-squared test

data:  matrice
X-squared = 17756, df = 6, p-value < 2.2e-16

> cramer.v(matrice)
[1] 0.5821951
> TschuprowT(matrice)
[1] 0.5260727

```

Annexe 27 : Les résultats des différents tests de validation du modèle Mobisim-Soft

Typologie d'individus	Motif de déplacement	Calibration	Validation	Simulation	Écart simulation validation		Simulation	
		Distance aller en km			Distance en m	%	Nombre de déplacements	Part des déplacements totaux
Inactif	Études	3,32	8,61	3,21	-5,40	63%	219	0,0%
Cadre	Réseau social	2,04	1,42	2,27	0,85	60%	5344	0,4%
Employé	Études	2,04	5,69	2,88	-2,81	49%	178	0,0%
Étudiant	Accompagnement	1,16	0,82	1,18	0,35	43%	3304	0,3%
Scolaire	Commerces & services	1,31	1,54	0,92	-0,62	40%	7164	0,6%
Retraité	Travail	2,57	3,73	2,25	-1,48	40%	1270	0,1%
Étudiant	Commerces & services	1,19	1,29	0,80	-0,49	38%	18752	1,5%
Artisan	Soins	2,37	3,80	2,61	-1,19	31%	600	0,0%
Scolaire	Soins	1,71	2,02	1,42	-0,60	30%	2165	0,2%
Scolaire	Réseau social	0,99	1,29	0,95	-0,34	27%	8502	0,7%
Scolaire	Loisirs	1,14	1,25	0,95	-0,30	24%	13728	1,1%
Étudiant	Loisirs	1,82	2,04	1,61	-0,42	21%	17181	1,4%
Cadre	Soins	2,14	2,94	2,33	-0,61	21%	2757	0,2%
Profession intermédiaire	Soins	2,39	2,21	2,65	0,43	19%	4266	0,3%
Cadre	Accompagnement	1,09	1,40	1,13	-0,27	19%	19171	1,6%
Ouvrier	Commerces & services	1,58	1,68	1,36	-0,32	19%	12288	1,0%
Employé	Réseau social	2,09	2,05	2,44	0,38	19%	12954	1,0%
Scolaire	Études	1,30	1,30	1,54	0,23	18%	46674	3,8%
Inactif	Réseau social	1,79	1,77	2,09	0,31	18%	24831	2,0%
Ouvrier	Soins	1,91	2,44	2,02	-0,42	17%	2380	0,2%
Retraité	Réseau social	1,81	1,80	2,09	0,29	16%	32107	2,6%
Étudiant	Réseau social	1,55	1,83	1,55	-0,29	16%	19063	1,5%
Étudiant	Soins	1,22	1,56	1,31	-0,24	16%	2220	0,2%
Ouvrier	Réseau social	1,96	2,64	2,25	-0,39	15%	7548	0,6%
Artisan	Réseau social	1,92	2,10	2,40	0,30	14%	1585	0,1%

Typologie d'individus	Motif de déplacement	Calibration	Validation	Simulation	Écart simulation validation		Simulation	
		Distance aller en km			Distance en m	%	Nombre de déplacements	Part des déplacements totaux
Profession intermédiaire	Commerces & services	1,71	1,76	1,52	-0,24	14%	22196	1,8%
Employé	Soins	2,08	2,61	2,28	-0,33	12%	5158	0,4%
Cadre	Commerces & services	1,46	1,54	1,35	-0,19	12%	18043	1,5%
Profession intermédiaire	Études	2,96	4,24	3,75	-0,49	12%	271	0,0%
Ouvrier	Loisirs	1,35	1,29	1,44	0,15	11%	7030	0,6%
Artisan	Accompagnement	1,12	1,08	1,20	0,12	11%	3807	0,3%
Inactif	Travail	3,47	2,89	3,20	0,31	11%	5408	0,4%
Étudiant	Travail	3,46	3,84	3,46	-0,39	10%	7623	0,6%
Artisan	Travail	3,69	3,90	3,52	-0,39	10%	19347	1,6%
Employé	Accompagnement	0,93	1,07	0,96	-0,10	10%	32272	2,6%
Employé	Commerces & services	1,59	1,52	1,38	-0,14	9%	26551	2,1%
Ouvrier	Accompagnement	1,13	1,27	1,16	-0,10	8%	11441	0,9%
Inactif	Commerces & services	1,50	1,41	1,30	-0,11	8%	45202	3,7%
Profession intermédiaire	Accompagnement	1,13	1,26	1,16	-0,10	8%	23163	1,9%
Artisan	Commerces & services	1,67	1,70	1,57	-0,13	8%	4049	0,3%
Retraité	Accompagnement	1,62	1,56	1,67	0,11	7%	12544	1,0%
Inactif	Accompagnement	0,77	0,83	0,78	-0,05	6%	41599	3,4%
Profession intermédiaire	Réseau social	2,30	2,42	2,55	0,13	5%	9438	0,8%
Inactif	Soins	1,99	2,12	2,23	0,11	5,4%	7926	0,6%
Artisan	Loisirs	1,27	1,66	1,57	-0,08	5,1%	2015	0,2%
Profession intermédiaire	Travail	4,75	4,29	4,48	0,20	5%	84152	6,8%
Cadre	Loisirs	1,71	1,91	1,83	-0,08	4%	12316	1,0%
Employé	Loisirs	1,33	1,40	1,35	-0,05	4%	17341	1,4%
Retraité	Loisirs	1,62	1,73	1,68	-0,05	3%	58004	4,7%
Ouvrier	Travail	5,01	4,65	4,78	0,13	3%	47857	3,9%

Typologie d'individus	Motif de déplacement	Calibration	Validation	Simulation	Écart simulation validation		Simulation	
		Distance aller en km			Distance en m	%	Nombre de déplacements	Part des déplacements totaux
Retraité	Soins	1,97	2,08	2,13	0,05	3%	15725	1,3%
Cadre	Travail	4,86	4,70	4,59	-0,10	2%	77888	6,3%
Étudiant	Études	2,56	2,65	2,70	0,05	2%	73856	6,0%
Employé	Travail	3,59	3,43	3,48	0,05	1%	101252	8,2%
Scolaire	Accompagnement	0,55	0,53	0,54	0,01	1%	51584	4,2%
Inactif	Loisirs	1,57	1,58	1,60	0,02	1%	27066	2,2%
Retraité	Commerces & services	1,32	1,18	1,19	0,01	1%	82320	6,7%
Profession intermédiaire	Loisirs	1,58	1,66	1,66	0,00	0%	15161	1,2%

En beige : les écarts supérieurs à 25% entre les distances moyennes simulées et celles du jeu de validation / en vert : les écarts inférieurs à 5% ;

Annexe 28 : Comparaison des distances moyennes de déplacements des données de calibration, de validation et simulées en fonction de la catégorie d'individus et du motif de déplacement.

Motif	Catégorie d'individu	Mode	Calibration	Validation	Simulation	Écart simulation / validation		Déplacements simulés	
			Parts modales			Écart net	%	Effectif	Parts (%)
Soins	Ouvrier	TC	0,08	0,06	0,06	0,00	0%	154	0,0%
Loisirs	Retraité	MAP	0,55	0,53	0,53	0,00	0%	31015	2,5%
Loisirs	Profession intermédiaire	MAP	0,45	0,40	0,40	0,00	0%	6088	0,5%
Soins	Inactif	MAP	0,30	0,26	0,26	0,00	0%	2096	0,2%
Travail	Étudiant	TC	0,37	0,44	0,44	0,00	0%	3386	0,3%
Loisirs	Inactif	MAP	0,56	0,57	0,57	0,00	0%	15491	1,3%
Travail	Cadre	VP	0,77	0,79	0,80	0,00	0%	62002	5,0%
Accompagnement	Scolaire	MAP	0,86	0,86	0,86	0,01	1%	44615	3,6%
Accompagnement	Profession intermédiaire	VP	0,76	0,77	0,78	0,01	1%	18029	1,5%
Commerces & services	Profession intermédiaire	VP	0,66	0,65	0,66	0,01	1%	14675	1,2%
Réseau social	Employé	VÉLO	0,02	0,02	0,02	0,00	1%	259	0,0%
Réseau social	Employé	MAP	0,22	0,20	0,20	0,00	1%	2558	0,2%
Accompagnement	Profession intermédiaire	MAP	0,22	0,21	0,20	0,00	2%	4681	0,4%
Accompagnement	Inactif	MAP	0,51	0,44	0,45	0,01	2%	18817	1,5%
Réseau social	Ouvrier	VP	0,76	0,79	0,78	-0,02	2%	5878	0,5%
Travail	Profession intermédiaire	VP	0,78	0,79	0,81	0,02	2%	67828	5,5%
Accompagnement	Employé	VP	0,63	0,66	0,68	0,01	2%	21865	1,8%
Études	Étudiant	TC	0,53	0,55	0,56	0,01	2%	41493	3,4%
Réseau social	Employé	VP	0,68	0,72	0,70	-0,01	2%	9111	0,7%
Soins	Ouvrier	VP	0,69	0,76	0,74	-0,02	2%	1771	0,1%
Soins	Ouvrier	MAP	0,20	0,18	0,18	0,00	2%	426	0,0%
Commerces & services	Scolaire	TC	0,18	0,17	0,17	0,00	2%	1213	0,1%
Commerces & services	Inactif	TC	0,13	0,11	0,11	0,00	2%	5171	0,4%
Réseau social	Cadre	VP	0,71	0,72	0,73	0,02	3%	3926	0,3%

Motif	Catégorie d'individu	Mode	Calibration	Validation	Simulation	Écart simulation / validation		Déplacements simulés	
			Parts modales			Écart net	%	Effectif	Parts (%)
Commerces & services	Cadre	VP	0,61	0,63	0,61	-0,02	3%	11063	0,9%
Réseau social	Étudiant	VÉLO	0,05	0,06	0,06	0,00	3%	1204	0,1%
Accompagnement	Cadre	VP	0,74	0,78	0,76	-0,02	3%	14514	1,2%
Commerces & services	Étudiant	VÉLO	0,03	0,04	0,04	0,00	3%	795	0,1%
Loisirs	Artisan	VP	0,45	0,52	0,54	0,01	3%	1079	0,1%
Loisirs	Employé	VP	0,35	0,36	0,35	-0,01	3%	6023	0,5%
Réseau social	Profession intermédiaire	VP	0,78	0,75	0,77	0,02	3%	7278	0,6%
Commerces & services	Scolaire	MAP	0,77	0,79	0,76	-0,03	3%	5463	0,4%
Accompagnement	Inactif	VP	0,45	0,53	0,51	-0,02	3%	21333	1,7%
Soins	Profession intermédiaire	VP	0,70	0,74	0,76	0,02	3%	3249	0,3%
Loisirs	Employé	MAP	0,58	0,58	0,56	-0,02	3%	9787	0,8%
Travail	Inactif	VP	0,49	0,45	0,47	0,02	3%	2525	0,2%
Loisirs	Ouvrier	MAP	0,56	0,53	0,51	-0,02	4%	3611	0,3%
Travail	Employé	VP	0,67	0,68	0,71	0,03	4%	71650	5,8%
Commerces & services	Employé	TC	0,06	0,07	0,07	0,00	4%	1895	0,2%
Loisirs	Profession intermédiaire	VP	0,47	0,52	0,50	-0,02	4%	7635	0,6%
Travail	Employé	TC	0,16	0,15	0,15	0,01	4%	15358	1,2%
Études	Étudiant	MAP	0,24	0,20	0,21	0,01	4%	15275	1,2%
Loisirs	Scolaire	VÉLO	0,12	0,10	0,10	0,00	4%	1409	0,1%
Commerces & services	Ouvrier	VP	0,65	0,65	0,67	0,03	4%	8284	0,7%
Accompagnement	Retraité	VP	0,81	0,80	0,76	-0,04	5%	9550	0,8%
Réseau social	Étudiant	VP	0,30	0,33	0,31	-0,02	5%	5957	0,5%
Réseau social	Profession intermédiaire	VÉLO	0,02	0,03	0,03	0,00	5%	285	0,0%
Réseau social	Étudiant	TC	0,25	0,23	0,22	-0,01	5%	4241	0,3%

Motif	Catégorie d'individu	Mode	Calibration	Validation	Simulation	Écart simulation / validation		Déplacements simulés	
			Parts modales			Écart net	%	Effectif	Parts (%)
Soins	Employé	VP	0,63	0,70	0,66	-0,03	5%	3409	0,3%
Études	Scolaire	TC	0,47	0,46	0,48	0,02	5%	22545	1,8%
Travail	Ouvrier	VP	0,82	0,81	0,85	0,04	5%	40712	3,3%
Travail	Artisan	VP	0,83	0,81	0,85	0,04	5%	16486	1,3%
Commerces & services	Ouvrier	VÉLO	0,02	0,02	0,02	0,00	5%	225	0,0%
Accompagnement	Inactif	TC	0,03	0,02	0,02	0,00	5%	984	0,1%
Loisirs	Retraité	VP	0,33	0,34	0,36	0,02	5%	20782	1,7%
Accompagnement	Artisan	VP	0,73	0,78	0,83	0,04	5%	3141	0,3%
Loisirs	Étudiant	VÉLO	0,08	0,07	0,08	0,00	6%	1323	0,1%
Loisirs	Scolaire	MAP	0,71	0,72	0,77	0,04	6%	10528	0,9%
Soins	Inactif	VP	0,49	0,49	0,52	0,03	6%	4101	0,3%
Loisirs	Ouvrier	VP	0,38	0,45	0,42	-0,03	7%	2943	0,2%
Commerces & services	Employé	VP	0,59	0,55	0,58	0,04	7%	15451	1,3%
Accompagnement	Employé	MAP	0,35	0,28	0,30	0,02	7%	9704	0,8%
Commerces & services	Étudiant	VP	0,19	0,21	0,20	-0,01	7%	3657	0,3%
Soins	Scolaire	MAP	0,67	0,59	0,62	0,04	7%	1353	0,1%
Commerces & services	Artisan	MAP	0,27	0,26	0,24	-0,02	7%	965	0,1%
Réseau social	Étudiant	MAP	0,40	0,38	0,40	0,03	7%	7660	0,6%
Études	Scolaire	MAP	0,46	0,48	0,44	-0,03	7%	20638	1,7%
Commerces & services	Inactif	VP	0,43	0,41	0,44	0,03	7%	19962	1,6%
Loisirs	Artisan	TC	0,01	0,02	0,02	0,00	7%	39	0,0%
Réseau social	Inactif	VP	0,51	0,51	0,55	0,04	7%	13629	1,1%
Travail	Profession intermédiaire	TC	0,10	0,09	0,10	0,01	8%	8255	0,7%
Commerces & services	Cadre	TC	0,03	0,04	0,05	0,00	8%	844	0,1%

Motif	Catégorie d'individu	Mode	Calibration	Validation	Simulation	Écart simulation / validation		Déplacements simulés	
			Parts modales			Écart net	%	Effectif	Parts (%)
Loisirs	Profession intermédiaire	VÉLO	0,03	0,05	0,05	0,00	8%	744	0,1%
Soins	Étudiant	VP	0,23	0,22	0,24	0,02	8%	537	0,0%
Soins	Scolaire	TC	0,26	0,33	0,30	-0,03	8%	656	0,1%
Réseau social	Scolaire	MAP	0,80	0,80	0,74	-0,07	8%	6251	0,5%
Réseau social	Inactif	MAP	0,33	0,32	0,29	-0,03	9%	7241	0,6%
Commerces & services	Artisan	VP	0,67	0,66	0,72	0,06	9%	2925	0,2%
Études	Inactif	TC	0,27	0,34	0,31	-0,03	9%	68	0,0%
Commerces & services	Cadre	MAP	0,32	0,28	0,30	0,03	9%	5462	0,4%
Commerces & services	Étudiant	MAP	0,57	0,54	0,59	0,05	9%	11059	0,9%
Travail	Employé	VÉLO	0,04	0,03	0,03	0,00	9%	3523	0,3%
Loisirs	Artisan	MAP	0,50	0,38	0,41	0,04	9%	833	0,1%
Soins	Étudiant	TC	0,20	0,33	0,30	-0,03	10%	656	0,1%
Commerces & services	Employé	MAP	0,33	0,36	0,33	-0,03	10%	8736	0,7%
Commerces & services	Inactif	MAP	0,42	0,46	0,42	-0,05	10%	18855	1,5%
Loisirs	Inactif	VP	0,31	0,32	0,29	-0,03	10%	7817	0,6%
Commerces & services	Employé	VÉLO	0,01	0,02	0,02	0,00	10%	468	0,0%
Soins	Retraité	VÉLO	0,02	0,01	0,01	0,00	10%	231	0,0%
Commerces & services	Profession intermédiaire	MAP	0,28	0,29	0,26	-0,03	10%	5853	0,5%
Soins	Cadre	VP	0,72	0,81	0,73	-0,09	10%	2006	0,2%
Réseau social	Retraité	VP	0,61	0,56	0,62	0,06	11%	19886	1,6%
Accompagnement	Ouvrier	VP	0,75	0,89	0,79	-0,10	11%	9080	0,7%
Réseau social	Retraité	TC	0,09	0,09	0,08	-0,01	12%	2654	0,2%
Accompagnement	Retraité	MAP	0,17	0,19	0,21	0,02	12%	2664	0,2%
Accompagnement	Scolaire	TC	0,11	0,11	0,10	-0,01	12%	5082	0,4%

Motif	Catégorie d'individu	Mode	Calibration	Validation	Simulation	Écart simulation / validation		Déplacements simulés	
			Parts modales			Écart net	%	Effectif	Parts (%)
Commerces & services	Ouvrier	MAP	0,29	0,31	0,27	-0,04	13%	3314	0,3%
Loisirs	Cadre	MAP	0,37	0,31	0,35	0,04	13%	4260	0,3%
Accompagnement	Étudiant	VP	0,56	0,57	0,50	-0,07	13%	1637	0,1%
Commerces & services	Retraité	TC	0,07	0,08	0,07	-0,01	13%	5817	0,5%
Loisirs	Cadre	VP	0,50	0,63	0,54	-0,08	13%	6709	0,5%
Soins	Employé	MAP	0,25	0,18	0,20	0,02	13%	1042	0,1%
Accompagnement	Scolaire	VÉLO	0,02	0,02	0,02	0,00	13%	1159	0,1%
Travail	Ouvrier	TC	0,08	0,09	0,08	-0,01	13%	3882	0,3%
Loisirs	Inactif	TC	0,09	0,08	0,10	0,01	14%	2601	0,2%
Loisirs	Étudiant	TC	0,23	0,25	0,21	-0,03	14%	3622	0,3%
Réseau social	Inactif	TC	0,14	0,15	0,13	-0,02	15%	3123	0,3%
Loisirs	Étudiant	VP	0,24	0,27	0,23	-0,04	15%	3982	0,3%
Accompagnement	Cadre	MAP	0,23	0,19	0,22	0,03	16%	4224	0,3%
Études	Étudiant	VP	0,18	0,21	0,18	-0,03	16%	13220	1,1%
Soins	Inactif	TC	0,20	0,24	0,20	-0,04	16%	1584	0,1%
Soins	Artisan	VP	0,75	0,71	0,83	0,12	16%	499	0,0%
Travail	Étudiant	MAP	0,12	0,12	0,14	0,02	17%	1078	0,1%
Réseau social	Ouvrier	MAP	0,19	0,14	0,16	0,02	17%	1216	0,1%
Commerces & services	Étudiant	TC	0,21	0,21	0,17	-0,04	17%	3242	0,3%
Loisirs	Étudiant	MAP	0,46	0,41	0,48	0,07	17%	8254	0,7%
Réseau social	Retraité	MAP	0,28	0,33	0,27	-0,06	18%	8733	0,7%
Réseau social	Profession intermédiaire	MAP	0,16	0,18	0,15	-0,03	18%	1406	0,1%
Réseau social	Profession intermédiaire	TC	0,05	0,04	0,05	0,01	18%	470	0,0%
Soins	Étudiant	MAP	0,51	0,36	0,43	0,07	18%	951	0,1%

Motif	Catégorie d'individu	Mode	Calibration	Validation	Simulation	Écart simulation / validation		Déplacements simulés	
			Parts modales			Écart net	%	Effectif	Parts (%)
Travail	Cadre	VÉLO	0,05	0,05	0,06	0,01	18%	4348	0,4%
Loisirs	Retraité	VÉLO	0,03	0,03	0,04	0,01	21%	2120	0,2%
Travail	Artisan	VÉLO	0,03	0,03	0,03	0,01	21%	620	0,1%
Travail	Cadre	TC	0,10	0,08	0,10	0,02	21%	7462	0,6%
Réseau social	Cadre	MAP	0,20	0,22	0,18	-0,05	21%	943	0,1%
Soins	Employé	TC	0,11	0,10	0,13	0,02	21%	648	0,1%
Commerces & services	Retraité	MAP	0,45	0,54	0,42	-0,12	22%	34600	2,8%
Soins	Retraité	MAP	0,30	0,33	0,26	-0,07	22%	4046	0,3%
Travail	Inactif	TC	0,32	0,27	0,33	0,06	23%	1768	0,1%
Travail	Artisan	TC	0,04	0,03	0,04	0,01	23%	790	0,1%
Accompagnement	Artisan	MAP	0,24	0,22	0,17	-0,05	24%	630	0,1%
Commerces & services	Cadre	VÉLO	0,04	0,05	0,04	-0,01	24%	673	0,1%
Travail	Employé	MAP	0,13	0,14	0,11	-0,03	24%	10721	0,9%
Travail	Étudiant	VP	0,43	0,43	0,33	-0,11	24%	2500	0,2%
Loisirs	Scolaire	TC	0,16	0,16	0,12	-0,04	25%	1623	0,1%
Travail	Inactif	VÉLO	0,03	0,03	0,04	0,01	26%	208	0,0%
Soins	Retraité	VP	0,54	0,47	0,59	0,12	26%	9336	0,8%
Soins	Profession intermédiaire	MAP	0,18	0,19	0,14	-0,05	26%	591	0,0%
Accompagnement	Cadre	TC	0,01	0,01	0,01	0,00	26%	187	0,0%
Réseau social	Ouvrier	TC	0,03	0,05	0,04	-0,01	26%	300	0,0%
Loisirs	Retraité	TC	0,08	0,10	0,07	-0,03	26%	4087	0,3%
Soins	Cadre	MAP	0,17	0,13	0,17	0,04	26%	467	0,0%
Soins	Retraité	TC	0,15	0,19	0,13	-0,05	27%	2111	0,2%
Réseau social	Employé	TC	0,08	0,06	0,08	0,02	28%	1025	0,1%

Motif	Catégorie d'individu	Mode	Calibration	Validation	Simulation	Écart simulation / validation		Déplacements simulés	
			Parts modales			Écart net	%	Effectif	Parts (%)
Réseau social	Artisan	VP	0,80	0,64	0,82	0,18	28%	1298	0,1%
Études	Inactif	VP	0,56	0,66	0,47	-0,19	29%	102	0,0%
Accompagnement	Cadre	VÉLO	0,02	0,02	0,01	-0,01	30%	245	0,0%
Accompagnement	Étudiant	MAP	0,39	0,32	0,42	0,10	30%	1376	0,1%
Loisirs	Employé	VÉLO	0,02	0,02	0,03	0,01	32%	517	0,0%
Réseau social	Scolaire	VP	0,01	0,03	0,02	-0,01	32%	175	0,0%
Commerces & services	Retraité	VP	0,45	0,37	0,49	0,12	32%	40057	3,2%
Commerces & services	Profession intermédiaire	TC	0,04	0,04	0,05	0,01	32%	1056	0,1%
Réseau social	Scolaire	TC	0,12	0,12	0,16	0,04	33%	1353	0,1%
Travail	Inactif	MAP	0,16	0,25	0,17	-0,08	33%	907	0,1%
Travail	Cadre	MAP	0,08	0,08	0,05	-0,03	36%	4076	0,3%
Loisirs	Scolaire	VP	0,01	0,02	0,01	-0,01	36%	168	0,0%
Commerces & services	Ouvrier	TC	0,05	0,03	0,04	0,01	36%	465	0,0%
Travail	Retraité	VP	0,71	0,92	0,58	-0,35	38%	732	0,1%
Soins	Profession intermédiaire	VÉLO	0,02	0,03	0,02	-0,01	39%	72	0,0%
Accompagnement	Étudiant	TC	0,04	0,11	0,07	-0,04	39%	224	0,0%
Travail	Profession intermédiaire	MAP	0,07	0,09	0,05	-0,04	40%	4433	0,4%
Études	Étudiant	VÉLO	0,05	0,04	0,05	0,02	41%	3869	0,3%
Commerces & services	Artisan	VÉLO	0,03	0,03	0,02	-0,01	41%	70	0,0%
Travail	Artisan	MAP	0,11	0,13	0,08	-0,05	42%	1452	0,1%
Réseau social	Artisan	MAP	0,15	0,25	0,14	-0,11	43%	226	0,0%
Accompagnement	Profession intermédiaire	VÉLO	0,01	0,02	0,01	-0,01	44%	221	0,0%
Travail	Profession intermédiaire	VÉLO	0,04	0,03	0,04	0,01	44%	3636	0,3%
Accompagnement	Employé	VÉLO	0,00	0,01	0,01	-0,01	44%	213	0,0%

Motif	Catégorie d'individu	Mode	Calibration	Validation	Simulation	Écart simulation / validation		Déplacements simulés	
			Parts modales			Écart net	%	Effectif	Parts (%)
Réseau social	Artisan	TC	0,02	0,04	0,02	-0,02	45%	33	0,0%
Réseau social	Ouvrier	VÉLO	0,02	0,01	0,02	0,01	46%	154	0,0%
Réseau social	Cadre	VÉLO	0,04	0,03	0,04	0,01	47%	223	0,0%
Réseau social	Retraité	VÉLO	0,03	0,02	0,03	0,01	48%	835	0,1%
Soins	Employé	VÉLO	0,01	0,02	0,01	-0,01	48%	60	0,0%
Travail	Ouvrier	MAP	0,06	0,08	0,04	-0,04	48%	2044	0,2%
Réseau social	Inactif	VÉLO	0,03	0,02	0,03	0,01	48%	838	0,1%
Soins	Cadre	TC	0,07	0,05	0,08	0,03	48%	218	0,0%
Accompagnement	Scolaire	VP	0,01	0,01	0,01	0,00	50%	728	0,1%
Réseau social	Cadre	TC	0,06	0,03	0,05	0,02	51%	252	0,0%
Commerces & services	Artisan	TC	0,03	0,05	0,02	-0,03	58%	89	0,0%
Soins	Étudiant	VÉLO	0,06	0,09	0,03	-0,05	60%	76	0,0%
Loisirs	Artisan	VÉLO	0,03	0,08	0,03	-0,05	61%	64	0,0%
Loisirs	Cadre	VÉLO	0,07	0,04	0,06	0,02	61%	769	0,1%
Loisirs	Profession intermédiaire	TC	0,04	0,03	0,05	0,02	62%	694	0,1%
Commerces & services	Retraité	VÉLO	0,02	0,01	0,02	0,01	64%	1846	0,1%
Accompagnement	Employé	TC	0,02	0,04	0,02	-0,03	64%	489	0,0%
Soins	Inactif	VÉLO	0,01	0,01	0,02	0,01	64%	145	0,0%
Études	Scolaire	VÉLO	0,06	0,04	0,07	0,03	65%	3096	0,3%
Études	Scolaire	VP	0,01	0,02	0,01	-0,02	65%	394	0,0%
Commerces & services	Scolaire	VÉLO	0,04	0,03	0,05	0,02	65%	371	0,0%
Loisirs	Cadre	TC	0,06	0,03	0,05	0,02	66%	578	0,0%
Loisirs	Employé	TC	0,06	0,04	0,06	0,02	67%	1014	0,1%
Travail	Ouvrier	VÉLO	0,03	0,01	0,03	0,01	70%	1219	0,1%

Motif	Catégorie d'individu	Mode	Calibration	Validation	Simulation	Écart simulation / validation		Déplacements simulés	
			Parts modales			Écart net	%	Effectif	Parts (%)
Soins	Scolaire	VP	0,03	0,08	0,02	-0,06	71%	51	0,0%
Soins	Profession intermédiaire	TC	0,11	0,05	0,08	0,03	72%	354	0,0%
Réseau social	Scolaire	VÉLO	0,07	0,05	0,09	0,04	74%	724	0,1%
Réseau social	Artisan	VÉLO	0,03	0,07	0,02	-0,05	74%	29	0,0%
Études	Profession intermédiaire	TC	0,14	0,66	0,14	-0,52	79%	37	0,0%
Commerces & services	Profession intermédiaire	VÉLO	0,03	0,02	0,03	0,01	79%	611	0,0%
Études	Employé	TC	0,37	1,00	0,20	-0,80	80%	36	0,0%
Accompagnement	Profession intermédiaire	TC	0,01	0,01	0,01	0,00	80%	232	0,0%
Loisirs	Inactif	VÉLO	0,04	0,02	0,04	0,02	80%	1157	0,1%
Accompagnement	Ouvrier	MAP	0,23	0,11	0,19	0,09	82%	2204	0,2%
Soins	Artisan	VÉLO	0,03	0,06	0,01	-0,05	82%	6	0,0%
Soins	Artisan	TC	0,02	0,23	0,04	-0,19	85%	21	0,0%
Commerces & services	Inactif	VÉLO	0,03	0,01	0,03	0,01	91%	1213	0,1%
Études	Cadre	VP	0,45	1,00	0,00	-1,00	100%	0	0,0%
Études	Ouvrier	TC	0,26	1,00	0,00	-1,00	100%	0	0,0%
Études	Retraité	MAP	0,29	0,41	0,00	-0,41	100%	0	0,0%
Travail	Scolaire	TC	0,05	0,44	0,00	-0,44	100%	0	0,0%
Travail	Scolaire	VP	0,00	0,56	0,00	-0,56	100%	0	0,0%
Études	Retraité	VP	0,31	0,59	0,00	-0,59	100%	0	0,0%
Accompagnement	Retraité	TC	0,02	0,01	0,02	0,01	103%	249	0,0%
Études	Profession intermédiaire	VP	0,46	0,34	0,74	0,40	118%	200	0,0%
Loisirs	Ouvrier	TC	0,04	0,02	0,03	0,02	123%	240	0,0%
Commerces & services	Scolaire	VP	0,01	0,01	0,02	0,01	131%	118	0,0%
Accompagnement	Inactif	VÉLO	0,01	0,00	0,01	0,01	274%	465	0,0%

Motif	Catégorie d'individu	Mode	Calibration	Validation	Simulation	Écart simulation / validation		Déplacements simulés	
			Parts modales			Écart net	%	Effectif	Parts (%)
Travail	Retraité	TC	0,16	0,04	0,15	0,11	324%	191	0,0%
Travail	Retraité	MAP	0,12	0,04	0,22	0,18	432%	278	0,0%
Loisirs	Ouvrier	VÉLO	0,02	0,00	0,03	0,03	800%	237	0,0%
Soins	Scolaire	VÉLO	0,04	0,00	0,05	0,04	1055%	105	0,0%
Accompagnement	Retraité	VÉLO	0,00	0,00	0,01	0,01	1405%	82	0,0%
Travail	Étudiant	VÉLO	0,08	0,00	0,09	0,08	4206%	658	0,1%

En beige : les écarts supérieurs à 25% entre les distances moyennes simulées et celles du jeu de validation / en vert : les écarts inférieurs à 5%

Annexe 29 : Comparaison des parts modales de déplacements des données de calibration, de validation et simulées en fonction du motif et de la catégorie d'individu.

	Centre urbain	Mixte et dense	Collectif haut	Individuel dense	Individuel peu dense	Global
VP	3,90	5,60	4,52	7,40	9,17	6,47
TC	3,92	5,18	4,45	6,77	8,18	5,96
MAP	1,03	1,22	1,39	1,44	1,86	1,33
VÉLO	1,94	2,39	2,52	3,10	3,95	2,71
Tout modes	2,66	3,95	3,46	5,51	7,26	4,67

Annexe 30 : Distance moyenne des chaînes de déplacement par mode en fonction du tissu urbain dans les trois villes archétypales

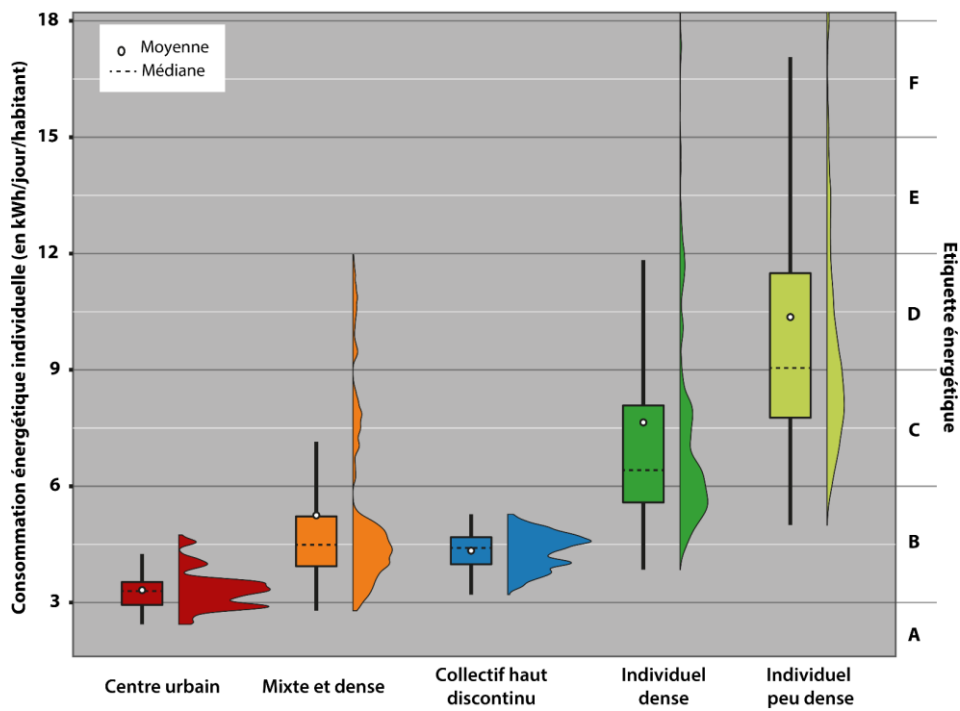
			Centre urbain	Mixte et dense	Collectif haut	Individuel dense	Individuel peu dense
Scolaires	Parts modales (%)	Voiture	1	1	1	1	2
		Marche	77	71	68	68	59
		TC	18	22	25	25	34
		Vélo	5	5	5	5	6
	Distance moyenne parcourue par personne par jour (km)*	Accompagnement	1,9	2,4	2,5	2,8	4,5
		Études	5,6	7,3	7,2	9,6	12,8
		Loisirs	1,9	3,0	3,4	4,2	5,7
		Réseau social	2,7	3,2	3,6	4,4	6,7
		Commerces & services	2,3	3,5	4,2	5,3	7,7
		Soins	2,6	4,0	4,3	7,5	10,4
Tous motifs	2,1	2,6	2,9	3,4	5,0		
Étudiants	Parts modales (%)	Voiture	17	21	22	24	27
		Marche	42	35	32	29	22
		TC	34	38	40	42	46
		Vélo	6	6	6	5	5
	Distance moyenne parcourue par personne par jour (km)*	Études	6,5	8,8	8,1	11,9	15,7
		Réseau social	6,9	9,4	8,3	12,6	16,6
		Commerces & services	2,4	3,6	4,3	5,5	8,1
		Loisirs	3,5	5,1	5,8	7,3	9,9
		Travail	7,2	11,2	9,0	15,7	20,4
		Accompagnement	3,4	4,4	5,0	5,5	8,4
Soins	2,8	4,0	4,4	7,0	9,5		
Tous motifs	5,2	7,2	6,7	10,0	13,4		
Retraités	Parts modales (%)	Voiture	38	46	51	54	59
		Marche	54	45	39	36	30
		TC	6	7	8	8	9
		Vélo	3	3	3	2	2
	Distance moyenne parcourue par personne par jour (km)*	Commerces & services*	3,2	4,9	5,4	7,5	10,5
		Loisirs	3,8	5,5	6,1	7,7	10,1
		Réseau social	6,6	9,4	8,4	13,4	18,2
		Soins	4,2	6,8	6,4	11,1	15,2
		Accompagnement	4,7	5,8	6,3	7,5	10,5
		Travail	4,8	7,9	6,7	12,3	17,1
Tous motifs	3,3	4,7	5,0	7,1	9,6		
Inactifs	Parts modales (%)	Voiture	36	44	48	50	57
		Marche	53	43	39	37	28
		TC	8	10	11	11	12
		Vélo	3	3	3	3	2
	Distance moyenne	Commerces & services*	3,9	5,9	6,0	8,9	12,3
		Accompagnement	2,3	3,0	3,4	3,4	5,5

			Centre urbain	Mixte et dense	Collectif haut	Individuel dense	Individuel peu dense	
	parcourue par personne par jour (km)*	Loisirs	4,1	5,9	6,3	8,3	11,1	
		Réseau social	7,1	10,2	8,8	14,3	19,2	
		Soins	4,9	8,3	7,2	13,0	17,5	
		Travail	7,4	11,7	9,3	16,2	20,9	
		Études	8,4	12,9	10,3	17,4	22,2	
		Tous motifs	4,6	6,7	6,8	9,7	13,5	
Actifs	Parts modales (%)	Voiture	64	70	72	75	79	
		Marche	25	19	17	15	11	
		TC	7	8	8	8	8	
		Vélo	5	4	4	3	2	
	Distance moyenne parcourue par personne par jour (km)*	Travail	9,7	14,6	11,4	19,1	23,6	
		Accompagnement	3,3	4,1	4,7	5,0	7,7	
		Commerces & services	4,0	6,3	6,3	9,7	13,4	
		Loisirs	3,9	5,5	6,0	7,6	9,9	
		Réseau social	6,8	9,6	8,5	13,5	18,3	
		Soins	4,6	7,8	7,0	12,5	16,9	
		Tous motifs	8,5	13,3	10,9	18,0	23,1	
		Artisans	Parts modales (%)	Voiture	71	78	80	84
	Marche			22	16	14	11	8
	TC			3	3	3	3	3
Vélo	4			3	3	2	2	
Distance moyenne parcourue par personne par jour (km)*	Travail		9,1	14,2	11,0	18,9	23,8	
	Accompagnement		3,4	4,3	5,0	5,3	8,1	
	Commerces & services		4,4	6,6	6,5	10,0	13,5	
	Loisirs		3,9	5,5	5,9	7,5	9,7	
	Réseau social		7,3	10,8	9,3	15,3	20,5	
	Soins		4,9	8,5	7,3	13,3	18,0	
	Tous motifs		7,6	12,7	10,4	18,1	23,7	
	Cadres		Parts modales (%)	Voiture	66	72	74	77
Marche				21	16	14	12	9
TC				7	7	7	7	7
Vélo		6		5	5	4	3	
Distance moyenne parcourue par personne par jour (km)*		Travail	11,0	16,5	12,8	21,1	25,7	
		Accompagnement	3,3	4,2	4,8	5,2	8,0	
		Commerces & services	3,8	6,3	6,2	9,8	13,7	
		Loisirs	4,2	6,0	6,4	8,3	11,0	
		Réseau social	4,8	6,5	6,3	9,4	13,6	
		Soins	4,7	8,1	7,1	12,8	17,4	
		Tous motifs	9,5	14,4	11,7	18,9	23,7	
		Employés	Parts	Voiture	55	62	64	68

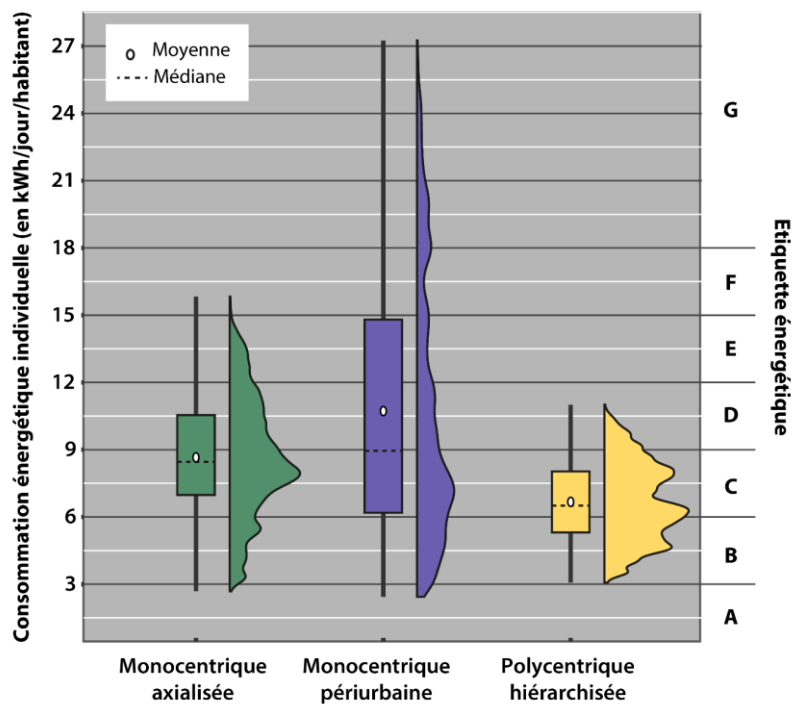
			Centre urbain	Mixte et dense	Collectif haut	Individuel dense	Individuel peu dense	
	modales (%)	Marche	33	25	22	19	14	
		TC	9	10	10	11	11	
		Vélo	4	3	3	2	2	
	Distance moyenne parcourue par personne par jour (km)*	Travail	7,7	11,8	9,4	16,2	20,7	
		Accompagnement	2,7	3,5	4,0	4,1	6,5	
		Commerces & services	3,7	5,7	5,9	8,9	12,5	
		Loisirs	3,4	4,9	5,4	6,6	8,7	
		Réseau social	6,0	8,5	7,8	12,4	17,2	
		Soins	4,3	7,2	6,6	11,6	15,9	
Tous motifs		7,0	11,2	9,5	15,9	21,0		
Profession intermédi aires	Parts modales (%)	Voiture	67	73	75	77	81	
		Marche	22	16	14	12	9	
		TC	6	7	7	7	7	
		Vélo	5	4	4	3	2	
	Distance moyenne parcourue par personne par jour (km)*	Travail	11,0	16,5	12,8	21,0	25,6	
		Accompagnement	3,4	4,2	4,8	5,1	7,7	
		Commerces & services	4,0	6,3	6,4	9,9	13,7	
		Loisirs	4,0	5,7	6,1	7,8	10,4	
		Réseau social	8,3	11,9	10,0	16,1	20,9	
		Soins	5,2	9,0	7,6	13,9	18,6	
		Tous motifs	9,3	14,3	11,7	19,1	24,1	
	Ouvriers	Parts modales (%)	Voiture	70	75	77	79	83
			Marche	22	17	14	13	9
TC			5	6	6	6	6	
Vélo			3	2	2	2	2	
Distance moyenne parcourue par personne par jour (km)*		Travail	9,5	14,1	11,1	18,3	22,6	
		Accompagnement	3,4	4,3	4,9	5,3	8,1	
		Commerces & services	4,4	6,7	6,5	10,0	13,7	
		Loisirs	3,9	5,6	6,0	7,6	10,0	
		Réseau social	7,3	10,5	9,0	14,5	19,3	
		Soins	3,9	6,4	6,1	10,8	14,8	
		Tous motifs	9,2	13,8	11,3	18,2	22,9	

*Les motifs de déplacements sont classés par ordre d'importance.

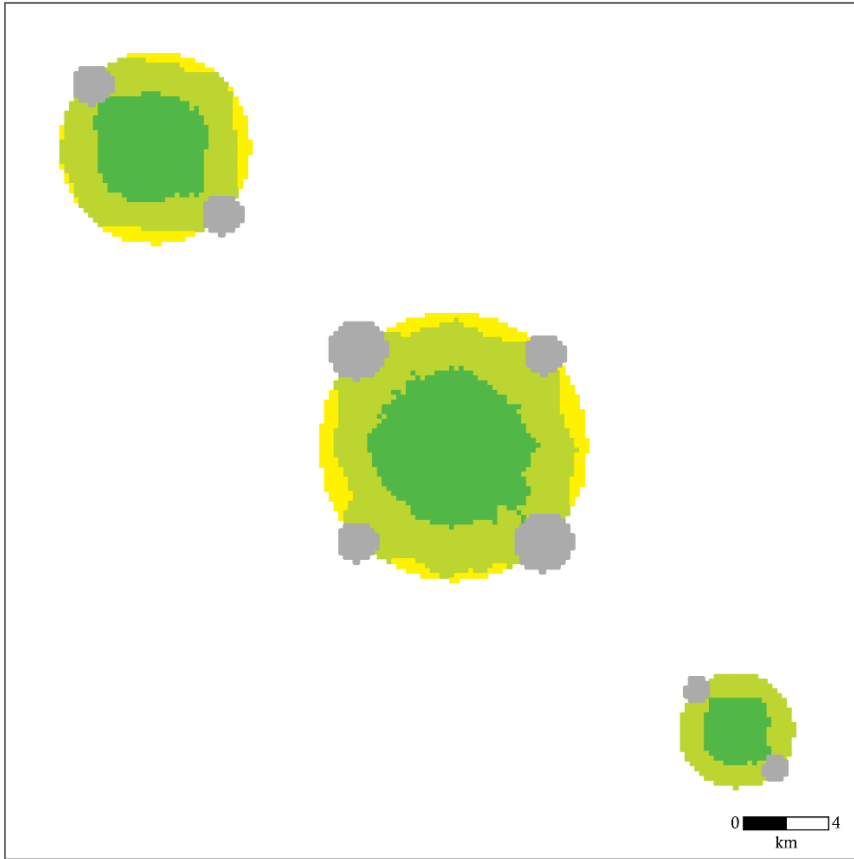
Annexe 31 : Parts modales et distances moyennes de déplacement par individu en fonction du tissu urbain, du type d'individu et du motif de déplacement dans les trois villes archétypales



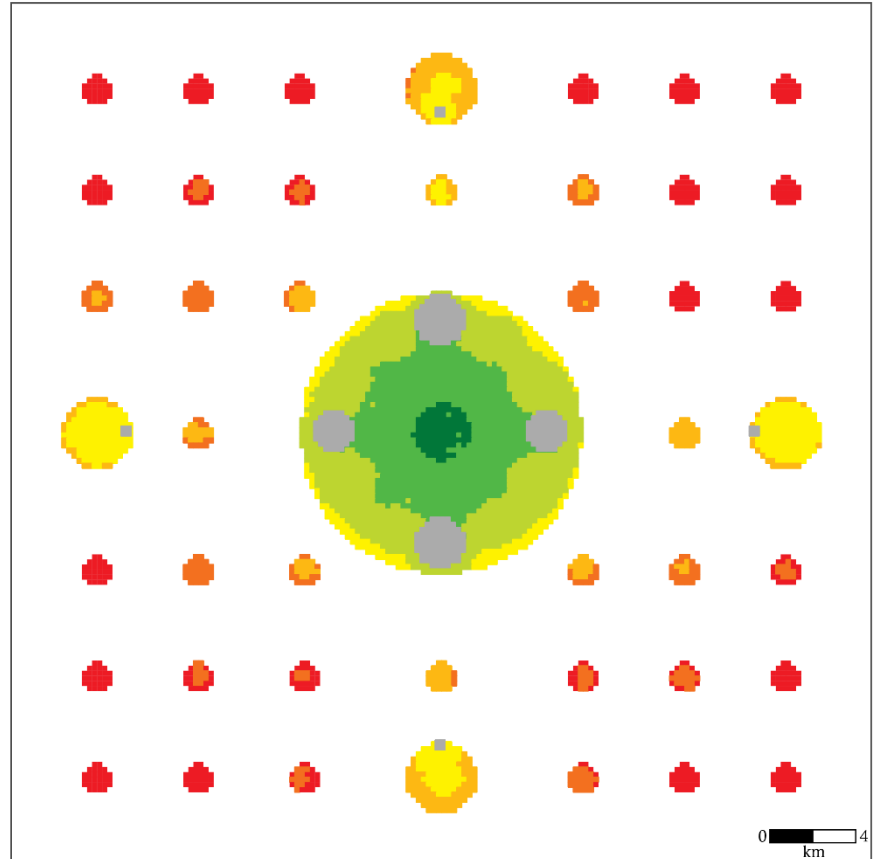
Annexe 32 : Distribution des consommations énergétiques liées aux mobilités quotidiennes en fonction des tissus urbains



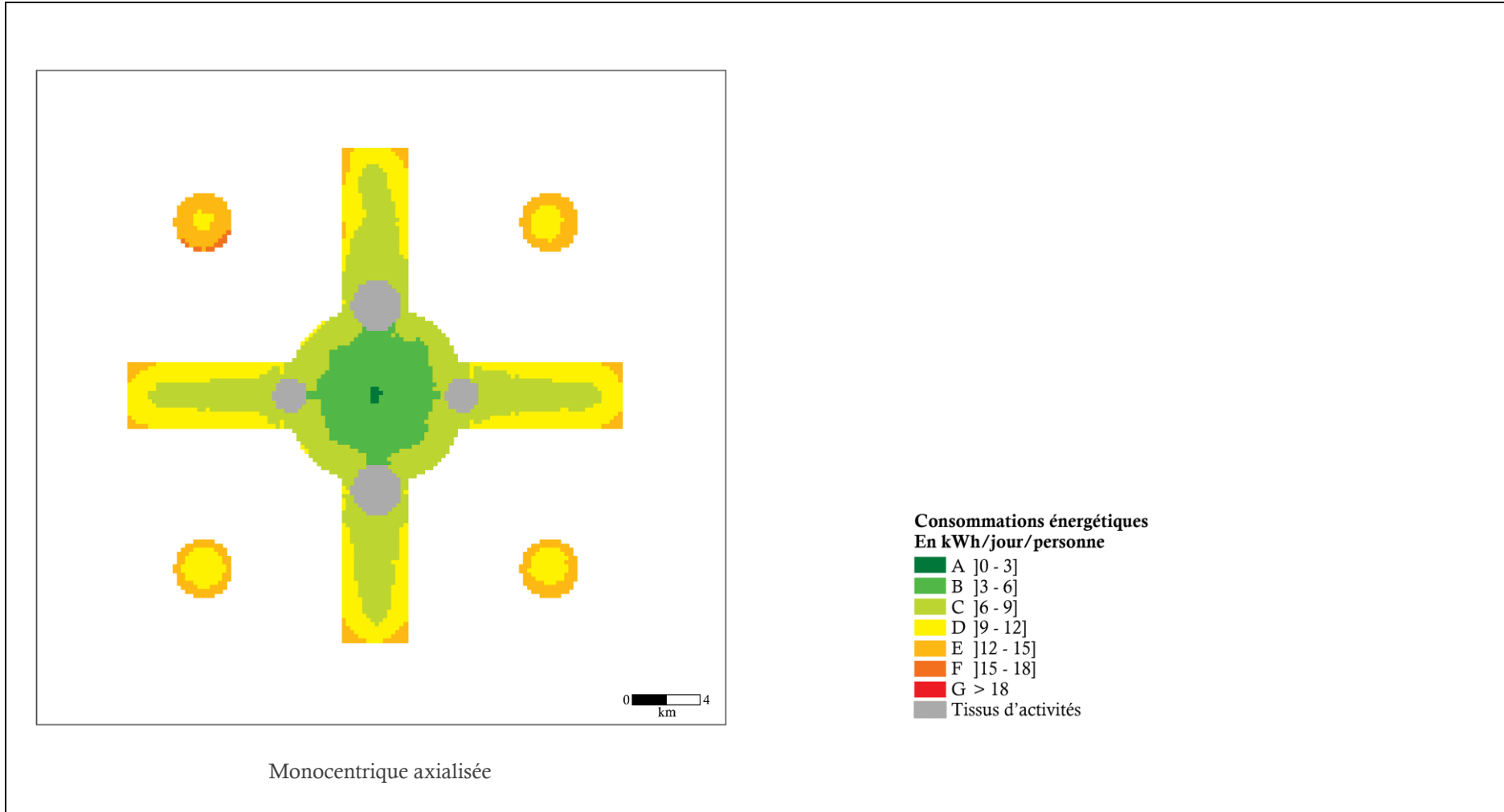
Annexe 33 : Distribution des consommations énergétiques individuelles liées aux mobilités quotidiennes en fonction de la structure urbaine



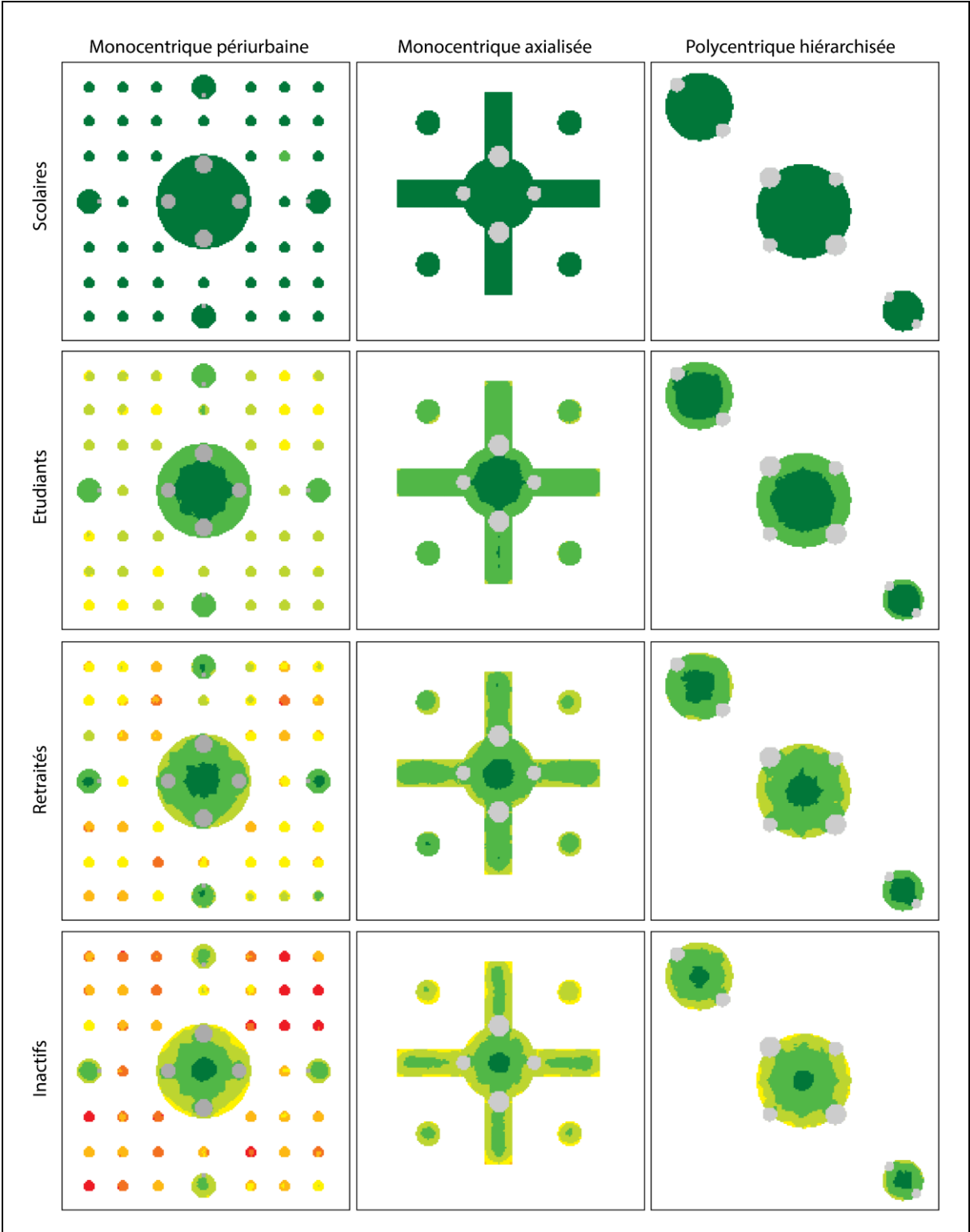
Polycentrique hiérarchisée

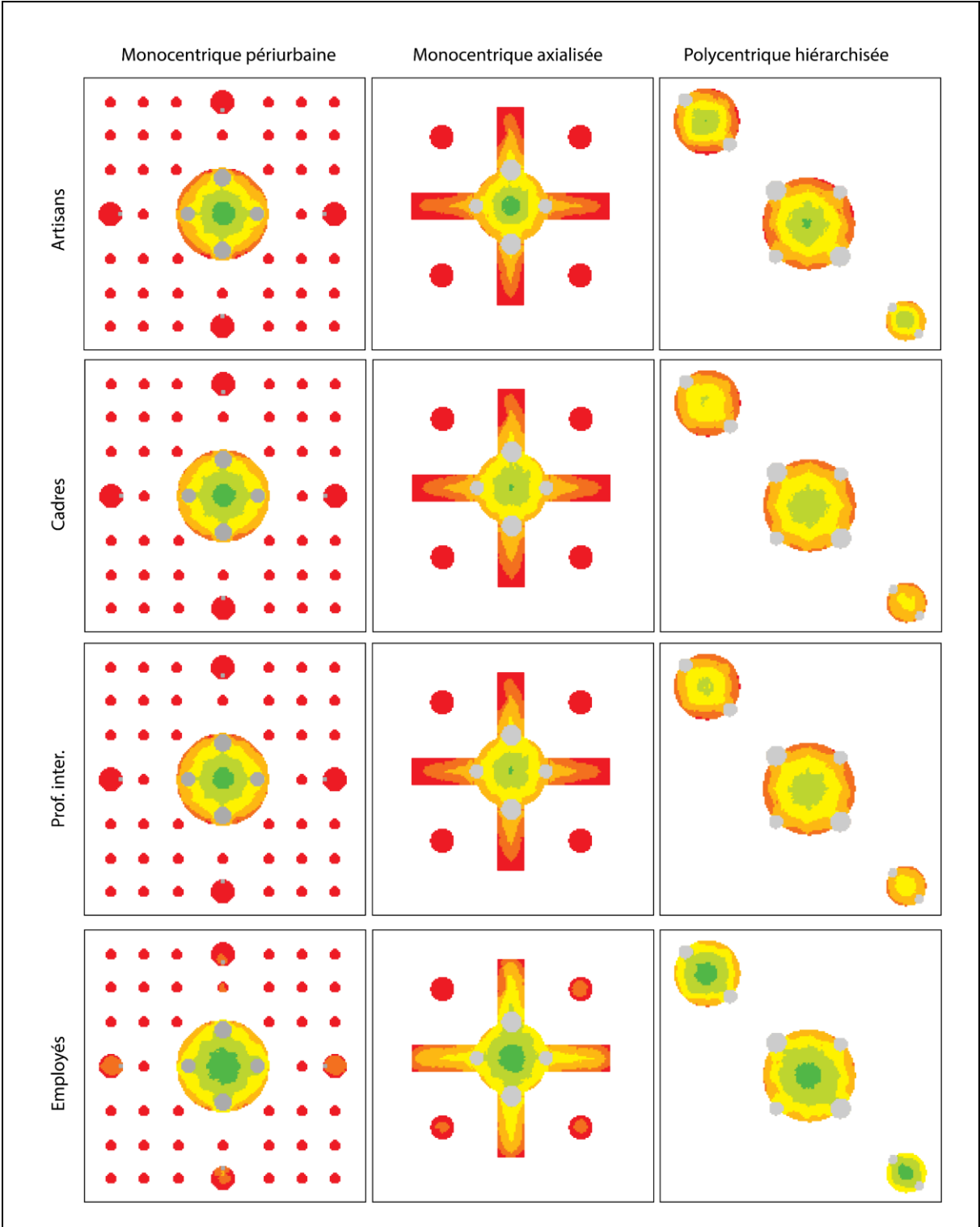


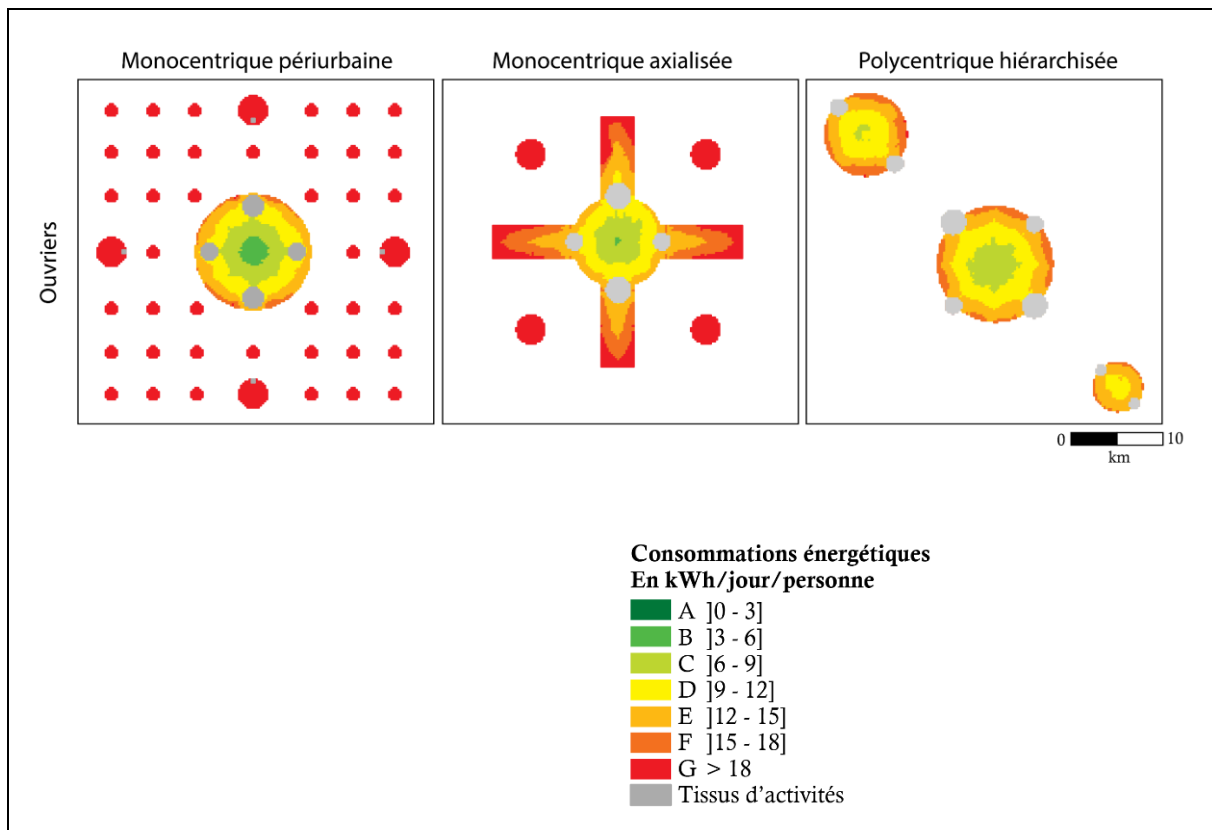
Monocentrique périurbaine



Annexe 34 : Cartographie des consommations énergétiques par habitant liées aux mobilités quotidiennes dans les trois villes archétypales







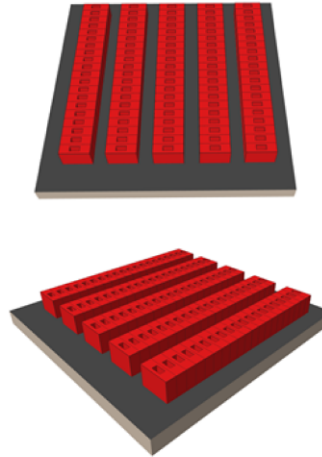
Annexe 35 : Cartographie des consommations énergétiques par habitant liées aux mobilités quotidiennes dans les trois villes archétypales en fonction de la catégorie d'individus

		Heure de la journée																							
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Semaine	Électricité spécifique	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,8	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,8	0,2	0,1	0,1	0,1	0,2	0,8	1	0,2	0,2	0,2	0,1
Samedi		0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,8	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,8	0,2	0,1	0,1	0,1	0,2	0,8	1	0,2	0,2	0,2	0,1
Dimanche		0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,8	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,8	0,2	0,1	0,1	0,1	0,2	0,8	1	0,2	0,2	0,2	0,1
Semaine	Éclairage	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,8	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,8	0,2	0,1	0,1	0,1	0,2	0,8	1	0,2	0,2	0,2	0,1
Samedi		0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,8	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,8	0,2	0,1	0,1	0,1	0,2	0,8	1	0,2	0,2	0,2	0,1
Dimanche		0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,8	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,8	0,2	0,1	0,1	0,1	0,2	0,8	1	0,2	0,2	0,2	0,1
Semaine	ECS	0,08	0,04	0,01	0,01	0,02	0,38	1	0,81	0,67	0,51	0,45	0,42	0,63	0,56	0,32	0,28	0,32	0,56	0,79	0,8	0,62	0,45	0,25	0,19
Samedi		0,09	0,1	0,06	0,02	0,02	0,12	0,33	0,56	0,91	0,9	0,81	0,87	0,88	0,7	0,56	0,44	0,56	0,72	1	0,79	0,44	0,43	0,35	0,21
Dimanche		0,11	0,08	0,06	0,02	0,02	0,06	0,2	0,41	0,65	0,86	0,95	1	0,86	0,74	0,58	0,51	0,29	0,55	0,72	0,78	0,4	0,37	0,34	0,19
Semaine	Chauffage	SB	SB	SB	SB	SB	SB	SP	SP	SP	SP	SP	SP	SP	SP	SP	SP	SP	SP	SP	SP	SP	SB	SB	SB
Samedi		SB	SB	SB	SB	SB	SB	SP	SP	SP	SP	SP	SP	SP	SP	SP	SP	SP	SP	SP	SP	SP	SB	SB	SB
Dimanche		SB	SB	SB	SB	SB	SB	SP	SP	SP	SP	SP	SP	SP	SP	SP	SP	SP	SP	SP	SP	SP	SB	SB	SB
Semaine	Refrigidissement	SB	SB	SB	SB	SB	SB	SP	SP	SP	SP	SP	SP	SP	SP	SP	SP	SP	SP	SP	SP	SP	SB	SB	SB
Samedi		SB	SB	SB	SB	SB	SB	SP	SP	SP	SP	SP	SP	SP	SP	SP	SP	SP	SP	SP	SP	SP	SB	SB	SB
Dimanche		SB	SB	SB	SB	SB	SB	SP	SP	SP	SP	SP	SP	SP	SP	SP	SP	SP	SP	SP	SP	SP	SB	SB	SB

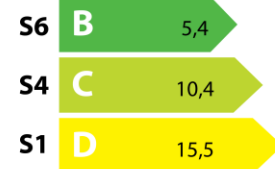
* SB : « Setback » : Température dite de recul ; SP : « Setpoint » : température de consigne.

FORME 1 - GRAND COLLECTIF MITOYEN ANCIEN AVEC COUR INTÉRIURE TISSU CENTRE URBAIN

Batiment	
Volumétrie	R+6
Nombre de logements	>10
Hauteur totale (m)	21
Volume (m ³)	5250
Surface au sol (m ²)	250
Longueur (côté rue) (m)	10
Largeur (m)	30
Surface de l'enveloppe (m ²)	1340
Compacité du bâti (surface de l'enveloppe / volume)	0,3
Taux de façade mitoyenne	75%
Surface passive (m ²)	64
Surface active (m ²)	186
Ratio surface passive / surface active	0,34
Maille	
Densité de bâtiments	0,4
Nombre de batiment par maille	100

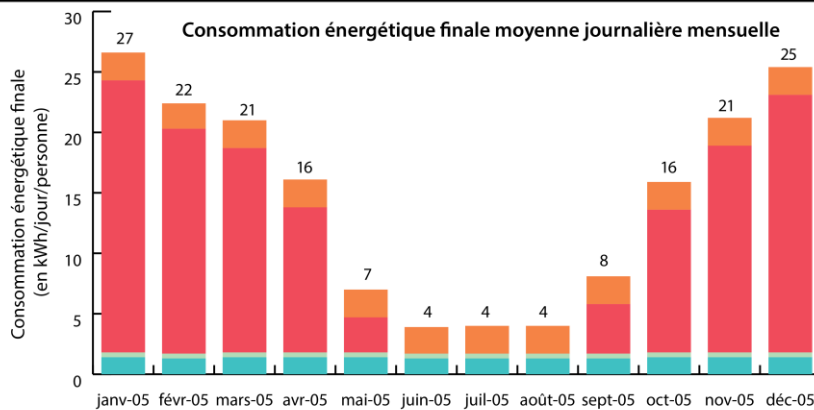


Consommations énergétiques individuelles résidentielles

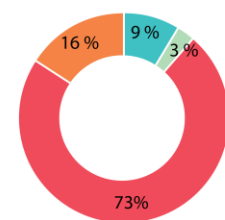


kWh/jour/personne

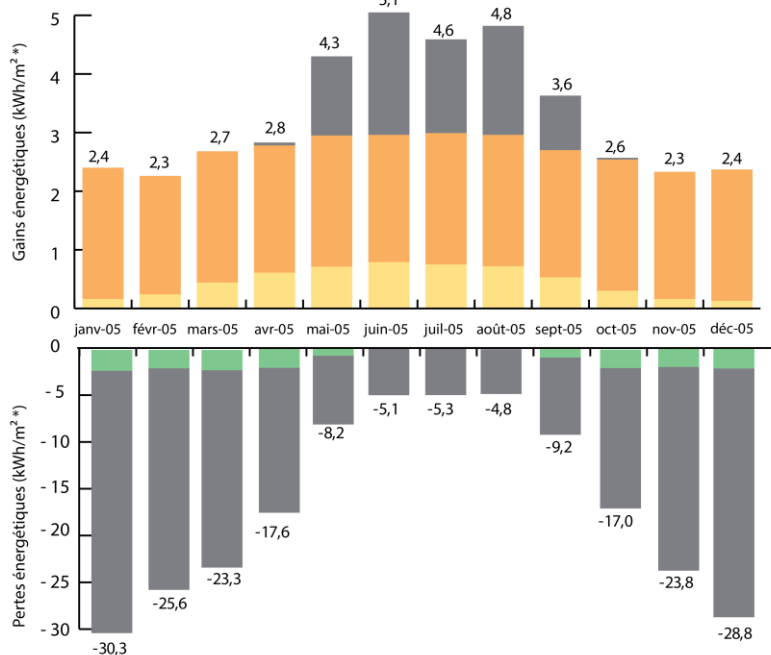
STANDARD 1



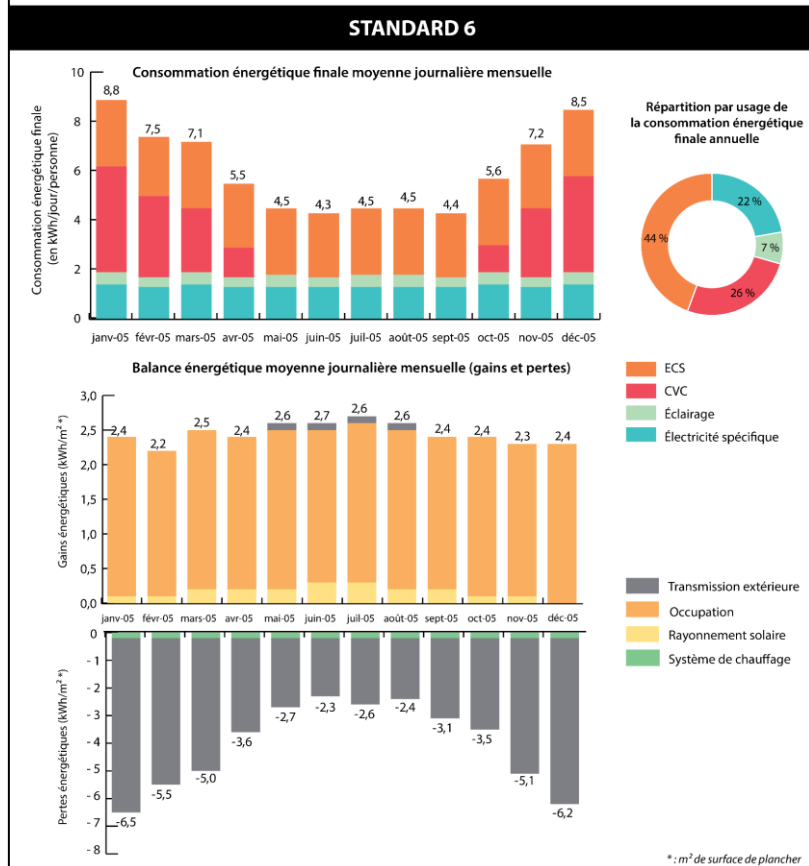
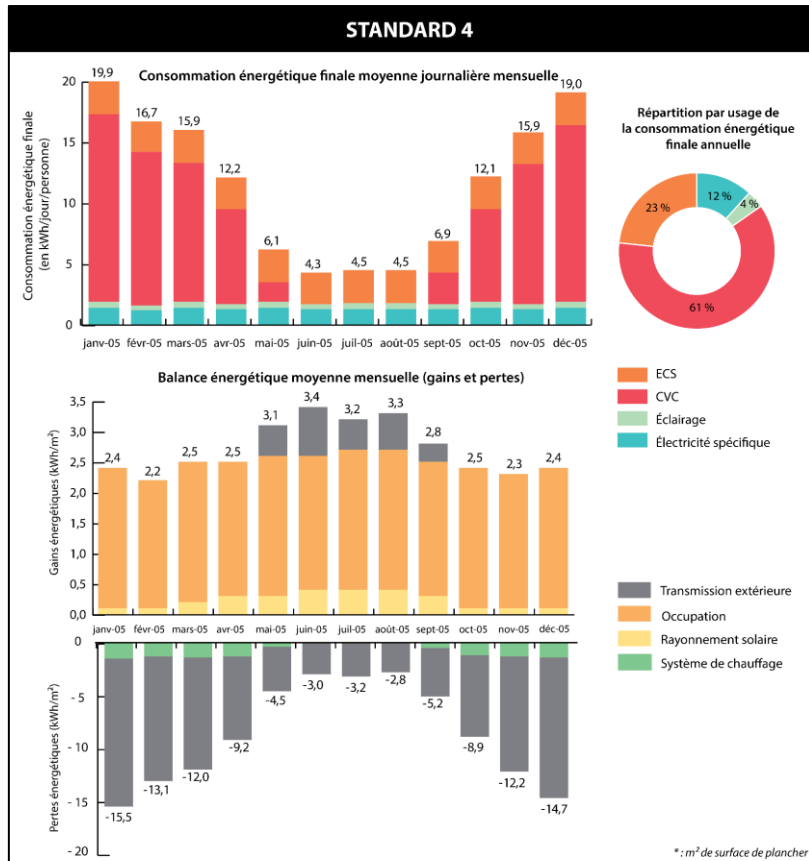
Répartition par usage de la consommation énergétique finale annuelle



Balance énergétique moyenne journalière mensuelle (gains et pertes)



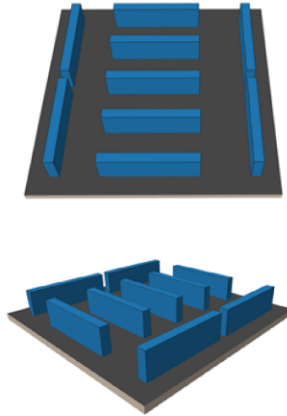
* m² de surface de plancher



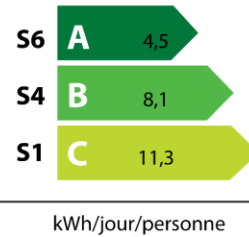
Annexe 37 : Consommations énergétiques résidentielles détaillées pour la forme architecturale bâtie 1

FORME 2 - GRAND COLLECTIF ISOLÉ TISSU COLLECTIF HAUT

Batiment	
Volumétrie	R+10
Nombre de logements	>10
Hauteur totale (m)	30
Volume (m ³)	30000
Surface au sol (m ²)	1000
Longueur (côté rue) (m)	100
Largeur (m)	10
Surface de l'enveloppe (m ²)	5300
Compacité du bâti (surface de l'enveloppe / volume)	0,2
Taux de façade mitoyenne	0%
Surface passive (m ²)	216
Surface active (m ²)	784
Ratio surface passive / surface active	0,28
Maille	
Densité de bâtiments	0,15
Nombre de batiment par maille	9

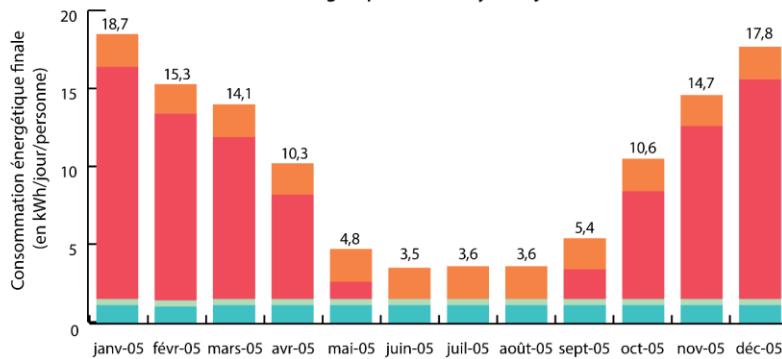


Consommations énergétiques individuelles résidentielles

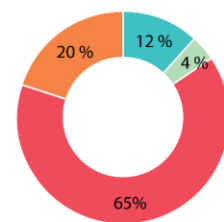


STANDARD 1

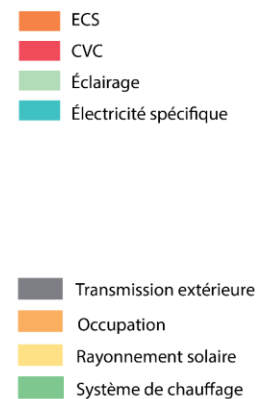
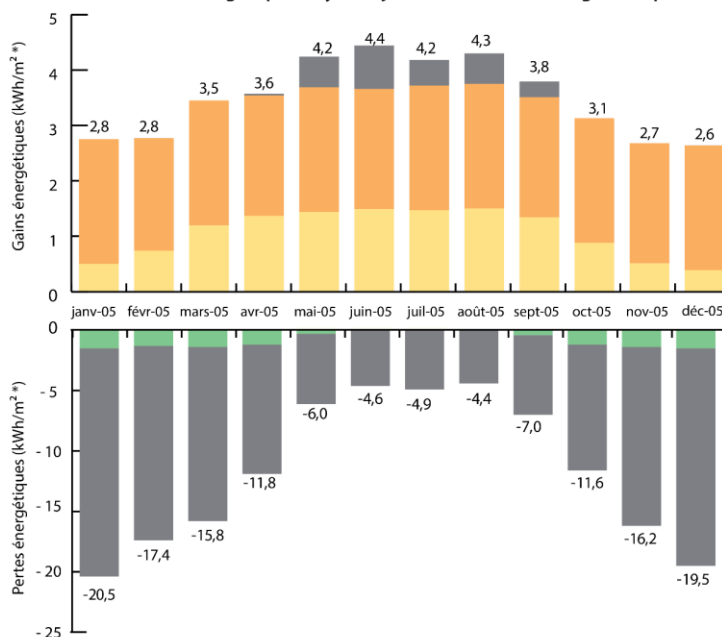
Consommation énergétique finale moyenne journalière mensuelle



Répartition par usage de la consommation énergétique finale annuelle

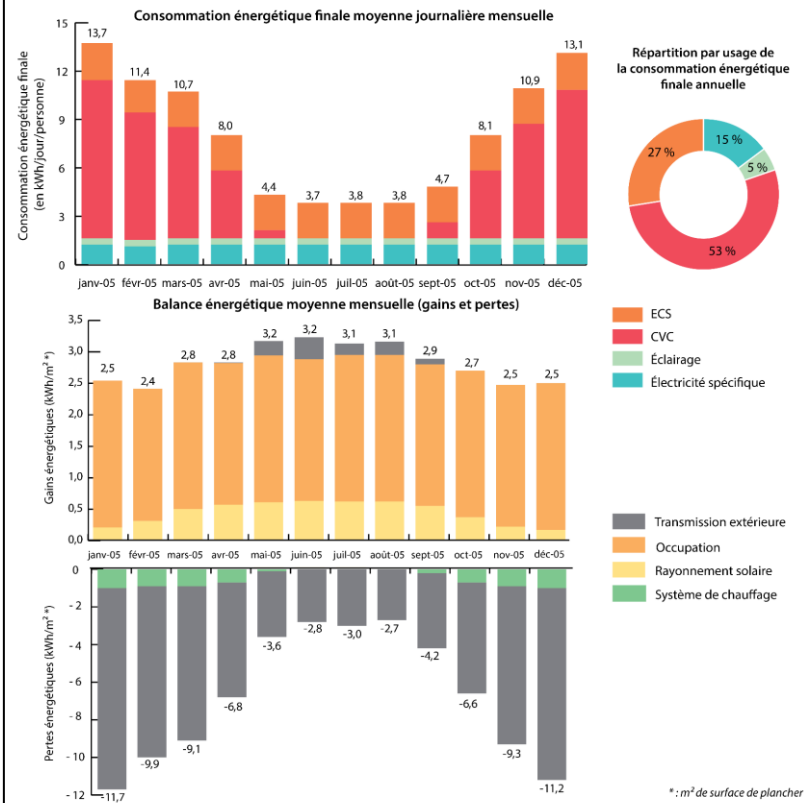


Balance énergétique moyenne journalière mensuelle (gains et pertes)

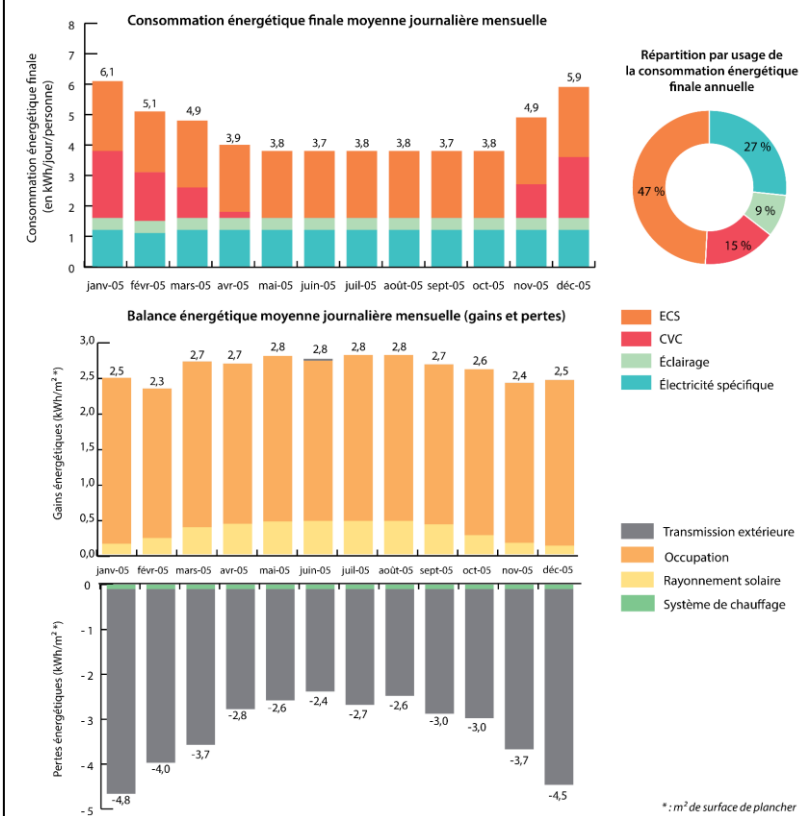


* m² de surface de plancher

STANDARD 4



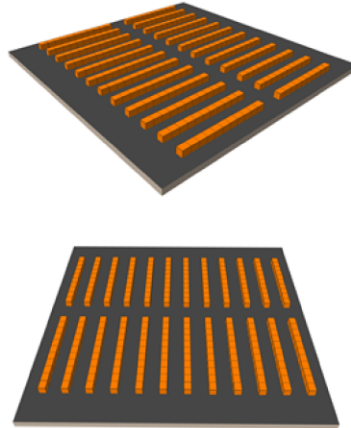
STANDARD 6



Annexe 38 : Consommations énergétiques résidentielles détaillées pour la forme architecturale bâtie 2

FORME 3 - MAISON INDIVIDUELLE MITOYENNE TISSU MIXTE ET DENSE

Batiment	
Volumétrie	R+1
Nombre de logements	1
Hauteur totale (m)	6
Volume (m ³)	288
Surface au sol (m ²)	48
Longueur (côté rue) (m)	8
Largeur (m)	6
Surface de l'enveloppe (m ²)	180
Compacité du bâti (surface de l'enveloppe / volume)	0,6
Taux de façade mitoyenne	43%
Surface passive (m ²)	20
Surface active (m ²)	28
Ratio surface passive / surface active	0,71
Maille	
Densité de bâtiments	0,19
Nombre de batiment par maille	247



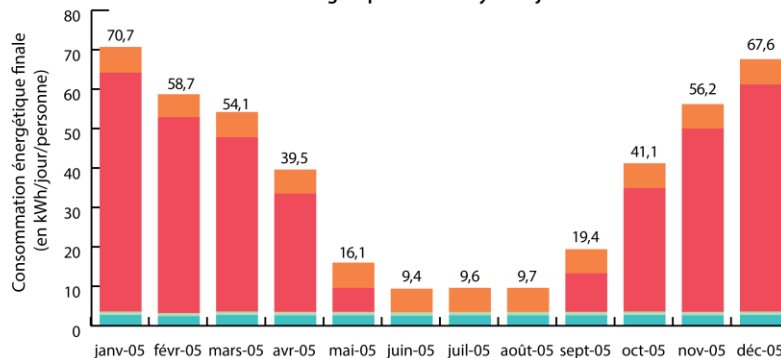
Consommations énergétiques individuelles résidentielles



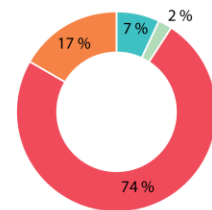
kWh/jour/personne

STANDARD 1

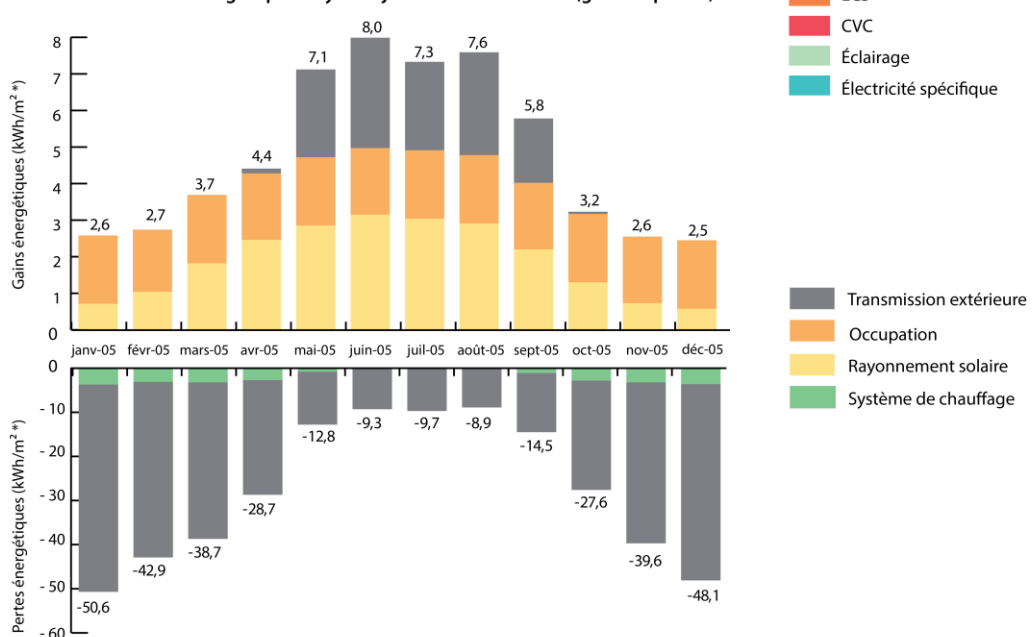
Consommation énergétique finale moyenne journalière mensuelle



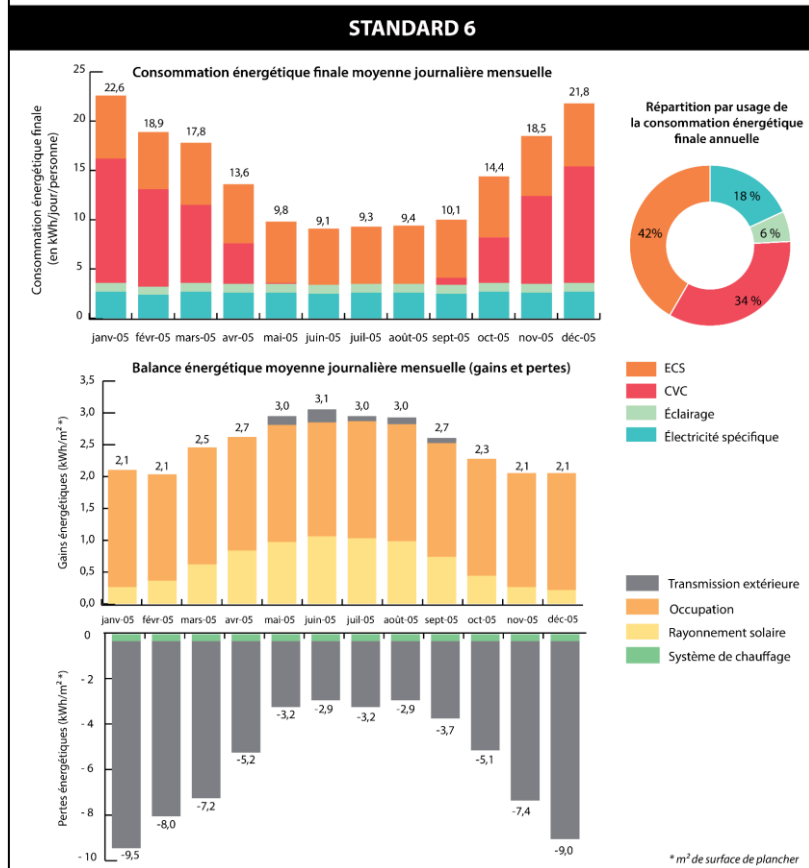
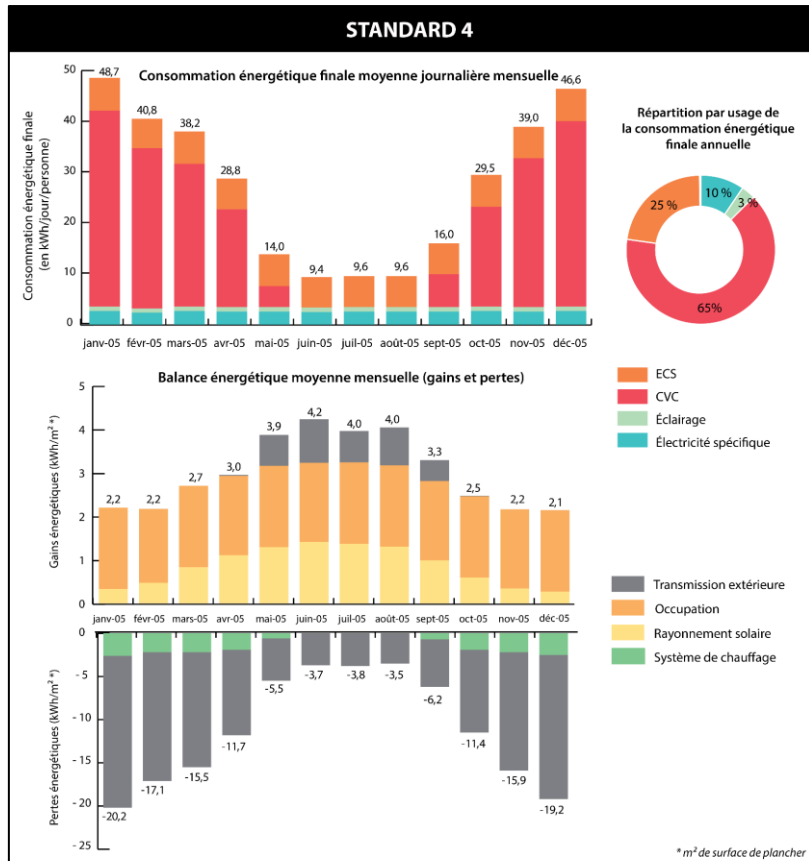
Répartition par usage de la consommation énergétique finale annuelle



Balance énergétique moyenne journalière mensuelle (gains et pertes)



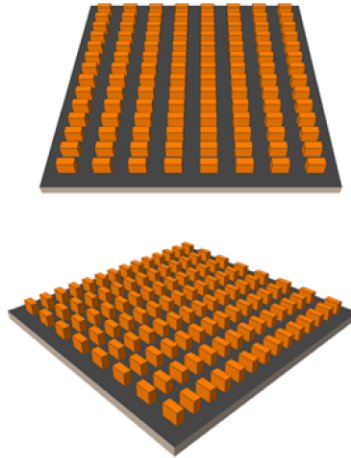
* m² de surface de plancher



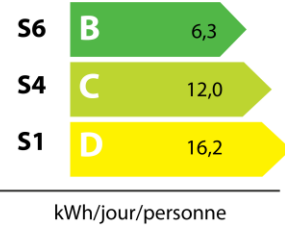
Annexe 39 : Consommations énergétiques résidentielles détaillées pour la forme architecturale bâtie 3

FORME 4 - PETIT COLLECTIF ISOLÉ TISSU MIXTE ET DENSE

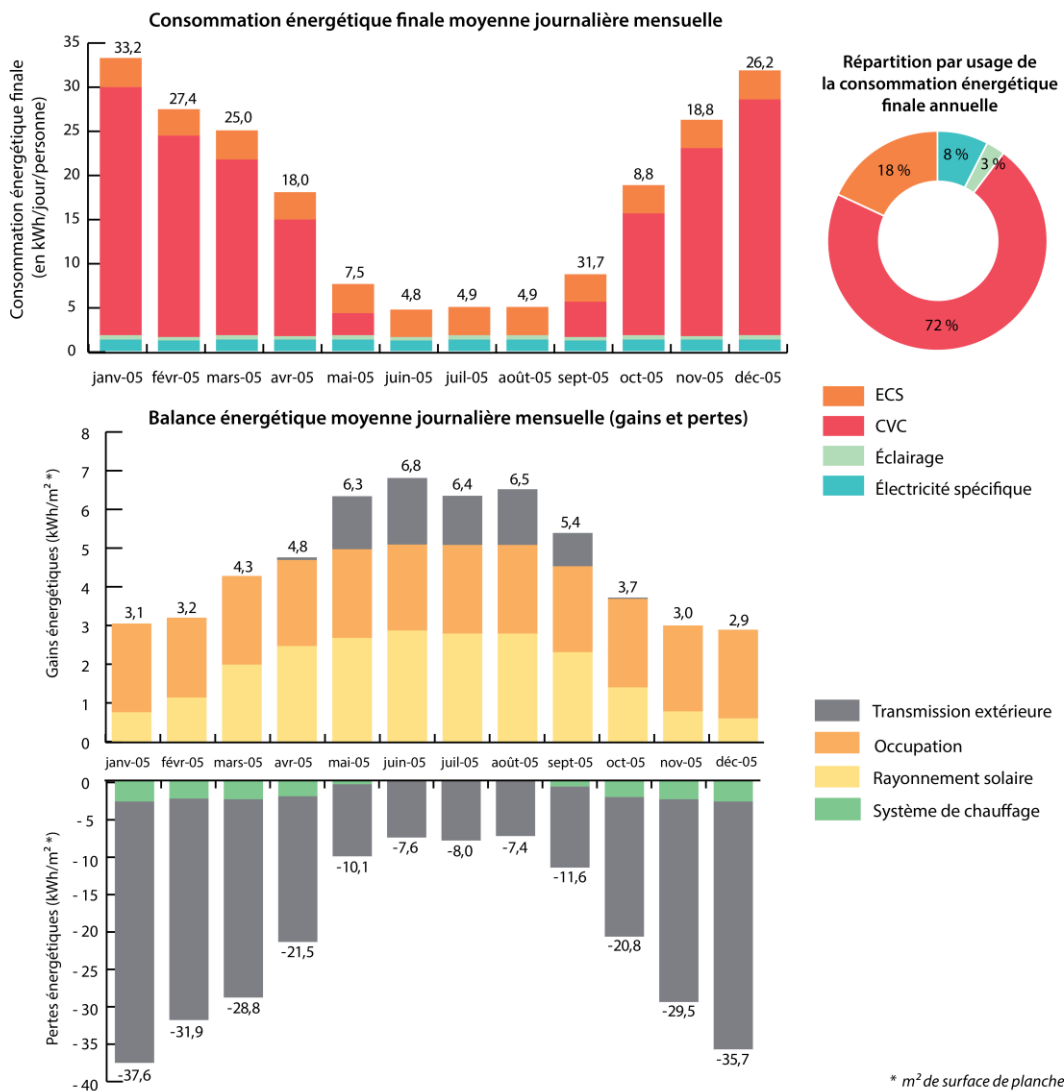
Batiment	
Volumétrie	R+3
Nombre de logements	< 10
Hauteur totale (m)	12
Volume (m ³)	1260
Surface au sol (m ²)	105
Longueur (côté rue) (m)	15
Largeur (m)	7
Surface de l'enveloppe (m ²)	474
Compacité du bâti (surface de l'enveloppe / volume)	0,4
Taux de façade mitoyenne	0%
Surface passive (m ²)	40
Surface active (m ²)	65
Ratio surface passive / surface active	0,62
Maille	
Densité de bâtiments	0,19
Nombre de bâtiment par maille	113

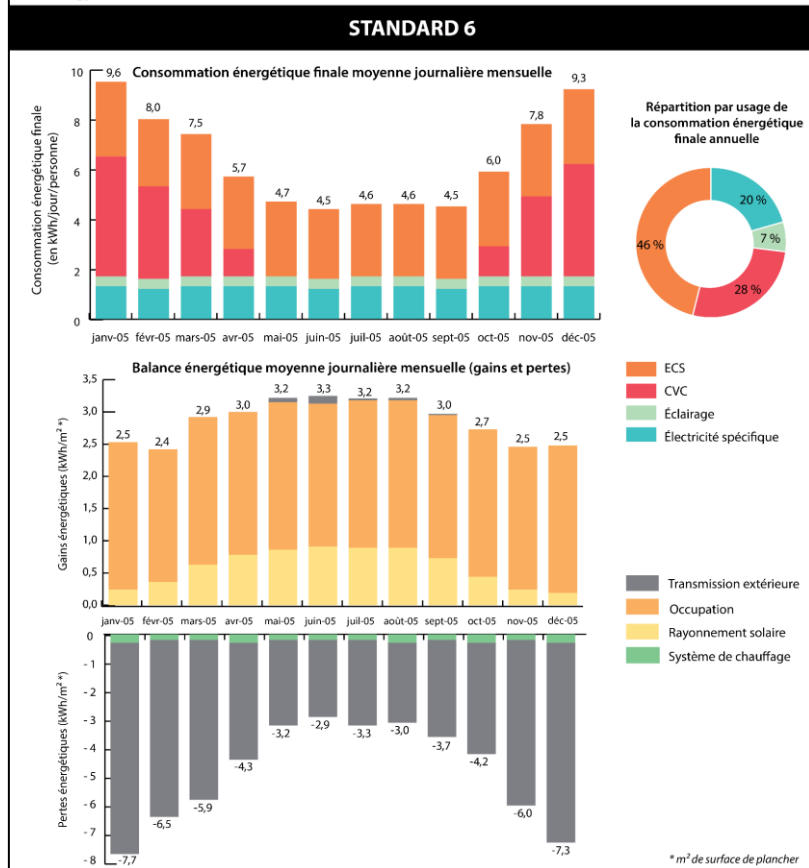
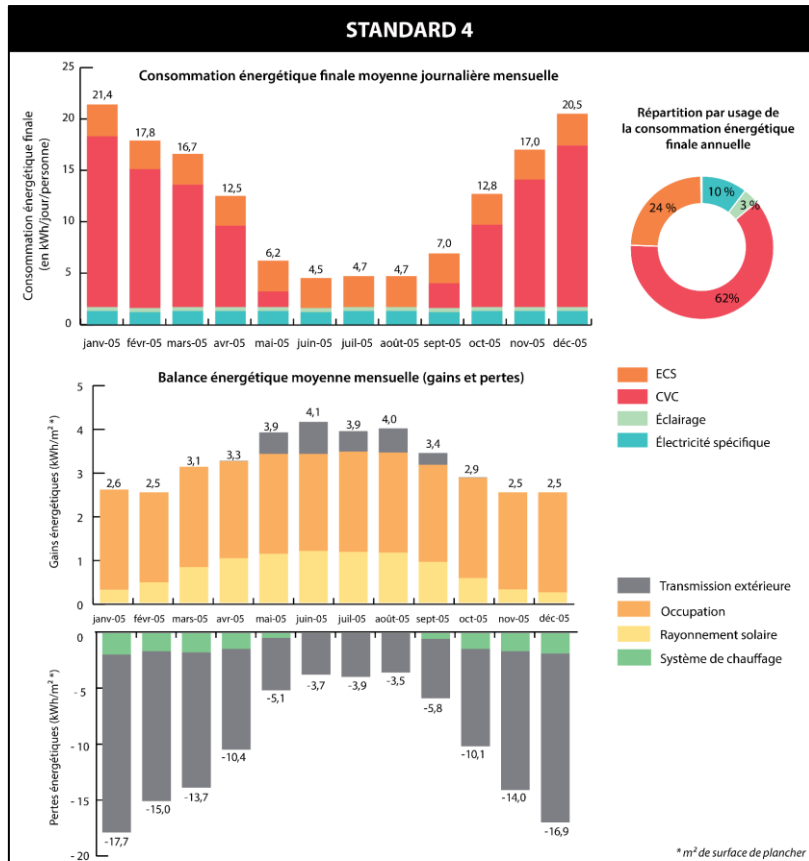


Consommations énergétiques individuelles résidentielles



STANDARD 1

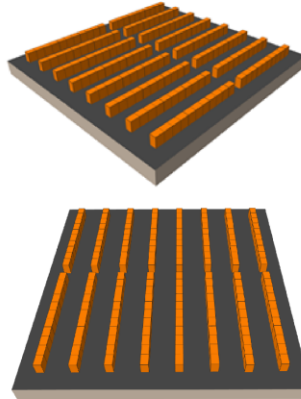




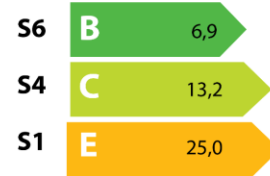
Annexe 40 : Consommations énergétiques résidentielles détaillées pour la forme architecturale bâtie 4

FORME 5 - PETIT COLLECTIF MITOYEN TISSU MIXTE ET DENSE

Batiment	
Volumétrie	R+3
Nombre de logements	<10
Hauteur totale (m)	12
Volum e (m ³)	840
Surface au sol (m ²)	70
Longueur (côté rue) (m)	10
Largeur (m)	7
Surface de l'enveloppe (m ²)	344
Compacité du bâti (surface de l'enveloppe / volume)	0,4
Taux de façade mitoyenne	41%
Surface passive (m ²)	30
Surface active (m ²)	40
Ratio su rface passive / surface active	0,75
Maille	
Densité de bâtiments	0,19
Nombre de batiment par maille	170

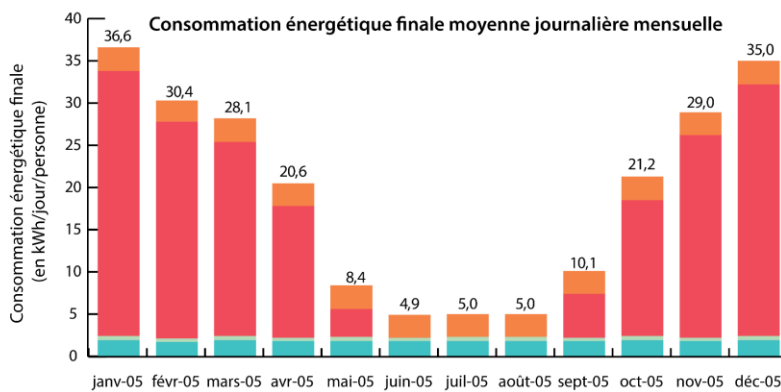


Consommations énergétiques individuelles résidentielles

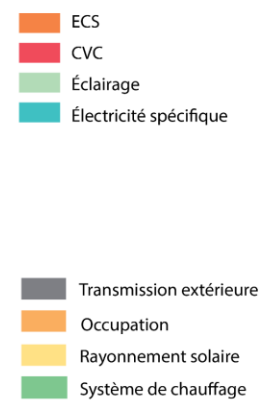
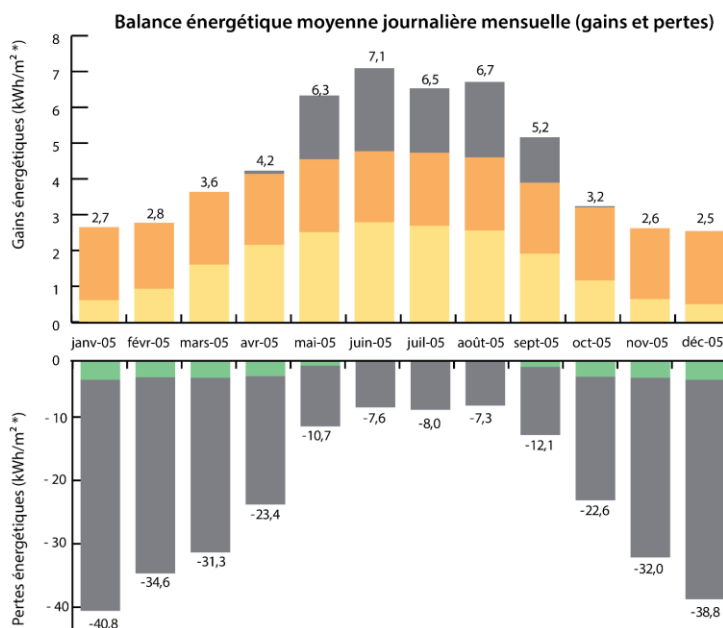
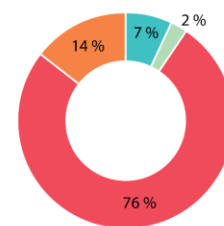


kWh/jour/personne

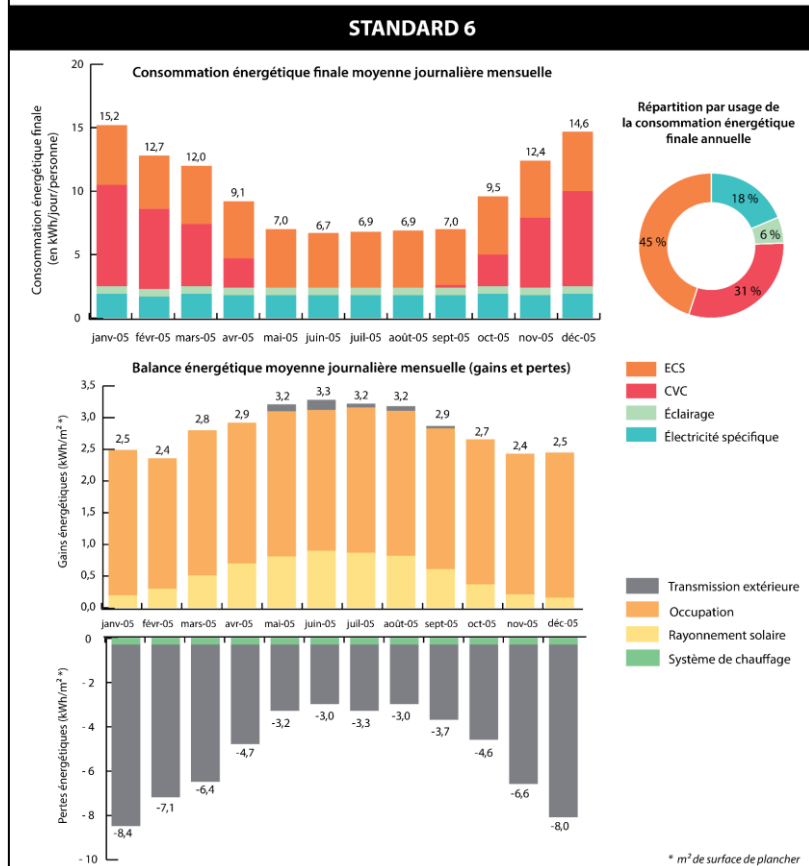
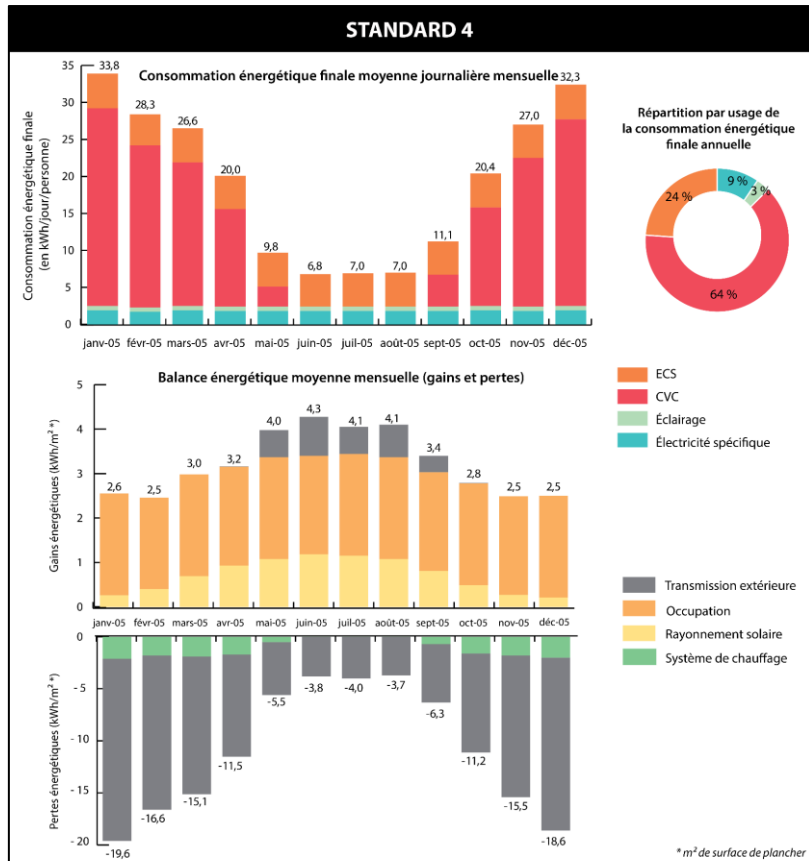
STANDARD 1



Répartition par usage de la consommation énergétique finale annuelle



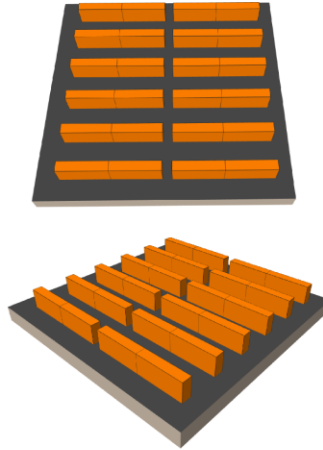
* m² de surface de plancher



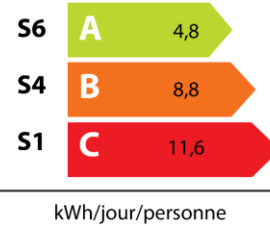
Annexe 41 : Consommations énergétiques résidentielles détaillées pour la forme architecturale bâtie 5

FORME 6 - GRAND COLLECTIF MITOYEN TISSU MIXTE ET DENSE

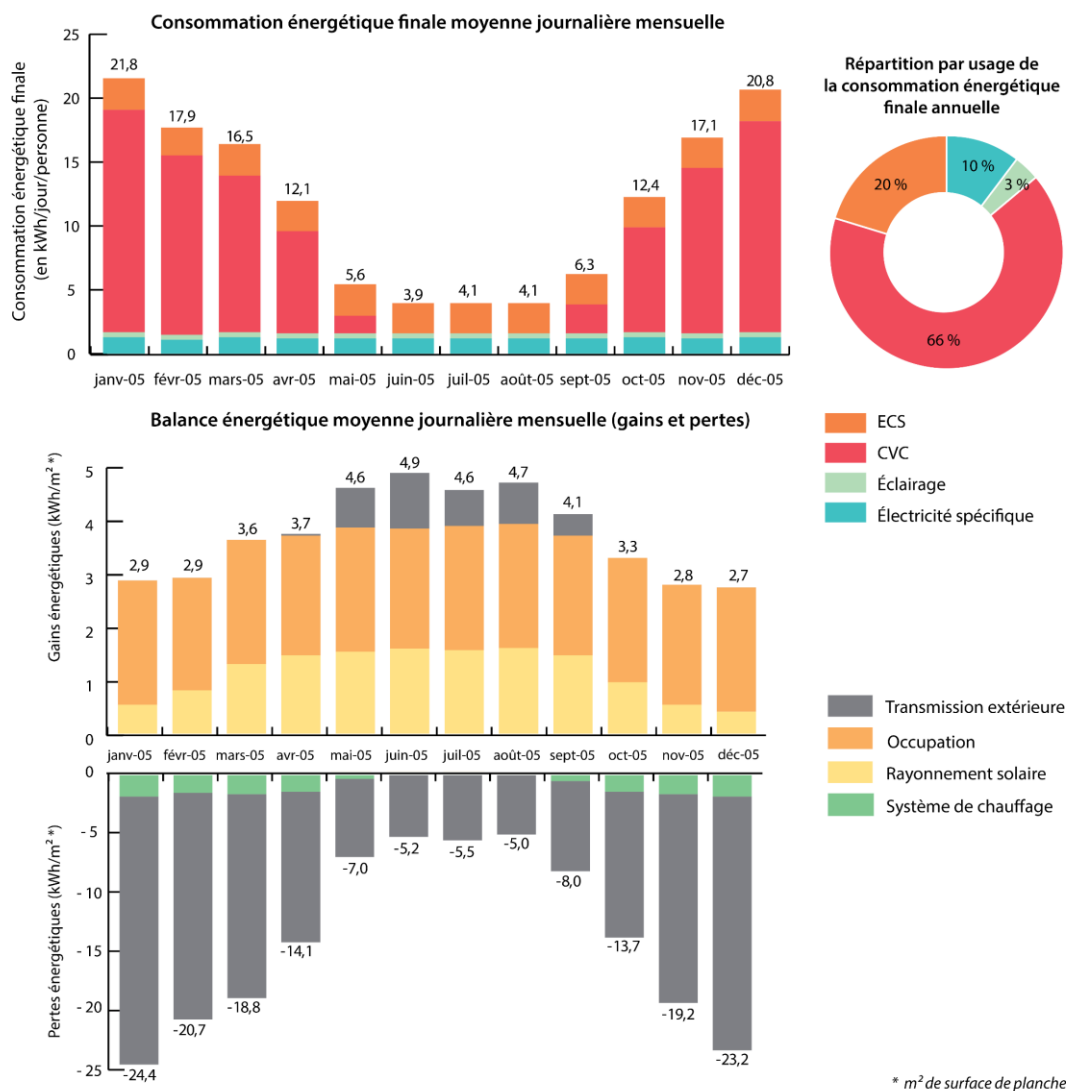
Batiment	
Volumétrie	R+6
Nombre de logements	> 10
Hauteur totale (m)	21
Volume (m ³)	10500
Surface au sol (m ²)	500
Longueur (côté rue) (m)	50
Largeur (m)	10
Surface de l'enveloppe (m ²)	2260
Compacité du bâti (surface de l'enveloppe / volume)	0,2
Taux de façade mitoyenne	8%
Surface passive (m ²)	108
Surface active (m ²)	392
Ratio surface passive / surface active	0,28
Maille	
Densité de bâtiments	0,19
Nombre de bâtiment par maille	24

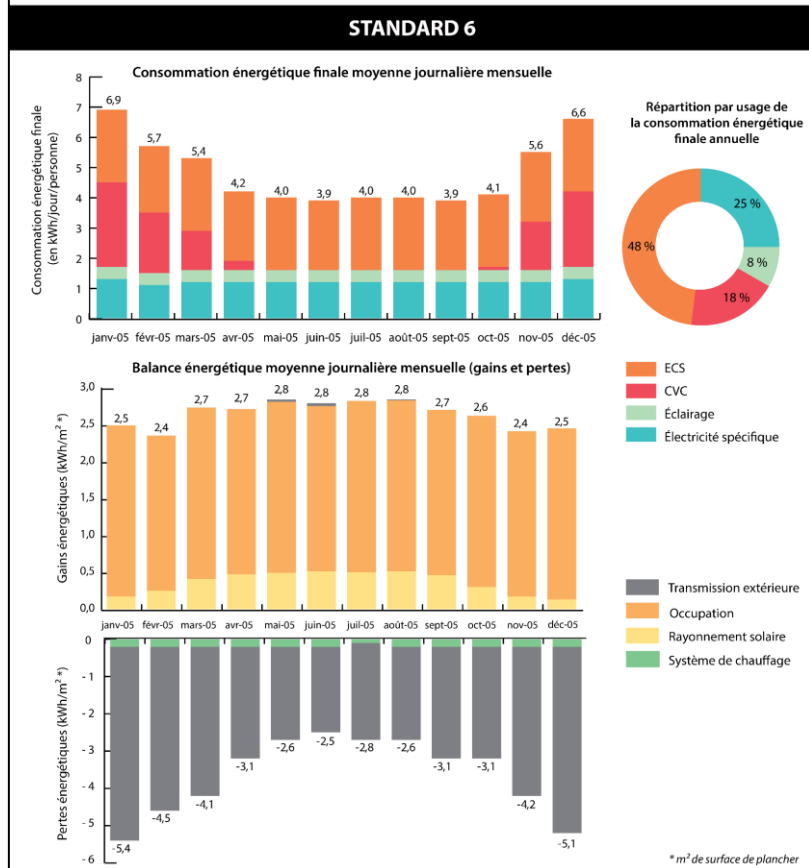
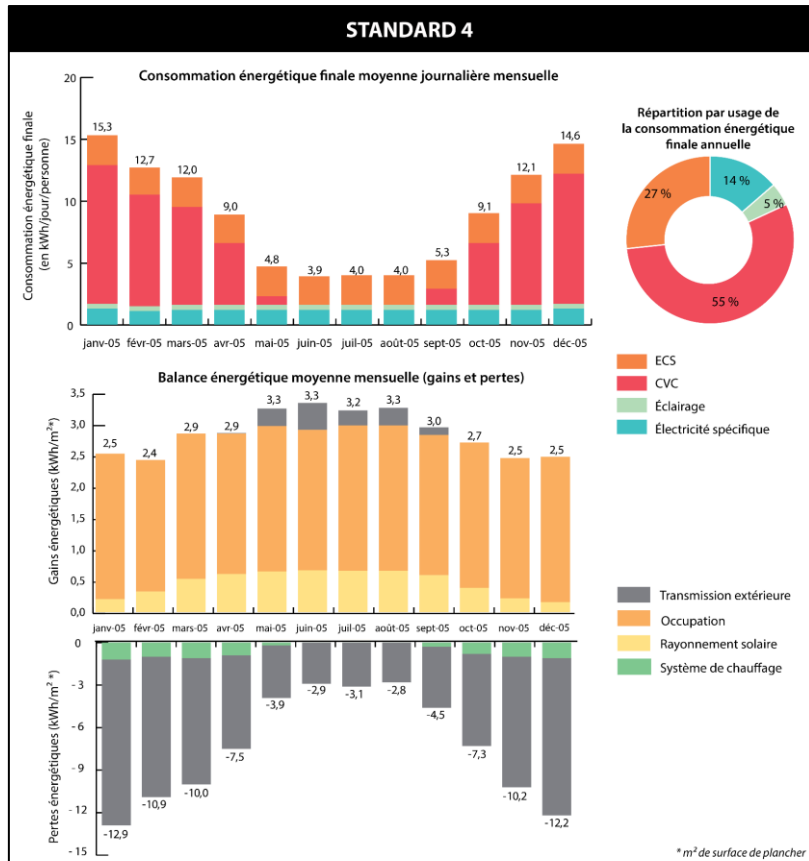


Consommations énergétiques individuelles résidentielles



STANDARD 1

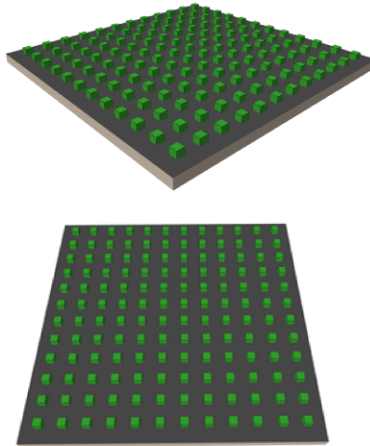




Annexe 42 : Consommations énergétiques résidentielles détaillées pour la forme architecturale bâtie 6

FORME 7 - MAISON INDIVIDUELLE MITOYENNE TISSU MIXTE ET DENSE

Batiment	
Volumétrie	R+1
Nombre de logements	1
Hauteur totale (m)	6
Volume (m ³)	294
Surface au sol (m ²)	49
Longueur (côté rue) (m)	7
Largeur (m)	7
Surface de l'enveloppe (m ²)	182
Compacité du bâti (surface de l'enveloppe / volume)	0,6
Taux de façade mitoyenne	0%
Surface passive (m ²)	24
Surface active (m ²)	25
Ratio surface passive / surface active	0,96
Maille	
Densité de bâtiments	0,10
Nombre de batiment par maille	128

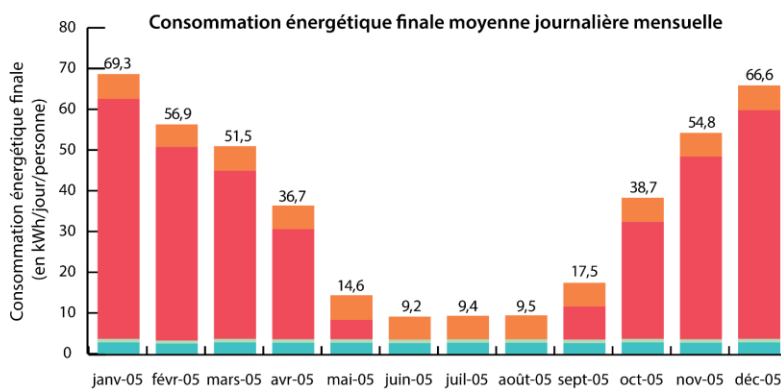


Consommations énergétiques individuelles résidentielles

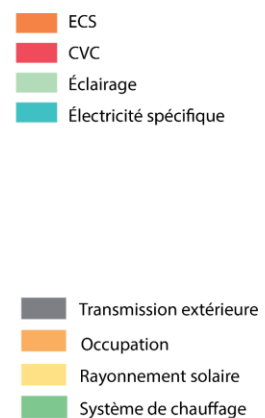
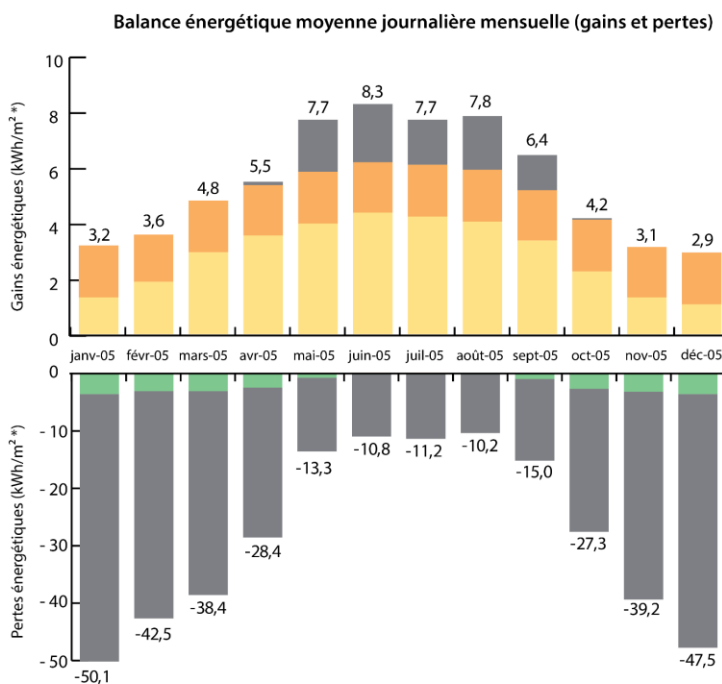
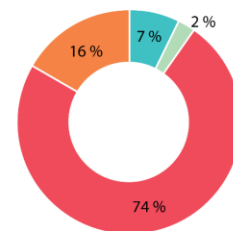


kWh/jour/personne

STANDARD 1

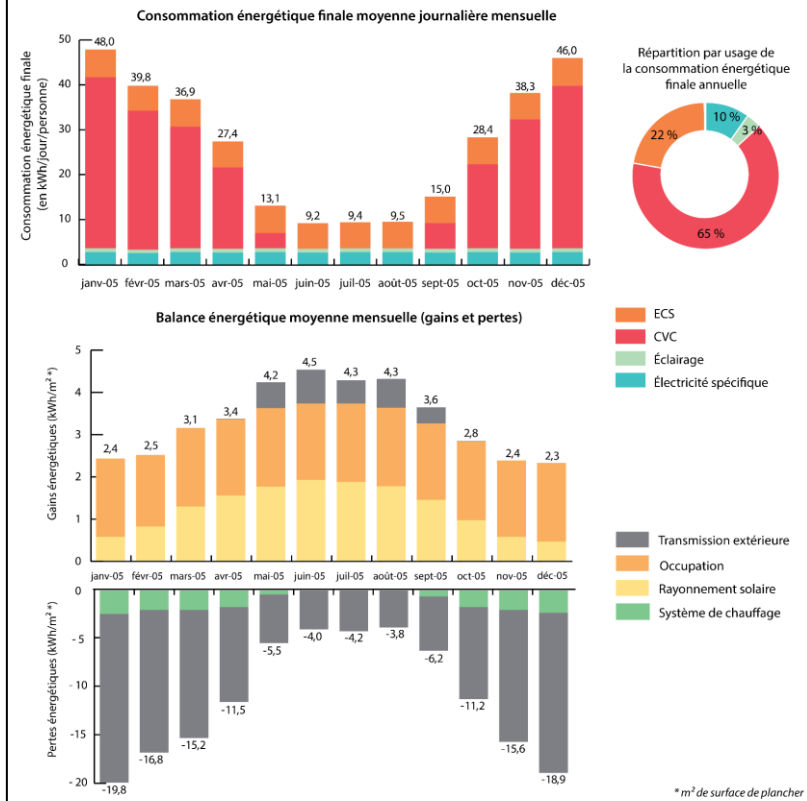


Répartition par usage de la consommation énergétique finale annuelle

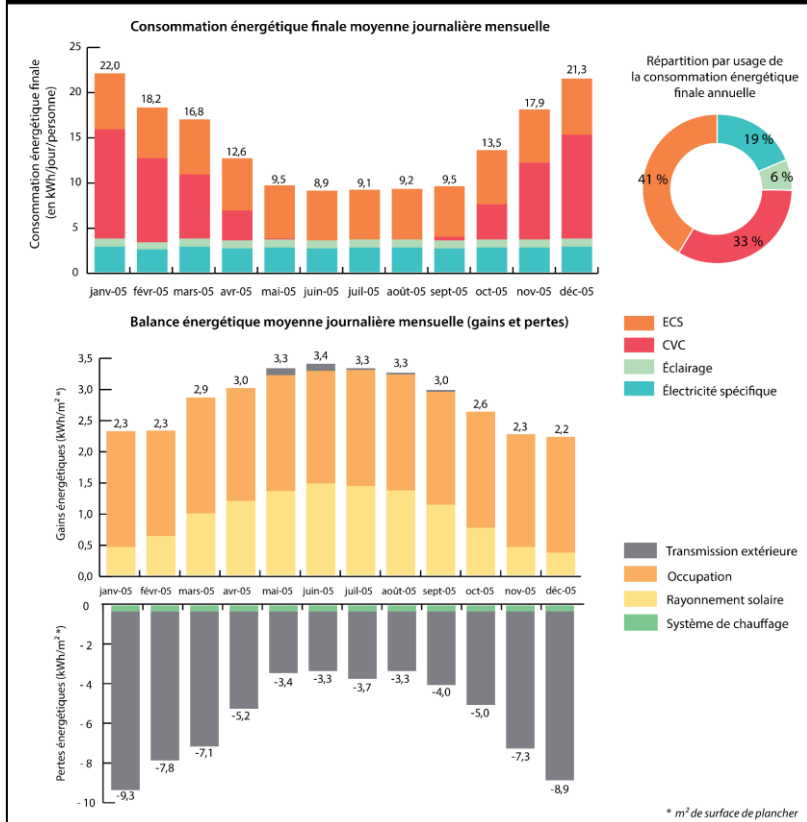


* m² de surface de plancher

STANDARD 4



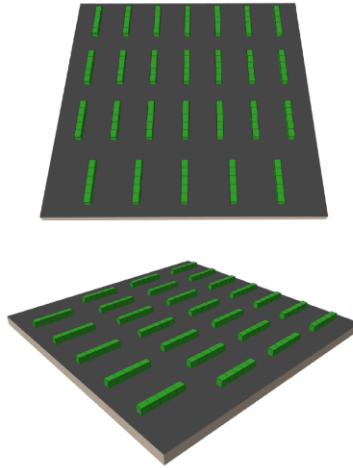
STANDARD 6



Annexe 43 : Consommations énergétiques résidentielles détaillées pour la forme architecturale bâtie 7

FORME 8 - MAISON INDIVIDUELLE MITOYENNE TISSU INDIVIDUEL DENSE

Batiment	
Volumétrie	R+1
Nombre de logements	1
Hauteur totale (m)	6
Volume (m ³)	288
Surface au sol (m ²)	48
Longueur (côté rue) (m)	8
Largeur (m)	6
Surface de l'enveloppe (m ²)	180
Compacité du bâti (surface de l'enveloppe / volume)	0,6
Taux de façade mitoyenne	43%
Surface passive (m ²)	20
Surface active (m ²)	28
Ratio surface passive / surface active	0,71
Maille	
Densité de bâtiments	0,10
Nombre de batiment par maille	130



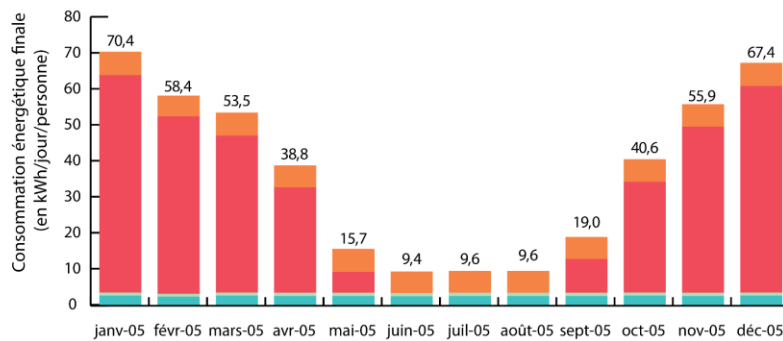
Consommations énergétiques individuelles résidentielles



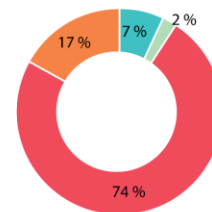
kWh/jour/personne

STANDARD 1

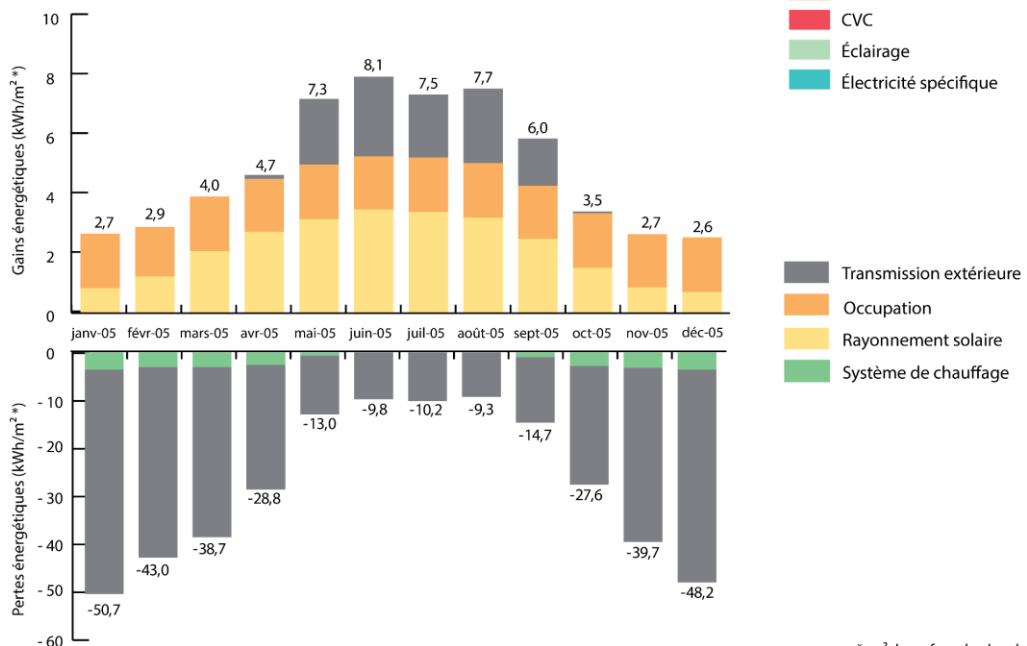
Consommation énergétique finale moyenne journalière mensuelle



Répartition par usage de la consommation énergétique finale annuelle

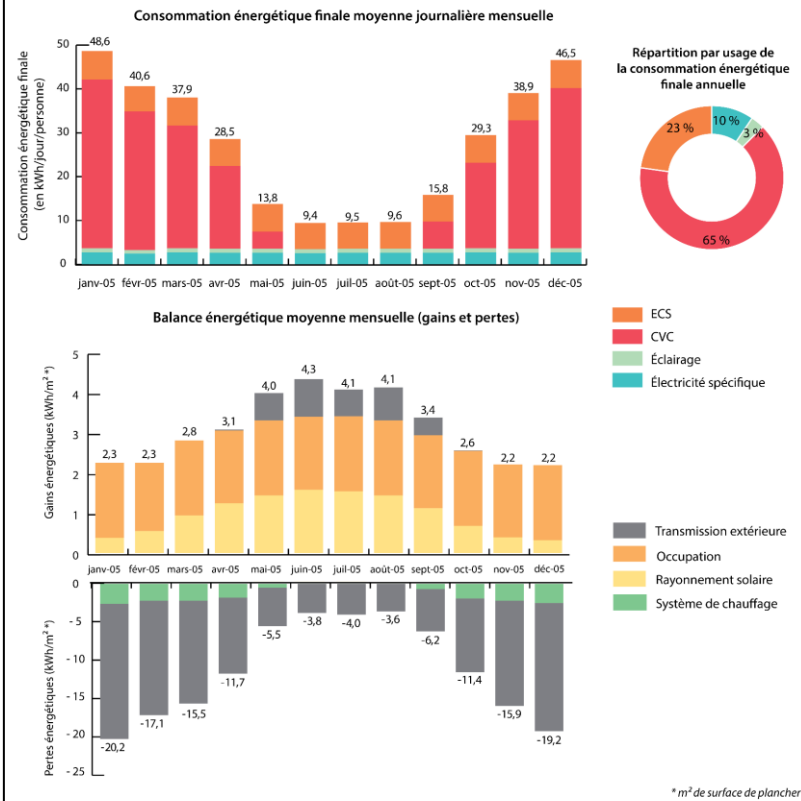


Balance énergétique moyenne journalière mensuelle (gains et pertes)

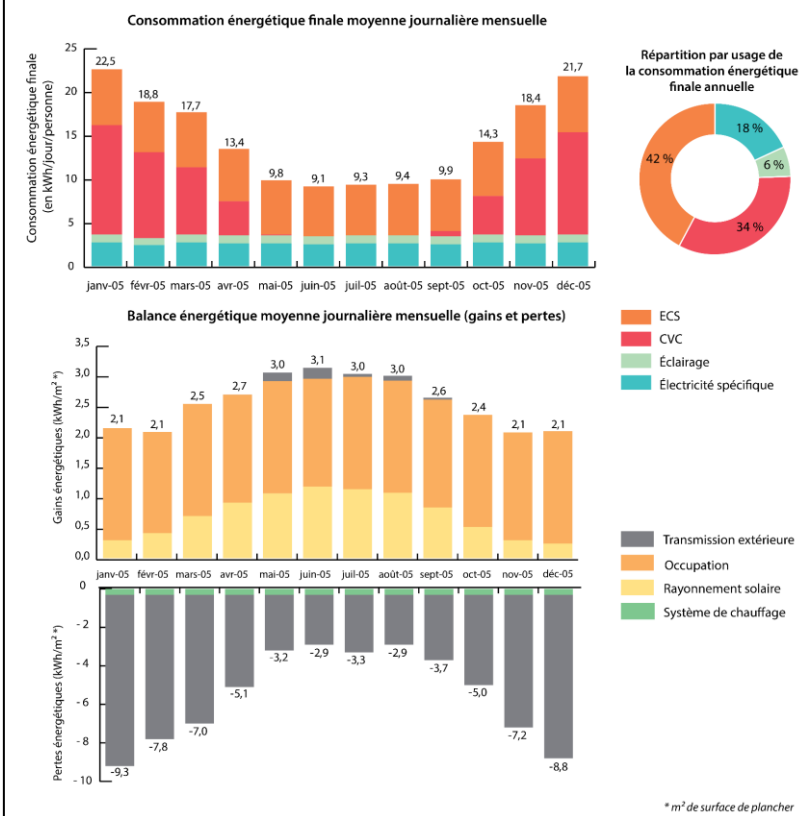


* m² de surface de plancher

STANDARD 4



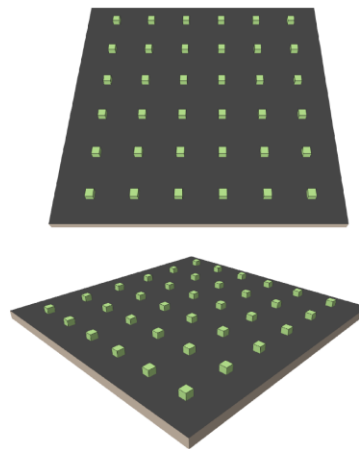
STANDARD 6



Annexe 44 : Consommations énergétiques résidentielles détaillées pour la forme architecturale bâtie 8

FORME 9 - MAISON INDIVIDUELLE DÉTACHÉE TISSU INDIVIDUEL PEU DENSE

Batiment	
Volumétrie	R+1
Nombre de logements	1
Hauteur totale (m)	6
Volume (m ³)	294
Surface au sol (m ²)	49
Longueur (côté rue) (m)	7
Largeur (m)	7
Surface de l'enveloppe (m ²)	182
Compacité du bâti (surface de l'enveloppe / volume)	0,6
Taux de façade mitoyenne	0%
Surface passive (m ²)	24
Surface active (m ²)	25
Ratio surface passive / surface active	0,96
Maille	
Densité de bâtiments	0,03
Nombre de batiment par maille	36

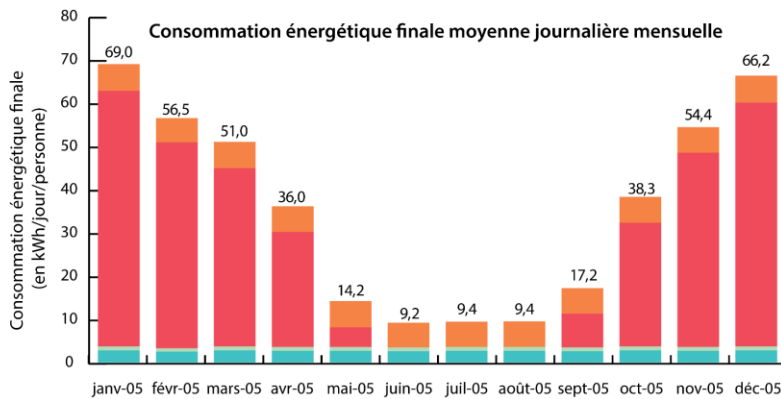


Consommations énergétiques individuelles résidentielles

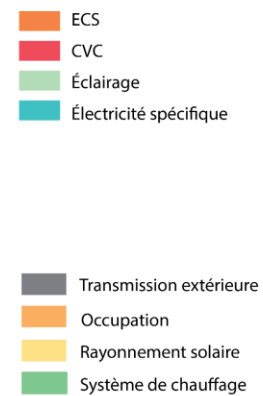
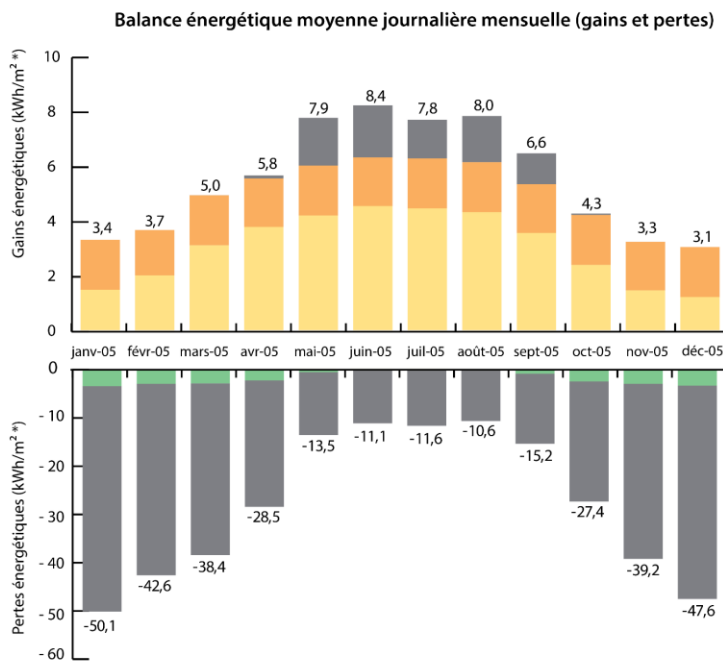
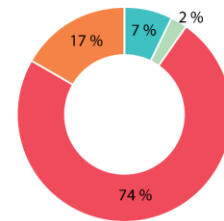


kWh/jour/personne

STANDARD 1

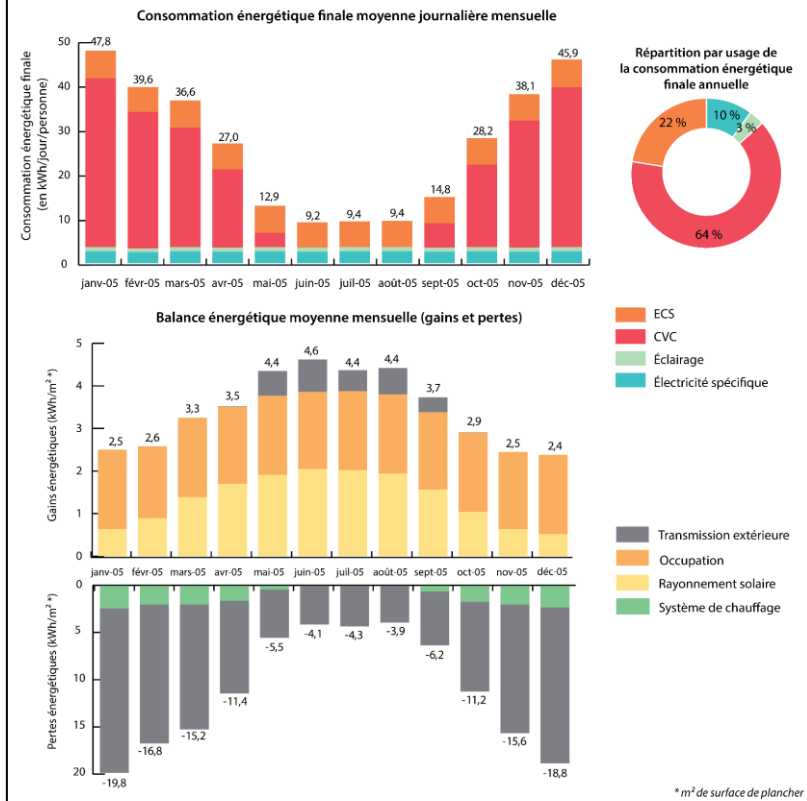


Répartition par usage de la consommation énergétique finale annuelle

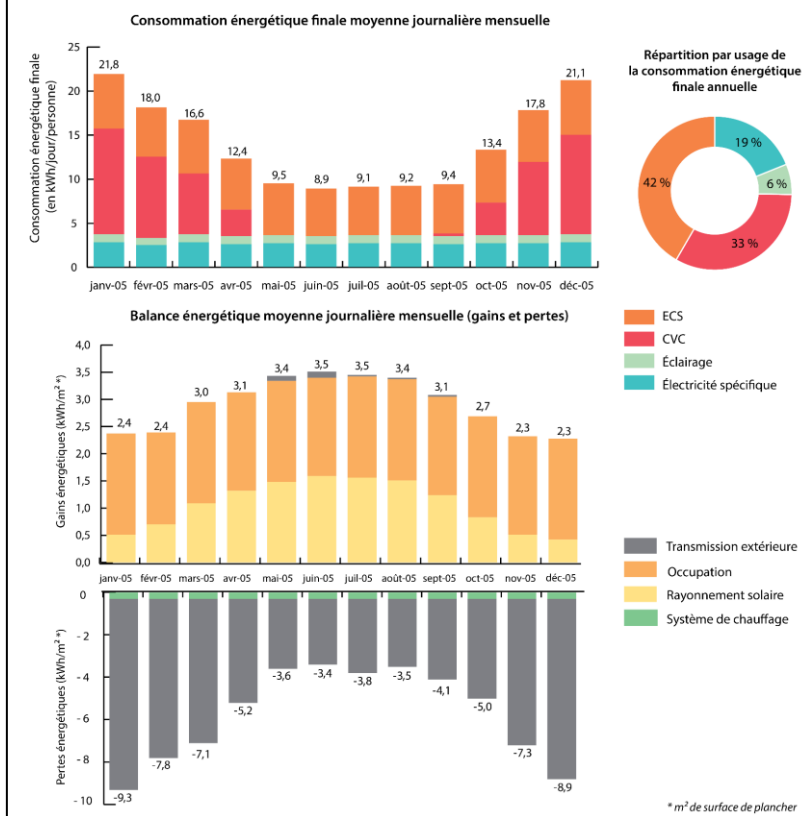


* m² de surface de plancher

STANDARD 4



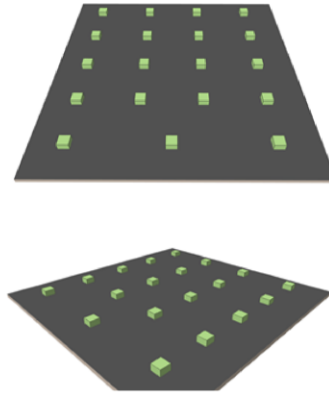
STANDARD 6



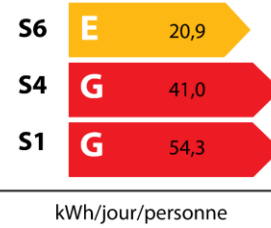
Annexe 45 : Consommations énergétiques résidentielles détaillées pour la forme architecturale bâtie 9

FORME 10 - VILLA ISOLÉE TISSU INDIVIDUEL PEU DENSE

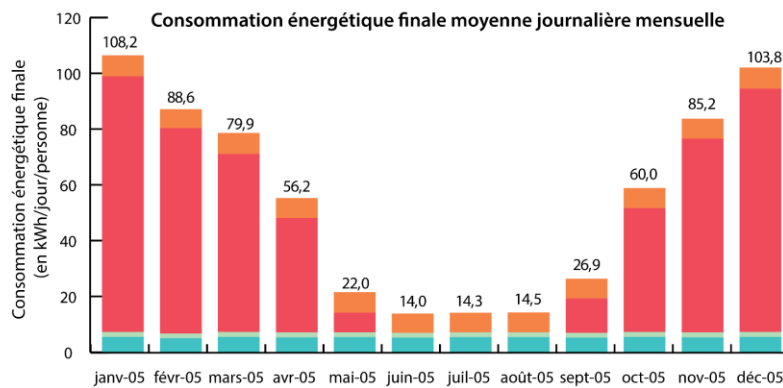
Batiment	
Volumétrie	R+1
Nombre de logements	1
Hauteur totale (m)	6
Volume (m ³)	600
Surface au sol (m ²)	100
Longueur (côté rue) (m)	10
Largeur (m)	10
Surface de l'enveloppe (m ²)	320
Compacité du bâti (surface de l'enveloppe / volume)	0,5
Taux de façade mitoyenne	0%
Surface passive (m ²)	36
Surface active (m ²)	64
Ratio surface passive / surface active	0,56
Maille	
Densité de bâtiments	0,03
Nombre de batiment par maille	19



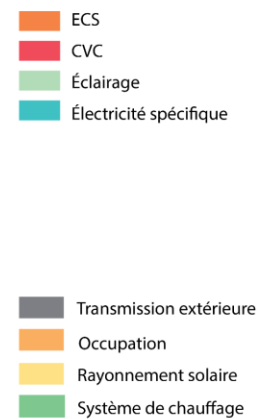
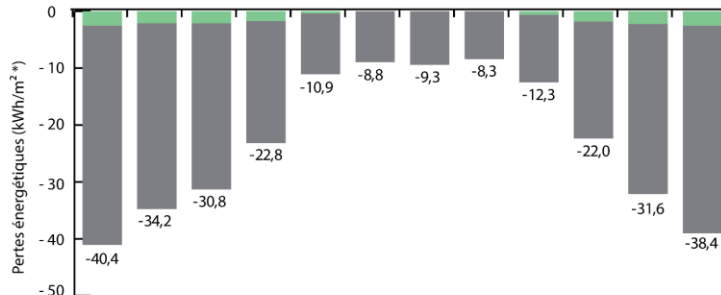
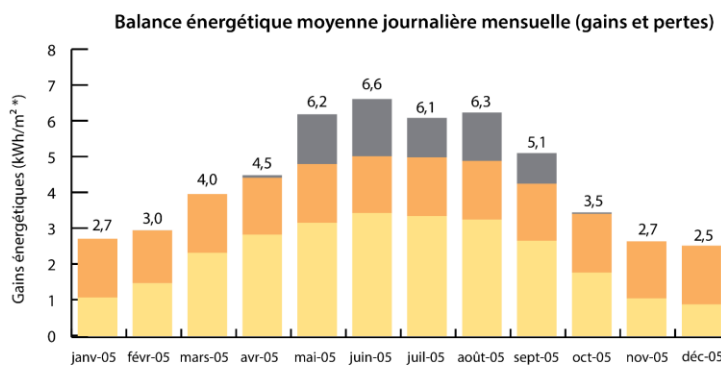
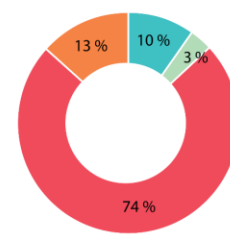
Consommations énergétiques individuelles résidentielles



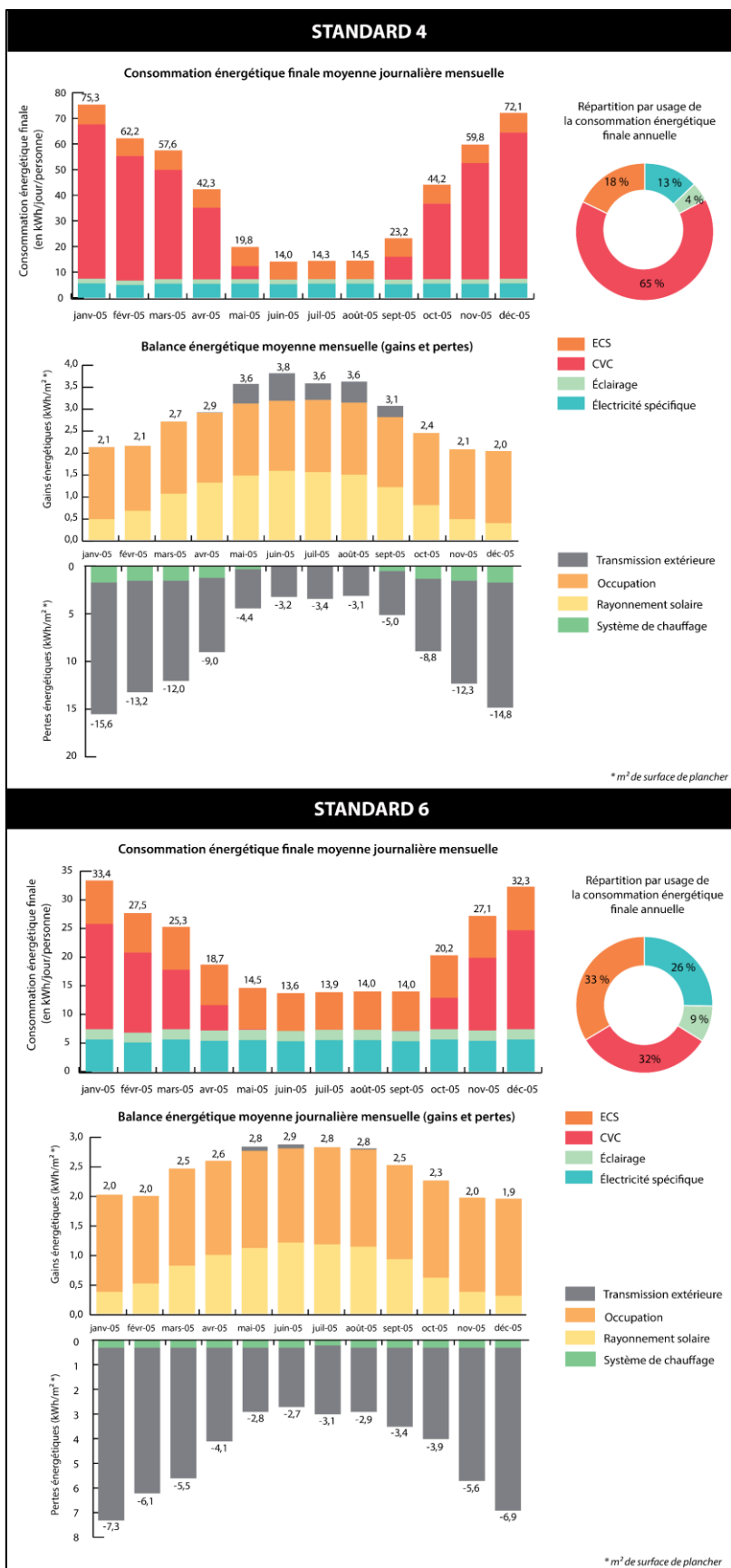
STANDARD 1



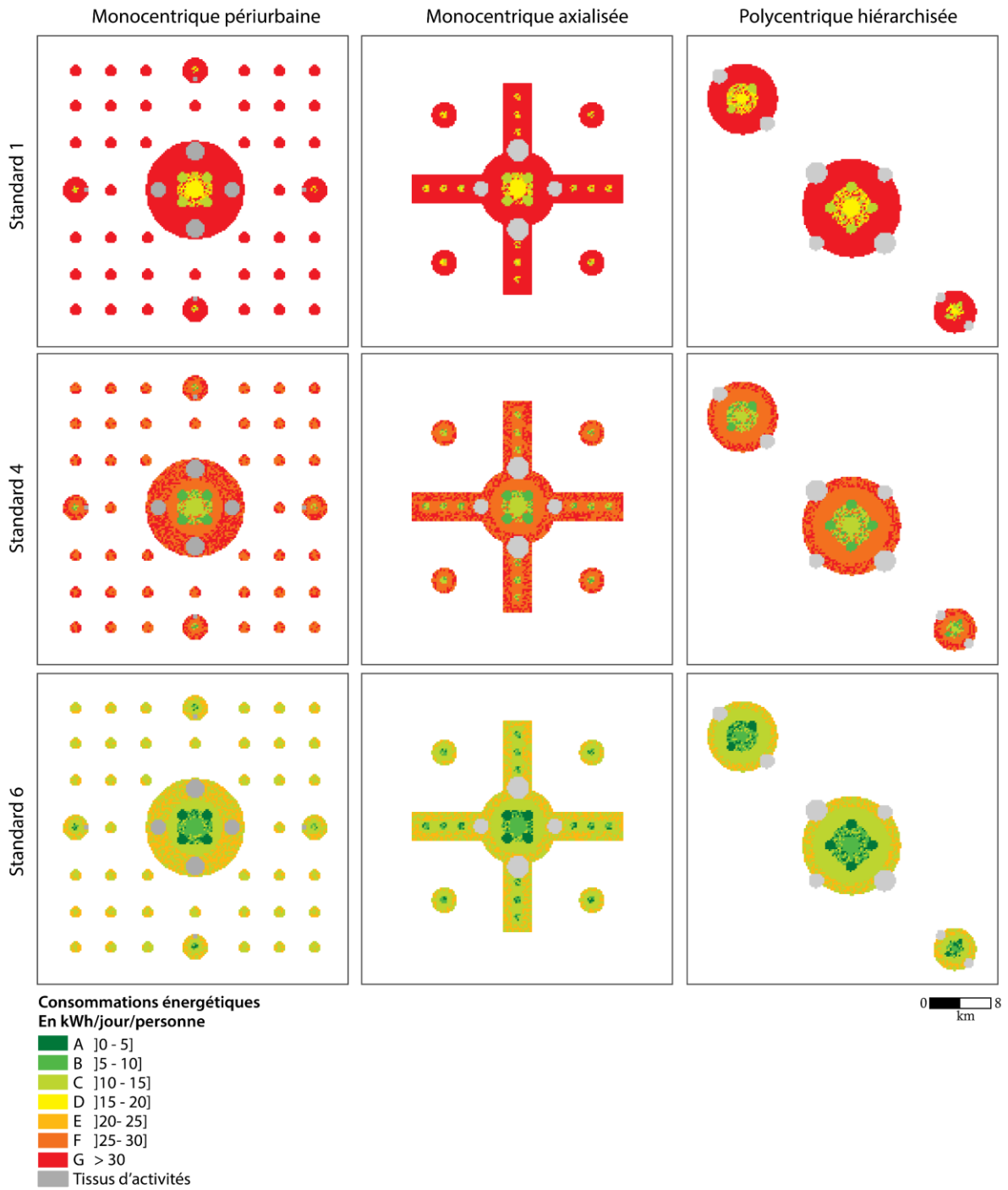
Répartition par usage de la consommation énergétique finale annuelle



* m² de surface de plancher



Annexe 46 : Consommations énergétiques résidentielles détaillées pour la forme architecturale bâtie 10



Annexe 47 : Cartographie des consommations énergétiques résidentielles par habitant dans les trois villes archétypales en fonction des standards de construction

	Scolaire			Etudiant			Retraité			Inactif			Artisan			Cadre			Prof. inter.			Employés			Ouvriers				
Centre urbain	15,9	16,0	16,0	18,4	18,9	19,0	18,3	18,5	18,5	19,3	19,7	19,6	24,0	25,0	26,2	24,7	26,3	29,2	24,9	26,4	28,8	22,5	23,2	23,9	24,9	26,4	29,1	Standard 1 Maximale	
Mixte et dense	23,8	22,8	23,0	27,8	28,8	26,6	27,4	27,8	26,6	29,3	30,3	28,2	39,6	45,1	35,8	40,2	45,9	38,0	40,4	46,2	37,8	36,4	40,5	32,9	39,9	45,4	37,9		
Collectif haut discontinu	12,2	12,2	12,3	15,8	16,1	16,3	16,3	16,5	16,5	17,8	18,1	18,3	23,6	24,6	26,4	23,8	25,1	28,2	24,1	25,4	28,2	21,7	22,3	23,4	23,9	25,2	28,1		
Individuel dense	38,0	37,1	37,3	46,3	44,0	42,7	46,3	43,6	43,3	50,1	46,2	45,3	69,0	62,2	56,0	67,4	62,2	56,6	68,2	62,6	56,8	62,9	56,9	51,9	66,8	61,7	56,4		
Individuel peu dense	47,5	46,1	46,3	57,7	54,5	53,5	58,2	54,5	54,2	63,0	58,2	57,4	83,3	75,4	70,5	80,7	74,4	70,2	81,7	75,0	70,6	76,5	69,5	65,4	80,2	74,0	70,0		
Centre urbain	15,6	15,6	15,6	16,7	16,9	16,9	17,0	17,2	17,1	17,6	17,8	17,8	20,4	21,0	21,7	20,7	21,6	23,3	20,8	21,7	23,1	19,4	19,8	20,2	20,9	21,7	23,3	Standard 1 Intermédiaire	
Mixte et dense	23,3	22,2	22,4	25,1	24,9	24,1	25,6	25,3	24,7	26,5	26,6	25,5	32,7	35,4	30,1	32,9	35,7	31,2	33,0	35,8	31,1	30,6	32,4	28,2	32,8	35,5	31,2		
Collectif haut discontinu	11,5	11,5	11,6	13,2	13,4	13,5	14,2	14,3	14,3	14,9	15,1	15,2	18,5	19,0	20,1	18,4	19,2	21,0	18,7	19,4	21,0	17,1	17,5	18,1	18,5	19,3	20,9		
Individuel dense	36,7	36,4	36,4	40,6	39,5	39,0	41,9	40,3	40,2	43,9	41,7	41,2	55,2	51,2	47,7	54,1	51,0	47,8	54,5	51,3	48,0	51,2	47,8	45,0	53,8	50,8	47,8		
Individuel peu dense	45,6	44,9	45,0	50,5	48,8	48,4	52,5	50,2	50,0	55,0	52,1	51,6	67,2	62,5	59,6	65,4	61,6	59,2	66,0	62,0	59,5	62,7	58,6	56,2	65,2	61,4	59,2		
Centre urbain	15,5	15,5	15,5	16,2	16,3	16,3	16,4	16,5	16,5	16,7	16,8	16,8	18,4	18,7	19,2	18,6	19,2	20,2	18,7	19,2	20,0	17,8	18,0	18,3	18,7	19,2	20,1	Standard 1 Minimale	
Mixte et dense	23,2	22,1	22,3	24,3	23,7	23,3	24,6	24,0	23,7	25,2	24,7	24,2	28,9	30,1	26,9	29,0	30,2	27,6	29,1	30,3	27,5	27,6	28,2	25,8	28,9	30,1	27,6		
Collectif haut discontinu	11,4	11,4	11,4	12,4	12,5	12,6	13,0	13,1	13,1	13,5	13,6	13,6	15,6	15,9	16,6	15,6	16,1	17,1	15,7	16,2	17,1	14,8	15,0	15,4	15,6	16,1	17,1		
Individuel dense	36,5	36,3	36,3	38,8	38,1	37,8	39,6	38,6	38,6	40,8	39,4	39,2	47,6	45,2	43,1	46,9	45,0	43,1	47,2	45,2	43,2	45,2	43,1	41,4	46,7	44,9	43,1		
Individuel peu dense	45,3	44,7	44,7	48,2	47,0	46,8	49,4	47,9	47,8	50,9	49,0	48,8	58,3	55,2	53,5	57,2	54,7	53,3	57,6	55,0	53,5	55,6	52,9	51,5	57,1	54,6	53,3		
	Monocentrique périurbaine	Monocentrique axialisée	Polycentrique hiérarchisée	Monocentrique périurbaine	Monocentrique axialisée	Polycentrique hiérarchisée	Monocentrique périurbaine	Monocentrique axialisée	Polycentrique hiérarchisée	Monocentrique périurbaine	Monocentrique axialisée	Polycentrique hiérarchisée	Monocentrique périurbaine	Monocentrique axialisée	Polycentrique hiérarchisée	Monocentrique périurbaine	Monocentrique axialisée	Polycentrique hiérarchisée	Monocentrique périurbaine	Monocentrique axialisée	Polycentrique hiérarchisée	Monocentrique périurbaine	Monocentrique axialisée	Polycentrique hiérarchisée	Monocentrique périurbaine	Monocentrique axialisée	Polycentrique hiérarchisée		

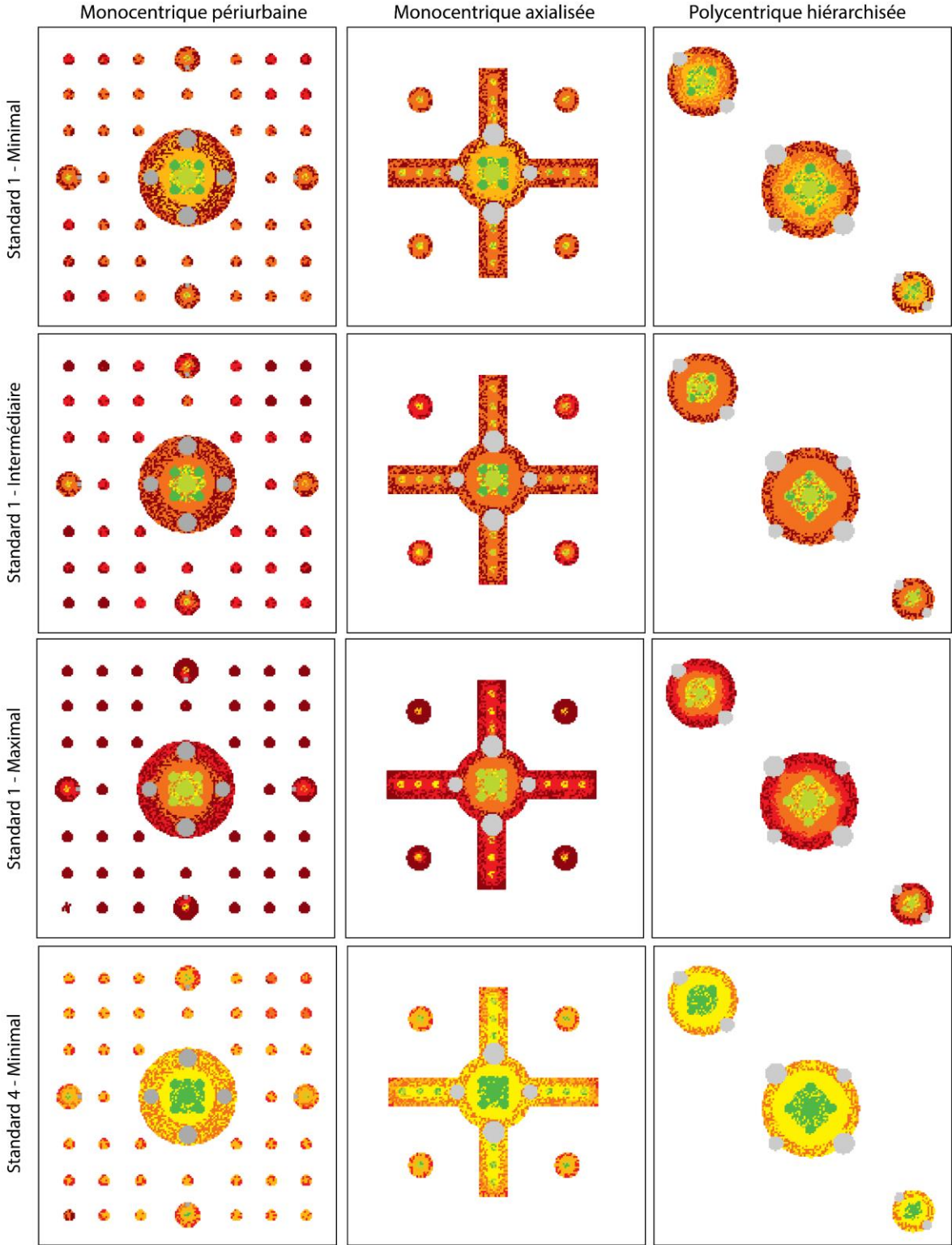
Annexe 48 : Consommation énergétique totale par habitant en fonction du tissu urbain, de la structure urbaine et de la catégorie d'individu (en kWh/jour/personne) – Croisements 1, 4 et 7

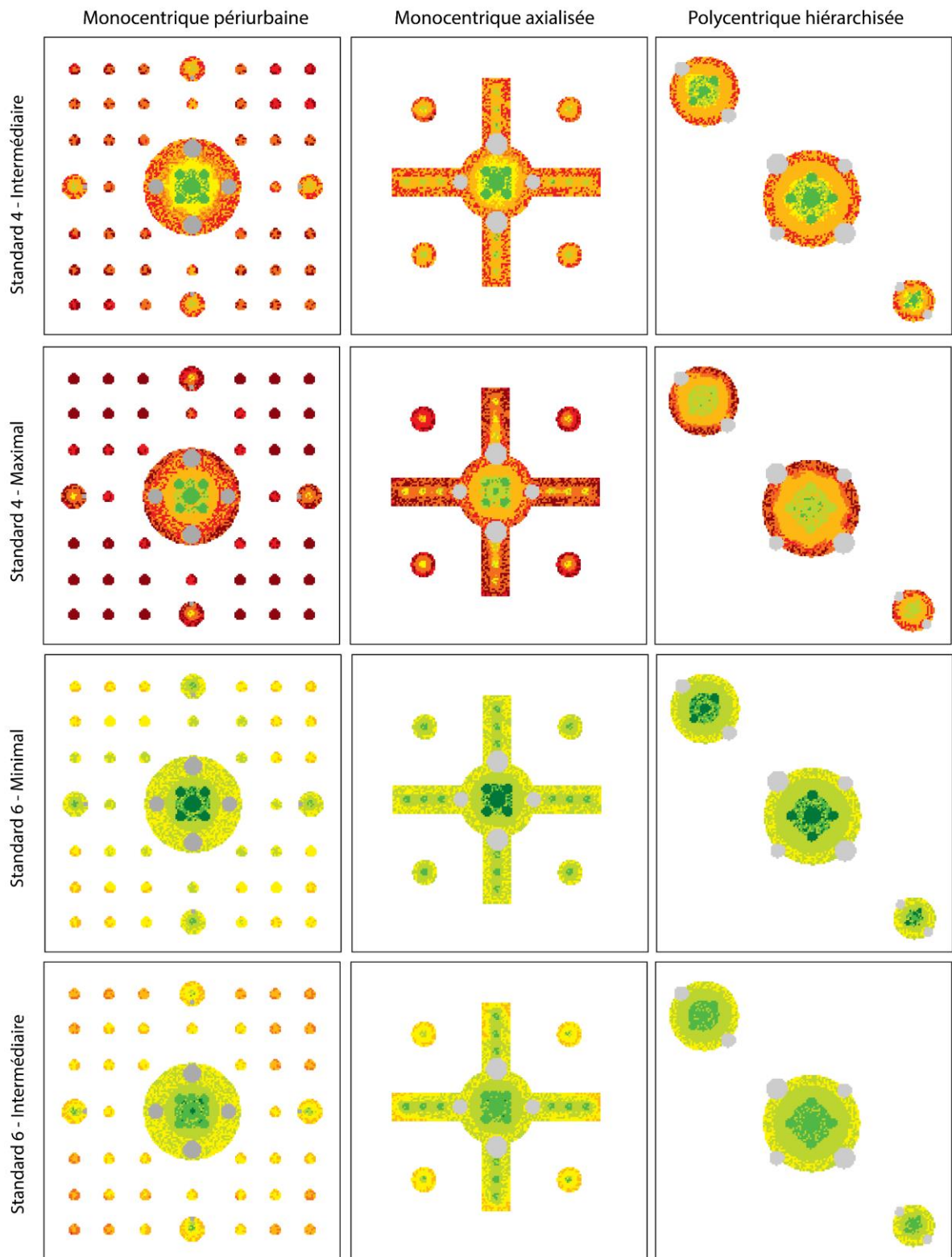
		Scolaire			Etudiant			Retraité			Inactif			Artisan			Cadre			Prof. inter.			Employés			Ouvriers			
Standard 4 Maximale	Centre urbain	10,9	11,0	11,0	13,4	13,9	14,0	13,2	13,5	13,4	14,3	14,6	14,6	19,0	19,9	21,2	19,7	21,3	24,2	19,8	21,3	23,8	17,4	18,2	18,8	19,9	21,4	24,1	
	Mixte et dense	16,5	15,6	15,9	20,4	21,5	19,6	20,1	20,6	19,6	21,9	23,0	21,2	32,2	37,9	28,8	32,8	38,7	31,0	33,0	38,9	30,8	29,0	33,2	25,9	32,5	38,2	30,8	
	Collectif haut discontinu	9,0	9,0	9,0	12,6	12,9	13,1	13,1	13,3	13,3	14,6	14,9	15,1	20,4	21,4	23,2	20,6	21,9	25,0	20,9	22,2	25,0	18,4	19,1	20,2	20,7	22,0	24,8	
	Individuel dense	28,5	27,7	27,8	36,8	34,5	33,2	36,8	34,1	33,9	40,6	36,7	35,8	59,4	52,7	46,5	57,9	52,7	47,1	58,7	53,1	47,3	53,3	47,4	42,4	57,3	52,2	46,9	
	Individuel peu dense	36,2	34,9	35,1	46,4	43,3	42,3	46,9	43,4	43,0	51,7	47,1	46,2	72,0	64,3	59,3	69,4	63,2	59,0	70,4	63,8	59,4	65,2	58,3	54,2	68,9	62,8	58,8	
Standard 4 Intermédiaire	Centre urbain	10,5	10,5	10,5	11,7	11,8	11,9	12,0	12,2	12,1	12,5	12,7	12,7	15,4	15,9	16,6	15,7	16,6	18,3	15,8	16,6	18,1	14,3	14,8	15,1	15,8	16,7	18,3	
	Mixte et dense	15,9	15,0	15,3	17,8	17,6	17,0	18,2	18,0	17,6	19,2	19,3	18,5	25,3	28,2	23,1	25,5	28,4	24,2	25,6	28,6	24,1	23,2	25,2	21,2	25,4	28,2	24,2	
	Collectif haut discontinu	8,3	8,3	8,3	10,0	10,2	10,2	10,9	11,0	11,1	11,7	11,9	12,0	15,2	15,8	16,9	15,2	16,0	17,8	15,4	16,2	17,8	13,9	14,3	14,9	15,3	16,1	17,7	
	Individuel dense	27,2	26,9	26,9	31,1	30,0	29,5	32,4	30,8	30,7	34,4	32,2	31,7	45,7	41,8	38,2	44,5	41,5	38,3	45,0	41,8	38,5	41,7	38,3	35,5	44,3	41,3	38,3	
	Individuel peu dense	34,3	33,7	33,8	39,2	37,7	37,2	41,2	39,0	38,8	43,7	40,9	40,5	55,9	51,3	48,4	54,1	50,4	48,0	54,8	50,8	48,3	51,5	47,4	45,1	54,0	50,3	48,0	
Standard 4 Minimale	Centre urbain	10,5	10,5	10,5	11,1	11,2	11,3	11,4	11,4	11,4	11,7	11,8	11,8	13,4	13,7	14,1	13,6	14,1	15,1	13,6	14,1	15,0	12,8	13,0	13,2	13,7	14,2	15,1	
	Mixte et dense	15,9	14,9	15,2	16,9	16,4	16,2	17,2	16,7	16,6	17,8	17,5	17,1	21,5	22,8	19,9	21,6	23,0	20,6	21,7	23,1	20,5	20,2	21,0	18,7	21,5	22,8	20,5	
	Collectif haut discontinu	8,2	8,2	8,2	9,2	9,3	9,4	9,8	9,9	9,9	10,3	10,4	10,4	12,4	12,7	13,4	12,4	12,8	13,9	12,5	12,9	13,9	11,6	11,8	12,2	12,4	12,9	13,9	
	Individuel dense	26,9	26,8	26,8	29,2	28,6	28,3	30,1	29,2	29,1	31,3	30,0	29,7	38,1	35,7	33,6	37,4	35,6	33,7	37,7	35,7	33,7	35,7	33,6	31,9	37,2	35,5	33,6	
	Individuel peu dense	34,0	33,5	33,6	36,9	35,8	35,6	38,2	36,7	36,6	39,7	37,8	37,6	47,0	44,1	42,3	45,9	43,5	42,1	46,3	43,8	42,3	44,3	41,7	40,3	45,8	43,5	42,1	
		Monocentrique périurbaine	Monocentrique axialisée	Polycentrique hiérarchisée	Monocentrique périurbaine	Monocentrique axialisée	Polycentrique hiérarchisée	Monocentrique périurbaine	Monocentrique axialisée	Polycentrique hiérarchisée	Monocentrique périurbaine	Monocentrique axialisée	Polycentrique hiérarchisée	Monocentrique périurbaine	Monocentrique axialisée	Polycentrique hiérarchisée	Monocentrique périurbaine	Monocentrique axialisée	Polycentrique hiérarchisée	Monocentrique périurbaine	Monocentrique axialisée	Polycentrique hiérarchisée	Monocentrique périurbaine	Monocentrique axialisée	Polycentrique hiérarchisée	Monocentrique périurbaine	Monocentrique axialisée	Polycentrique hiérarchisée	

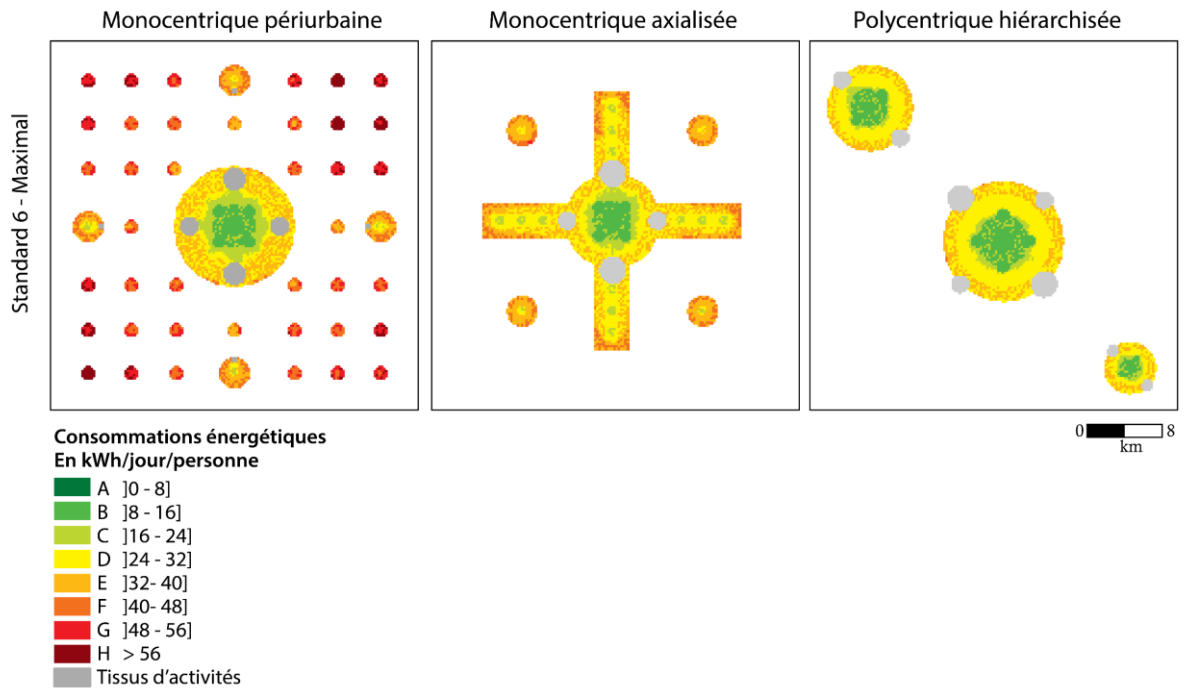
Annexe 49 : Consommation énergétique totale par habitant en fonction du tissu urbain, de la structure urbaine et de la catégorie d'individu (en kWh/jour/personne) – Croisements 2, 5 et 8

	Scolaire			Etudiant			Retraité			Inactif			Artisan			Cadre			Prof. inter.			Employés			Ouvriers			
Centre urbain	5,9	6,0	6,0	8,4	8,9	9,0	8,2	8,5	8,5	9,3	9,7	9,6	14,0	15,0	16,2	14,7	16,3	19,2	14,9	16,3	18,8	12,4	13,2	13,8	14,9	16,4	19,1	Standard 6 Maximale
Mixte et dense	9,1	8,7	8,9	13,1	14,6	12,5	12,7	13,6	12,5	14,5	16,1	14,1	24,8	31,0	21,7	25,4	31,7	23,9	25,6	32,0	23,7	21,6	26,3	18,8	25,2	31,2	23,8	
Collectif haut discontinu	5,4	5,4	5,4	9,0	9,3	9,5	9,5	9,7	9,7	11,0	11,3	11,5	16,8	17,8	19,6	16,9	18,3	21,4	17,3	18,6	21,4	14,8	15,5	16,6	17,0	18,4	21,2	
Individuel dense	15,9	15,1	15,2	24,2	21,9	20,6	24,2	21,5	21,2	27,9	24,1	23,2	46,8	40,1	33,9	45,3	40,1	34,5	46,1	40,5	34,7	40,7	34,8	29,8	44,7	39,6	34,3	
Individuel peu dense	19,9	18,8	19,0	30,1	27,2	26,2	30,6	27,3	26,9	35,4	31,0	30,1	55,7	48,2	43,2	53,1	47,1	42,9	54,1	47,7	43,3	48,9	42,2	38,1	52,6	46,7	42,7	
Centre urbain	5,5	5,6	5,6	6,7	6,9	6,9	7,0	7,2	7,1	7,6	7,8	7,7	10,4	11,0	11,7	10,7	11,6	13,3	10,8	11,7	13,1	9,4	9,8	10,2	10,9	11,7	13,3	Standard 6 Intermédiaire
Mixte et dense	8,5	8,0	8,2	10,4	10,7	9,9	10,8	11,1	10,5	11,8	12,4	11,4	17,9	21,3	16,0	18,1	21,5	17,1	18,2	21,7	17,0	15,8	18,2	14,1	18,0	21,3	17,1	
Collectif haut discontinu	4,7	4,7	4,7	6,4	6,6	6,6	7,3	7,4	7,4	8,1	8,3	8,4	11,6	12,2	13,3	11,6	12,4	14,2	11,8	12,6	14,2	10,3	10,7	11,3	11,7	12,5	14,1	
Individuel dense	14,5	14,3	14,3	18,4	17,4	16,9	19,8	18,2	18,1	21,8	19,6	19,1	33,1	29,2	25,6	31,9	28,9	25,7	32,4	29,2	25,9	29,1	25,7	22,9	31,7	28,7	25,7	
Individuel peu dense	18,0	17,6	17,7	22,9	21,6	21,1	24,9	22,9	22,7	27,4	24,8	24,3	39,6	35,2	32,3	37,8	34,3	31,9	38,5	34,7	32,2	35,2	31,3	28,9	37,7	34,2	31,9	
Centre urbain	5,5	5,5	5,5	6,2	6,3	6,3	6,4	6,5	6,4	6,7	6,8	6,8	8,4	8,7	9,2	8,6	9,1	10,2	8,7	9,2	10,0	7,8	8,0	8,3	8,7	9,2	10,1	Standard 6 Minimale
Mixte et dense	8,5	8,0	8,1	9,5	9,5	9,1	9,8	9,8	9,5	10,4	10,6	10,0	14,1	15,9	12,8	14,2	16,0	13,5	14,3	16,1	13,4	12,8	14,1	11,6	14,1	15,9	13,4	
Collectif haut discontinu	4,6	4,6	4,6	5,6	5,7	5,7	6,2	6,3	6,3	6,7	6,7	6,8	8,8	9,1	9,7	8,8	9,2	10,3	8,9	9,3	10,3	8,0	8,2	8,6	8,8	9,3	10,3	
Individuel dense	14,3	14,2	14,2	16,6	16,0	15,7	17,5	16,6	16,5	18,7	17,4	17,1	25,5	23,1	21,0	24,8	23,0	21,1	25,0	23,1	21,1	23,1	21,0	19,3	24,6	22,8	21,0	
Individuel peu dense	17,7	17,4	17,4	20,6	19,7	19,5	21,9	20,6	20,5	23,4	21,7	21,5	30,7	28,0	26,2	29,6	27,4	26,0	30,0	27,7	26,2	28,0	25,6	24,2	29,5	27,4	26,0	
	Monocentrique périurbaine	Monocentrique axialisée	Polycentrique hiérarchisée	Monocentrique périurbaine	Monocentrique axialisée	Polycentrique hiérarchisée	Monocentrique périurbaine	Monocentrique axialisée	Polycentrique hiérarchisée	Monocentrique périurbaine	Monocentrique axialisée	Polycentrique hiérarchisée	Monocentrique périurbaine	Monocentrique axialisée	Polycentrique hiérarchisée	Monocentrique périurbaine	Monocentrique axialisée	Polycentrique hiérarchisée	Monocentrique périurbaine	Monocentrique axialisée	Polycentrique hiérarchisée	Monocentrique périurbaine	Monocentrique axialisée	Polycentrique hiérarchisée	Monocentrique périurbaine	Monocentrique axialisée	Polycentrique hiérarchisée	

Annexe 50 : Consommation énergétique totale par habitant en fonction du tissu urbain, de la structure urbaine et de la catégorie d'individu (en kWh/jour/personne) – Croisements 3, 5 et 9







Annexe 51 : Cartographie des consommations énergétiques totales par individu dans les trois villes archétypales en fonction des standards de construction et des niveaux de mobilités

Bibliographie

A

- ADEME.** (2008). *Efficacité énergétique et environnementale des modes de transport* [Synthèse publique].
- ADEME.** (2015). L'énergie : De nouveaux horizons. *DocSciences*, 3.
- ADEME.** (2017). *Référentiel d'évaluation des opérations d'aménagement AEU2*. <https://bibliothèque.ademe.fr/urbanisme-et-batiment/296-referentiel-d-evaluation-des-operations-d-amenagement-aeu2-9791029702341.html>
- ADEME.** (2019). *Réduire sa facture d'électricité*. <https://bibliothèque.ademe.fr/changement-climatique-et-energie/1966-reduire-sa-facture-d-electricite-9791029708275.html>
- Adolphson, M.** (2009). Estimating a Polycentric Urban Structure. Case Study : Urban Changes in the Stockholm Region 1991–2004. *Journal of Urban Planning and Development-asce - J URBAN PLAN DEV-ASCE*, 135. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9488\(2009\)135:1\(19\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9488(2009)135:1(19))
- Aguilera, A., Madre, J.-L., & Mignot, D.** (2004). Métropolisation, formes urbaines et mobilité. Présentation du dossier. *Les Cahiers scientifiques du transport*, 45, 5-14.
- Aguilera, A., & Mignot, D.** (2003). *Polycentrisme et mobilité domicile-travail*. ASRDLF, Lyon.
- Alexander, C.** (1965). A City Is Not a Tree. *Architectural Forum*, Vol 122(No 1), pp 58-62.
- Ali, U., Shamsi, M. H., Hoare, C., Mangina, E., & O'Donnell, J.** (2021). Review of urban building energy modeling (UBEM) approaches, methods and tools using qualitative and quantitative analysis. *Energy and Buildings*, 246, 111073. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111073>
- Allain, R.** (2004). *Morphologie urbaine : Géographie, aménagement et architecture de la ville*. Armand Colin.
- Allibe, B.** (2012). *Modélisation des consommations d'énergie du secteur résidentiel français : Amélioration du réalisme comportemental et scénarios volontaristes* [These de doctorat, Paris, EHESS]. <http://www.theses.fr/2012EHES0006>
- Anable, J.** (2005). « Complacent Car Addicts » or « Aspiring Environmentalists »? Identifying travel behaviour segments using attitude theory. *Transport Policy*, 12(1), 65-78.
- Andersen, R. V.** (2009). *Occupant Behaviour with regard to Control of the Indoor Environment* [Thesis]. Technical University of Denmark.

Anderson, J. E., Wulfhorst, G., & Lang, W. (2015). Energy analysis of the built environment—A review and outlook. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 44(C), 149-158.

Antoni, J.-P. (2010). L'étalement urbain. In G. Wackermann (Éd.), *La France en villes* (p. 164-176). Ellipses.

Antoni, J.-P. (2013). L'ambition de modéliser la ville. In G. Brun (Éd.), *Ville et mobilité—Nouveaux regards* (p. 227-238). Economica.

Antoni, J.-P. (2016). *Concepts, méthodes et modèles pour l'aménagement et les mobilités : L'aide à la décision face à la transition éco-énergétique*. Economica.

Antoni, J.-P., Fléty, Y., Vuidel, G., & De Sède-Marceau, M.-H. (2013). *Vers des indicateurs locaux de performance énergétique : Les étiquettes énergétiques territoriales*. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00912638>

Antoni, J.-P., France, & Programme de recherche et d'innovation dans les transports terrestres (France) (Éds.). (2011). *Modéliser la ville : Formes urbaines et politiques de transport*. Economica.

Antoni, J.-P., & Vuidel, G. (2011). MobiSim : Un modèle multi-agents et multi-scalaire pour simuler les mobilités urbaines. In J.-P. Antoni (Éd.), *Modéliser la ville. Forme urbaine et politiques de transport* (p. 50-77). Economica, Méthodes et approches.

APUR. (2007). *Consommations d'énergie et émissions de gaz à effet de serre liées au chauffage des résidences principales parisiennes—Rapport*. <https://www.apur.org/fr/nos-travaux/consommations-energie-emissions-gaz-effet-serre-liees-chauffage-residences-principales>

AQTr - Association québécoise des transports. (2011). *Parabole théorique : Dans l'automobile ou l'autobus, quel passager consomme moins de carburant ?* |. <https://aqtr.com/association/actualites/parabole-theorique-lautomobile-lautobus-quel-passager-consomme-moins-carburant>

Araldi, A., Perez, J., Fusco, G., & Fuse, T. (2018). Multiple Fabric Assessment : Focus on Method Versatility and Flexibility. In O. Gervasi, B. Murgante, S. Misra, E. Stankova, C. M. Torre, A. M. A. C. Rocha, D. Taniar, B. O. Apduhan, E. Tarantino, & Y. Ryu (Éds.), *Computational Science and Its Applications – ICCSA 2018* (Vol. 10962, p. 251-267). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-95168-3_17

Arantes, Baverel, Rollet, & Quenard. (2011). A simple method to consider energy balance in the architectural design of residential buildings. *Proceedings of the 2011 Symposium on Simulation for Architecture and Urban Design*, 76-83.

Arantes, L., Baverel, O., Quénard, D., & Dubus, N. (2013). Études « morpho-énergétiques » à l'échelle urbaine : Quelle(s) relation(s) entre morphologie et performance énergétique ? *Actes des congrès nationaux des sociétés historiques et scientifiques*, 137(2), 111-126.

Arantes, L., Marry, S., Baverel, O., & Quenard, D. (2016). Efficacité énergétique et formes urbaines : Élaboration d'un outil d'optimisation morpho-énergétique. *Cybergeo: European Journal of Geography*. <https://doi.org/10.4000/cybergeo.27584>

AREN, & ICEB. (2012). *L'énergie grise des matériaux et des ouvrages*.

Arnold, C. L., & Gibbons, C. J. (1996). Impervious Surface Coverage: The Emergence of a Key Environmental Indicator. *Journal of the American Planning Association*, 62(2), 243-258. <https://doi.org/10.1080/01944369608975688>

Audard, F. (2006). *Modélisation de la mobilité : La génération de trafic à l'échelle régionale* [Thèse de doctorat]. Université de Franche-Comté.

B

Baccaïni, B. (1996). L'évolution récente des navettes en Île-de-France. *L'Espace géographique*, 25(1), 37-52. <https://doi.org/10.3406/spgeo.1996.953>

Baetens, R., De Coninck, R., Jorissen, F., Picard, D., Helsen, L., & Saelens, D. (2015). OpenIDEAS - An Open Framework for Integrated District Energy Simulations. *Proceedings of Building Simulation 2015*, 347-354. <https://lirias.kuleuven.be/1565321>

Bairoch, P. (1985). *De Jéricho à Mexico : Villes et économie dans l'histoire*. Gallimard.

Baker, N., & Steemers, K. (1995). *The LT method 2.0. An energy design tool for non-domestic buildings*. <https://www.osti.gov/etdeweb/biblio/197702>

Baker, N., & Steemers, K. (1996). LT Method 3.0—A strategic energy-design tool for Southern Europe. *Energy and Buildings*, 23(3), 251-256. [https://doi.org/10.1016/0378-7788\(95\)00950-7](https://doi.org/10.1016/0378-7788(95)00950-7)

Baker, N., & Steemers, K. A. (2000). *Energy and environment in architecture : A technical design guide*. E & FN Spon.

Banister, D., Watson, S., & Wood, C. (1997). Sustainable cities : Transport, energy, and urban form. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 24(1), 125-143. <https://doi.org/10.1068/b240125>

Banos, A., & Sanders, L. (2013). Modéliser et simuler les systèmes spatiaux en géographie. In M. Silberstein, *Modéliser & simuler. Épistémologies et pratiques de la modélisation et de la simulation, t. 1* (Éditions Matériologiques, p. 839-869).

Barcelo, M., & Trépanier, M.-O. (1999). Les indicateurs d'étalement urbain et de développement durable en milieu métropolitain. *Observatoire métropolitain de la région de Montréal, Cahier 99-06*, 1-51.

- Baro, J.** (2015). *Modélisation multi-échelles de la morphologie urbaine à partir de données carroyées de population et de bâti* [Thèse de doctorat]. Université de Paris-Est.
- Baumont, C., Beguin, H., & Huriot, J.-M.** (1996). *Définir la ville—Rapport* [Rapport de recherche]. Laboratoire d'analyse et de techniques économiques [LATEC]. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01527276>
- Beimborn, E., Greenwald, M., & Jin, X.** (2003). Accessibility, Connectivity, and Captivity : Impacts on Transit Choice. *Social Research in Transport (SORT) Clearinghouse, 1835*. <https://doi.org/10.3141/1835-01>
- Ben-Akiva, M. E., & Lerman, S. R.** (1985). *Discrete choice analysis : Theory and application to travel demand*. The MIT Press.
- Benlahrech, N., Le Ruyet, A., Livebardon, C., & Dejeammes, M.** (2001). *La mobilité des personnes âgées : Analyse des enquêtes ménages déplacements - Rapport* [Rapport de recherche]. CERTU. <https://hal-lara.archives-ouvertes.fr/hal-02150415>
- Berling-Wolff, S., & Wu, J.** (2004). Modeling urban landscape dynamics : A case study in Phoenix, USA. *Urban Ecosystems, 7*(3), 215-240. <https://doi.org/10.1023/B:UECO.0000044037.23965.45>
- Bernabé, A., Calmet, I., Musy, M., Bocher, E., & Andrieu, H.** (2013). *Classification automatique des tissus urbains par la méthode des nuées dynamiques*. 31èmes Rencontres de l'AUGC, Cachan.
- Bertaud, A., & Richardson, H. W.** (2004). Transit and density : Atlanta, the United States and Western Europe. In H. W. Richardson & C.-H. C. Bae, *Urban Sprawl in Western Europe and the United States* (p. 293-310).
- Berthou, T., Duplessis, B., Rivière, P., Stabat, P., Casetta, D., & Marchio, D.** (2015). *Smart-e : A tool for energy demand simulation and optimization at the city scale*. 14th International Conference of the IBPSA. <https://hal-mines-paristech.archives-ouvertes.fr/hal-01462212>
- Berthou, T., Stabat, P., Raphael, S., & Marchio, D.** (2014). Development and validation of a gray box model to predict thermal behavior of occupied office buildings. *Energy and Buildings, 74*, 91-100. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.01.038>
- Boarnet, M. G., & Sarmiento, S.** (1998). Can Land-use Policy Really Affect Travel Behaviour? A Study of the Link between Non-work Travel and Land-use Characteristics. *Urban Studies, 35*(7), 1155-1169. <https://doi.org/10.1080/0042098984538>
- Bochet, B.** (2007). Débat ville étalée - ville compacte : La réponse des projets lausannois. *Revue économique et sociale : bulletin de la Société d'Etudes Economiques et Sociales, 65*(4), 95-108.
- Bois, H.** (2017). *Modélisation et prospective de la demande de mobilité* [Thèse de doctorat]. Paris 10.

Bonhomme, M. (2013). *Contribution à la génération de bases de données multi-scalaires et évolutives pour une approche pluridisciplinaire de l'énergétique urbaine* [Thèse de doctorat]. INSA Toulouse.

Bonin, O., Bonneau, P., Clerc, M., Cousin, J., Frankhauser, P., de Gouvello, B., Haffner, M., Lehmann, X., Pioli, R., Poirel, M., Stransky, V., & Thébert, M. (2020). *Projet SOFT - Rapport* [Rapport de recherche]. ThéMA; Institut pour la Transition Energétique, Efficacity ; LVMT. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03111221>

Bonnel, P. (2002). *Prévision de la demande de transport* [Thèse de doctorat]. Université Lumière - Lyon II.

Borsdorf, A. (2004). On the way to post-suburban Changing structures in the outskirts o European cities. In P. Zembri & A. Borsdorf (Éds.), *European cities ; Insights on Outskirts : Structures* (p. 7-30). METL-PUCA et ESF COST Office. <https://hal-enpc.archives-ouvertes.fr/hal-01583131>

Bourdic, L., Salat, S., & Nowacki, C. (2012). Assessing cities: A new system of cross-scale spatial indicators. *Building Research & Information*, 40(5), 592-605. <https://doi.org/10.1080/09613218.2012.703488>

Bourgeois, M. (2015). *Impacts écologiques des formes d'urbanisation : Modélisations urbaines et paysagères* [Thèse de doctorat]. Besançon.

Boutaud, A. (2005). *Le développement durable : Penser le changement ou changer le pansement ? : bilan et analyse des outils d'évaluation des politiques publiques locales en matière de développement durable en France : de l'émergence d'un changement dans les modes de faire au défi d'un changement dans les modes de penser* [Thèse de doctorat]. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne ; Université Jean Monnet - Saint-Etienne.

BP. (2020). *Statistical Review of World Energy. 69th edition* (p. 66 p.). <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2020-full-report.pdf>

Brisbois, X. (2010). *Le processus de décision dans le choix modal : Importance des déterminants individuels, symboliques et cognitifs* [Phdthesis, Université Pierre Mendès-France - Grenoble II]. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00556569>

Brøgger, M., & Wittchen, K. B. (2018). Estimating the energy-saving potential in national building stocks – A methodology review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 1489-1496. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.239>

Brücher, W. (2009). *Energiegeographie : Wechselwirkungen zwischen Ressourcen, Raum und Politik*. Gebr. Borntraeger Verlagsbuchhandlung.

Brunet, R. (1986). La carte-modèle et les chorèmes. *Mappemonde*, n° 86/4, 3-6.

Brunet, R. (2000). Des modèles en Géographie ? Sens d'une recherche. *Bulletin de la Société Géographique de*

Liège. <https://popups.uliege.be/0770-7576/index.php?id=2527>

Brutti-Mairesse, E. (2013). *Réflexion sur les méthodes d'évaluation environnementale des mesures de gestion des déplacements et du trafic : Analyse critique et proposition d'un nouveau cadre conceptuel* [Thèse de doctorat]. INSA de Lyon.

Burgess, E. W. (1925). The Ecological Approach to the Study of Human Community. In R. E. Park, R. D. McKenzie, & L. Wirth, *The city*. The University of Chicago Press.

C

Calvet, M. (2010). *Coûts et avantages des différentes formes urbaines : Synthèse de la littérature économique* (Études et documents). Commissariat Général au Développement Durable.

Camagni, R., Gibelli, M. C., & Rigamonti, P. (2002). Urban mobility and urban form : The social and environmental costs of different patterns of urban expansion. *Ecological Economics*, 40(2), 199-216. [https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(01\)00254-3](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(01)00254-3)

Caniggia, G., & Maffei, G. L. (1979). *Composizione architettonica e tipologia edilizia. Lettura dell'Edilizia di base*. Marsilio.

Cattan, N., & Rozenblat, C. (1991). Délimiter et mesurer l'évolution des populations urbaines. *Population*, 46(4), 979-991. <https://doi.org/10.2307/1533305>

Cervero, R., & Kockelman, K. (1997). Travel demand and the 3Ds : Density, diversity, and design. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2(3), 199-219. [https://doi.org/10.1016/S1361-9209\(97\)00009-6](https://doi.org/10.1016/S1361-9209(97)00009-6)

Cervero, R., & Wu, K.-L. (1998). Sub-centring and Commuting : Evidence from the San Francisco Bay Area, 1980-90. *Urban Studies*, 35(7), 1059-1076. <https://doi.org/10.1080/0042098984484>

Chabrol, M., & Grasland, L. (2014). Contraintes spatiales et enjeux territoriaux d'une déclinaison régionale de la transition énergétique : L'exemple de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur. *VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement*, 14(3). <https://doi.org/10.4000/vertigo.15657>

Charlot, S., Hilal, M., & Schmitt, B. (2009). La périurbanisation renforce-t-elle la ségrégation résidentielle urbaine en France ? *Espace populations sociétés*, 2009/1, 29-44. <https://doi.org/10.4000/eps.3556>

Charron, M. (2007). *La relation entre la forme urbaine et la distance de navettage : Les apports du concept de « possibilité de navettage »*. [Thèse de doctorat]. Université du Québec, Institut national de la recherche scientifique.

Cheyland, J.-P., J.P. D., Lardon, S., & Hervé, T. (1990). Les chorèmes : Un outil pour l'étude de l'activité agricole dans l'espace rural. *Mappemonde*.

Choay, F. (1994). Penser la non-ville et la non-campagne de demain. In B. Badie, B. Brunhes, & A. Cauquelin (Éds.), *La France au-delà du siècle*. Aube.

Christaller, W. (1933). *Die zentralen Orte in Süddeutschland : Eine ökonomisch-geographische Untersuchung über die Gesetzmässigkeit der Verbreitung und Entwicklung der Siedlungen mit städtischen Funktionen*. Gustav Fischer.

Cirilli, A., & Veneri, P. (2009). Spatial structure and mobility patterns : Towards a taxonomy of the Italian urban systems. *Rivista Di Economia e Statistica Del Territorio*, 1(1), 25-62. <https://doi.org/10.3280/REST2009-001003>

City Energy Analyst 3.26.0 documentation. (2017). *How are schedules defined?* <https://city-energy-analyst.readthedocs.io/en/latest/how-are-schedules-defined.html>

Commission européenne, Direction générale de la politique régionale. (2011). *Les villes de demain : Défis, visions et perspectives*. Publications Office. <https://data.europa.eu/doi/10.2776/5237>

Commission mondiale sur l'environnement et le développement, ONU. (1987). *Notre avenir à tous (rapport Brundtland)*.

Conner, C. C., & Lucas, R. L. (1990). *Thermostat related behavior and internal temperatures based on measured data in residences* (PNL-7465). Pacific Northwest Lab., Richland, WA (USA). <https://doi.org/10.2172/6558134>

Conseil Scientifique de l'Evaluation. (1996). *Petit guide de l'évaluation des politiques publiques*. La Documentation Française.

Copinschi, P. (2010). Chapitre 1. L'épuisement du pétrole en question. *Le pétrole, quel avenir ?*, 75-101.

Courel, J., & Deguire, L. (2020). *Les déterminants du choix modal : Synthèse des connaissances scientifiques*. l'Institut Paris région. <https://www.institutparisregion.fr/nos-travaux/publications/les-determinants-du-choix-modal/>

Coutard, O. (2010). *Services urbains : La fin des grands réseaux*. Economica/Anthropos. <https://hal-enpc.archives-ouvertes.fr/hal-00580937>

Crawley, D. B., Lawrie, L. K., Winkelmann, F. C., Buhl, W. F., Huang, Y. J., Pedersen, C. O., Strand, R. K., Liesen, R. J., Fisher, D. E., Witte, M. J., & Glazer, J. (2001). EnergyPlus : Creating a new-generation building energy simulation program. *Energy and Buildings*, 33(4), 319-331. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(00\)00114-6](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(00)00114-6)

Crucitti, P., Latora, V., & Porta, S. (2006). Centrality measures in spatial networks of urban streets. *Physical Review E*, 73(3), 036125. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.73.036125>

Cutsinger, J., & Galster, G. (2006). There Is No Sprawl Syndrome : A New Typology of Metropolitan Land Use Patterns. *Urban Geography - URBAN GEOGR*, 27, 228-252. <https://doi.org/10.2747/0272-3638.27.3.228>

D

De Vos, J., Mokhtarian, P. L., Schwanen, T., Van Acker, V., & Witlox, F. (2016). Travel mode choice and travel satisfaction: Bridging the gap between decision utility and experienced utility. *TRANSPORTATION*, 43(5), 771-796. <https://doi.org/10.1007/s11116-015-9619-9>

Deshaies, M., & Baudelle, G. (2013). *Ressources naturelles et peuplement : Enjeux et défis*. Ellipses.

Desjardins, X. (2011). Pour l'atténuation du changement climatique, quelle est la contribution possible de l'aménagement du territoire ? *Cybergeo : European Journal of Geography*. <https://doi.org/10.4000/cybergeo.23531>

Devalière, I., Briant, P., & Arnault, S. (2011). La précarité énergétique : Avoir froid ou dépenser trop pour se chauffer. *Insee première*, 1351. <https://www.insee.fr/fr/statistiques/1280942>

Díaz-Reviriego, I., Turnhout, E., & Beck, S. (2019). Participation and inclusiveness in the Intergovernmental Science–Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. *Nature Sustainability*, 2(6), 457-464. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0290-6>

Didier, M., & Prud'homme, R. (2007). *Infrastructures de transport, mobilité et croissance—Rapport*. Documentation Française. <https://www.vie-publique.fr/rapport/29235-infrastructures-de-transport-mobilite-et-croissance>

Dumont, G.-F. (2017). Territoires : Le modèle « centre-périphérie » désuet. *Outre-Terre*, N° 51(2), 64-79.

Dunsky, P. U. (2004). La révolution électrique en cours : Portrait de l'émergence d'une nouvelle architecture dans les pays industrialisés. *Vertigo - la revue électronique en sciences de l'environnement*, 5(1), Article Volume 5 Numéro 1. <https://doi.org/10.4000/vertigo.3920>

Dupuy, G. (1991). *L'urbanisme des réseaux, théories et méthodes*. Armand Colin. <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00438867>

Dupuy, G. (1999). *La dépendance automobile* (Anthropos). Economica.

Durand, L., Pecqueur, B., & Senil, N. (2015). *Transitions énergétiques : Quelles dynamiques de changement?*

Duruisseau, K. (2016). *Transition énergétique et géographie : Le photovoltaïque au sol dans le sud de la France* [Thèse de doctorat]. Université Aix-Marseille.

E

Eboli, L., & Mazzulla, G. (2008). A Stated Preference Experiment for Measuring Service Quality in Public Transport. *Transportation Planning and Technology*, 31(5), 509-523. <https://doi.org/10.1080/03081060802364471>

Eicker, U., Monien, D., Duminil, É., & Nouvel, R. (2015). Energy performance assessment in urban planning competitions. *Applied Energy*, 155, 323-333. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.05.094>

Evins, R., Orehounig, K., & Dorer, V. (2016). Variability between domestic buildings : The impact on energy use. *Journal of Building Performance Simulation*, 9(2), 162-175. <https://doi.org/10.1080/19401493.2015.1006526>

Ewing, R. (1996). *Pedestrian- and transit-friendly design*. Florida Department of Transportation. <https://scholarsbank.uoregon.edu/xmlui/handle/1794/10317>

Ewing, R., & Cervero, R. (2010). Travel and the Built Environment. *Journal of the American Planning Association*, 76(3), 265-294. <https://doi.org/10.1080/01944361003766766>

Ewing, R., & Cervero, R. (2001). Travel and the Built Environment : A Synthesis. *Transportation Research Record*, 1780. <https://doi.org/10.3141/1780-10>

F

Ferrando, M., Causone, F., Hong, T., & Chen, Y. (2020a). Urban building energy modeling (UBEM) tools : A state-of-the-art review of bottom-up physics-based approaches. *Sustainable Cities and Society*, 62, 102408. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102408>

Ferrando, M., Causone, F., Hong, T., & Chen, Y. (2020b). Urban building energy modeling (UBEM) tools : A state-of-the-art review of bottom-up physics-based approaches. *Sustainable Cities and Society*, 62, 102408. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102408>

Fischler, R. (2002). *Forme urbaine, développement métropolitain et mobilité des personnes : Rapport final soumis à la Commission de consultation sur l'amélioration de la mobilité entre Montréal et la Rive-Sud le 29 mai 2002*.

Flamm, M. (2004). *Comprendre le choix modal—Les déterminants des pratiques modales et des représentations individuelles des moyens de transport* [Thèse de doctorat]. EPFL.

Fonseca, J. A., Nguyen, T.-A., Schlueter, A., & Marechal, F. (2016). City Energy Analyst (CEA) : Integrated framework for analysis and optimization of building energy systems in neighborhoods and city districts. *Energy and Buildings*, 113(Supplement C), 202-226. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.11.055>

Fonseca, J. A., & Schlueter, A. (2015). Integrated model for characterization of spatiotemporal building energy consumption patterns in neighborhoods and city districts. *Applied Energy*, 142, 247-265. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.12.068>

Fouchier, V. (1997). *Des fortes densités urbaines : Les villes nouvelles dans l'espace métropolitain* [Thèse de doctorat]. Paris 8.

Fouchier, V. (2001). Les Coûts des densités, problèmes de méthode ? *Études foncières*, 92, 26-28.

François, C. (2019). *Évaluation environnementale stratégique de la mobilité quotidienne des personnes d'une aire urbaine : Couplage entre Modèle Transport-Urbanisme et Analyse de Cycle de Vie* [Thèse de doctorat]. Université de Lyon.

Frayssinet, L., Merlier, L., Kuznik, F., Hubert, J.-L., Milliez, M., & Roux, J.-J. (2018). Modeling the heating and cooling energy demand of urban buildings at city scale. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 2318-2327. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.040>

Frémond, M. (2015). *Une approche normative de l'aménagement au Luxembourg : Évaluation par la simulation* [Thèse de doctorat]. Université de Franche-Comté.

Fusco, G. (2004). La mobilité quotidienne dans les grandes villes du monde : Application de la théorie des réseaux bayésiens. *Cybergeo : European Journal of Geography*. <https://doi.org/10.4000/cybergeo.4251>

Fusco, G. (2018). *Ville, complexité, incertitude. Enjeux de connaissance pour le géographe et l'urbaniste*. [Habilitation à diriger des recherches]. Université Côte d'Azur.

Fusco, G., & Araldi, A. (2018, mai 15). The Nine Forms of the French Riviera : Classifying Urban Fabrics from the Pedestrian Perspective. *24th ISUF 2017 - City and Territory in the Globalization Age*. 24th ISUF 2017 - City and Territory in the Globalization Age. <http://ocs.editorial.upv.es/index.php/ISUF/ISUF2017/paper/view/5219>

G

Gagnon, N., Hall, C. A. S., & Brinker, L. (2009). A Preliminary Investigation of Energy Return on Energy Investment for Global Oil and Gas Production. *Energies*, 2(3), 490-503. <https://doi.org/10.3390/en20300490>

Garat, I., Gravari-Barbas, M., & Veschambre, V. (2005). Préservation du patrimoine bâti et

développement durable : Une tautologie ? Les cas de Nantes et Angers. *Développement durable et territoires*, 4. <https://doi.org/10.4000/developpementdurable.4913>

Gerber, P. (1999). Processus de gentrification et demande sociale citadine. Exemple du centre-ville de Strasbourg. *Revue Géographique de l'Est*, 39(vol. 39 / 2-3), Article 2-3. <https://doi.org/10.4000/rge.4430>

GIEC. (2013). *Changements climatiques 2013—Les éléments scientifiques : Résumé à l'intention des décideurs, résumé technique et foire aux questions.* GIEC. http://www.climatechange2013.org/images/report/WG1AR5_SummaryVolume_FINAL_FRENCH

GIEC. (2020). *GIEC, 2019 : Résumé à l'intention des décideurs, Changement climatique et terres émergées : Rapport spécial du GIEC sur le changement climatique, la désertification, la dégradation des sols, la gestion durable des terres, la sécurité alimentaire et les flux de gaz à effet de serre dans les écosystèmes terrestres.*

GIEC. (2021). *GIEC, 2021 : Changement climatique—Les bases des sciences physiques.*

Gilani, S., O'Brien, W., & Gunay, H. B. (2018). Simulating occupants' impact on building energy performance at different spatial scales. *Building and Environment*, 132, 327-337. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.01.040>

Gill, Z. M., Tierney, M. J., Pegg, I. M., & Allan, N. (2010). Low-energy dwellings : The contribution of behaviours to actual performance. *Building Research & Information*, 38(5), 491-508. <https://doi.org/10.1080/09613218.2010.505371>

Giuliano, G., & Narayan, D. (2003). Another Look at Travel Patterns and Urban Form : The US and Great Britain. *Urban Studies*, 40(11), 2295-2312. <https://doi.org/10.1080/0042098032000123303>

Glaeser, E. L., & Kahn, M. E. (2001). *Decentralized Employment and the Transformation of the American City* (Working Paper N° 8117; Working Paper Series). National Bureau of Economic Research. <https://doi.org/10.3386/w8117>

Gordon, P., Kumar, A., & Richardson, H. W. (1989). The influence of metropolitan spatial structure on commuting time. *Journal of Urban Economics*, 26(2), 138-151.

Gordon, P., & Richardson, H. W. (1989). Gasoline Consumption and Cities : A Reply. *Journal of the American Planning Association*, 55(3), 342-346. <https://doi.org/10.1080/01944368908975421>

Gordon, P., & Wong, H. L. (1985). The Costs of Urban Sprawl : Some New Evidence. *Environment and Planning A: Economy and Space*, 17(5), 661-666. <https://doi.org/10.1068/a170661>

Gouin, T. (Éd.). (2012). *Mobilité et inertie de la ville : D'après l'atelier 12 des Entretiens du Certu 2012.* CERTU.

Gropius, W. (1965). *The New Architecture and the Bauhaus.* MIT Press.

Gruet, B. (2008). Retour sur Hippodamos de Milet. *Histoire urbaine*, n° 21(1), 87-110.

Guelton, S., & Navarre, F. (2010). Les coûts de l'étalement urbain : Urbanisation et comptes publics locaux. *Flux*, n° 79-80(1), 34-53.

Guengant, A. (1989). Les coûts d'aménagements des lotissements communaux, l'exemple de la banlieue rennaise. *Villes en Parallèle*, 14(1), 130-151. <https://doi.org/10.3406/vilpa.1989.1054>

Guérin-Pace, F. (1993). *Deux siècles de croissance urbaine : La population des villes françaises de 1831 à 1990*. Anthropos : Diffusion Economica.

Guerra Santin, O., Itard, L., & Visscher, H. (2009). The effect of occupancy and building characteristics on energy use for space and water heating in Dutch residential stock. *Energy and Buildings*, 41(11), 1223-1232. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.07.002>

Guerra-Santin, O., & Itard, L. (2010). Occupants' behaviour : Determinants and effects on residential heating consumption. *Building Research & Information*, 38(3), 318-338. <https://doi.org/10.1080/09613211003661074>

Guilford, M. C., Hall, C. A. S., O'Connor, P., & Cleveland, C. J. (2011). A New Long Term Assessment of Energy Return on Investment (EROI) for U.S. Oil and Gas Discovery and Production. *Sustainability*, 3(10), 1866-1887. <https://doi.org/10.3390/su3101866>

Gusdorf, F. (2008). *L'inertie des systèmes urbains et le tempo des politiques publiques face aux risques énergétiques et climatiques* [Thèse de doctorat]. Paris Est.

H

Handy, S., Cao, X., & Mokhtarian, P. (2005). Correlation or causality between the built environment and travel behavior? Evidence from Northern California. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 10(6), 427-444. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2005.05.002>

Handy, S., Cao, X., & Mokhtarian, P. L. (2006). Self-Selection in the Relationship between the Built Environment and Walking : Empirical Evidence from Northern California. *Journal of the American Planning Association*, 72(1), 55-74. <https://doi.org/10.1080/01944360608976724>

Happle, G., Fonseca, J. A., & Schlueter, A. (2018). A review on occupant behavior in urban building energy models. *Energy and Buildings*, 174, 276-292. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.06.030>

Harris, C. D., & Ullman, E. L. (1945). The Nature of Cities. *The ANNALS of the American Academy of Political and Social Science*, 242(1), 7-17. <https://doi.org/10.1177/000271624524200103>

Haughton, G., & Hunter, C. (1994). *Sustainable cities*. J. Kingsley Publishers ; Regional Studies Association.

He, C., Lee, T., Taylor, S., Firth, S., & Lomas, K. (2015). *Coupling a stochastic occupancy model to EnergyPlus to predict hourly thermal demand of a neighbourhood*.
/articles/conference_contribution/Coupling_a_stochastic_occupancy_model_to_EnergyPlus_to_predict_hourly_thermal_demand_of_a_neighbourhood/9437543/1

Helle, C. (1995). Villes et organisation de l'espace vaclusien. *Mappemonde*, 1.

Héran, F. (2001). La réduction de la dépendance automobile. *Cahiers Lillois d'Economie et de Sociologie*, 37, 61-86.

Hilal, M. (2010). ODOMATRIX. Calcul de distances routières intercommunales. *Cahier des Techniques de l'INRA, Numéro spécial 2010*, 41.

Hirtzel, J. (2015). *Exploration prospective des mobilités résidentielles dans une agglomération urbaine au moyen d'un modèle de simulation multi-agents (MOBISIM)* [Thèse de doctorat]. Besançon.

Holden, E., & Norland, I. T. (2005). Three Challenges for the Compact City as a Sustainable Urban Form : Household Consumption of Energy and Transport in Eight Residential Areas in the Greater Oslo Region. *Urban Studies*, 42(12), 2145-2166. <https://doi.org/10.1080/00420980500332064>

Hong, T., Chen, Y., Luo, X., Luo, N., & Lee, S. H. (2020). Ten questions on urban building energy modeling. *Building and Environment*, 168, 106508. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106508>

Hoyt, H. (1939). *The Structure and Growth of Residential Neighborhoods in American Cities*. U.S. Government Printing Office.

Huang, J., Lu, X. X., & Sellers, J. M. (2007). A global comparative analysis of urban form : Applying spatial metrics and remote sensing. *Landscape and Urban Planning*, 82(4), 184-197. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2007.02.010>

Hunt, D. R. G., & Gidman, M. I. (1982). A national field survey of house temperatures. *Building and Environment*, 17(2), 107-124. [https://doi.org/10.1016/0360-1323\(82\)90048-8](https://doi.org/10.1016/0360-1323(82)90048-8)

I

IDRRIM. (2014). *Entretien et préserver le patrimoine d'infrastructures de transport : Une exigence pour la France—Rapport*. <https://www.idrrim.com/publications/2771.htm>

INSEE. (2017). *Les conditions de logement en France—Rapport* (Insee Références).

Insee. (2021). *Base permanente des équipements*. <https://www.insee.fr/fr/metadonnees/source/serie/s1161>

IPCC. (2020). *Climate Change 2021 : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. In Press.

J

Jaeger, J. A. G., Bowman, J., Brennan, J., Fahrig, L., Bert, D., Bouchard, J., Charbonneau, N., Frank, K., Gruber, B., & von Toschanowitz, K. T. (2005). Predicting when animal populations are at risk from roads: An interactive model of road avoidance behavior. *Ecological Modelling*, 185(2), 329-348. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2004.12.015>

Jaglin, S. (2010). Étalement urbain, faibles densités et « coûts » de développement. *Flux*, n° 79-80(1), 6-15.

Jancovici, J.-M. (2001). Energie et choix de société. *Revue du Palais de la Découverte*. <https://jancovici.com/publications-et-co/articles-de-presse/energie-et-choix-de-societe/>

Jewell, L. A. (2020). *Designing a neighbourhood energy infrastructure : Applying a novel framework to Lisbon*. <http://infoscience.epfl.ch/record/280847>

Johansson, M. (2005). *Childhood Influences on Adult Travel Mode Choice*. International Conference of Traffic and Transport Psychology. <https://trid.trb.org/view/763049>

K

Karjalainen, S. (2007). Gender differences in thermal comfort and use of thermostats in everyday thermal environments. *Building and Environment*, 42(4), 1594-1603. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.01.009>

Kasanko, M., Barredo, J. I., Lavallo, C., McCormick, N., Demicheli, L., Sagris, V., & Brezger, A. (2006). Are European cities becoming dispersed?: A comparative analysis of 15 European urban areas. *Landscape and Urban Planning*, 77(1), 111-130. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2005.02.003>

Ko, Y. (2013). Urban form and residential energy use : A review of design principles and empirical findings. *Journal of Planning Literature*, 28, 327-351. <https://doi.org/10.1177/0885412213491499>

Krause, Bossel, & Müller-Reissmann. (1980). Energiewende. Wachstum und Wohlstand ohne Erdöl und Uran. S. Fischer Verlag. *Physik in unserer Zeit*, 11(6), 193-193. <https://doi.org/10.1002/piuz.19800110610>

Kropf, K. (2014). Ambiguity in the definition of built form. *Urban Morphology*, 18, 41-57.

L

- Labeeuw, F.-L., Dujardin, S., Lambotte, J.-M., & Teller, J.** (2011, août 28). *Morphologie urbaine et consommation énergétique du bâti résidentiel pour répondre aux objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre*. The Eighteenth International Seminar on Urban Morphology and the Post-Carbon City, Montréal, Canada. <https://orbi.uliege.be/handle/2268/98157>
- Lacoste, Y.** (1995). *Les géographes, la science et l'illusion*. Ed. La Découverte.
- Lariviere, I., & Lafrance, G.** (1999). Modelling the electricity consumption of cities : Effect of urban density. *Energy Economics*, 21(1), 53-66.
- Lavoisier, A.-L. de.** (1789). *Traité élémentaire de chimie, présenté dans un ordre nouveau, et d'après les découvertes modernes*. [Chez Cuchet libraire, Sous le privilège de l'Académie des sciences & de la Société royale de médecine]. <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/btv1b8615746s>
- Le Néchet, F.** (2011). Consommation d'énergie et mobilité quotidienne selon la configuration des densités dans 34 villes européennes. *Cybergeo : European Journal of Geography*. <https://doi.org/10.4000/cybergeo.23634>
- Le Néchet, F.** (2015). De la forme urbaine à la structure métropolitaine : Une typologie de la configuration interne des densités pour les principales métropoles européennes de l'Audit Urbain. *Cybergeo : European Journal of Geography*. <https://doi.org/10.4000/cybergeo.26753>
- Leinberger, C.** (2008). The Option of Urbanism : Investing in a New American Dream. *Bibliovault OAI Repository, the University of Chicago Press*.
- Leniaud, J.-M.** (2002). *Les archipels du passé : Le patrimoine et son histoire*. Fayard.
- Leurent, F.** (2007). *Modélisation de la demande de transport—Notes de cours*.
- Levinson, D. M.** (1998). Accessibility and the journey to work. *Journal of Transport Geography*, 6(1), 11-21. [https://doi.org/10.1016/S0966-6923\(97\)00036-7](https://doi.org/10.1016/S0966-6923(97)00036-7)
- Levinson, D. M., & Kumar, A.** (1997). Density and the journey to work. *Growth and Change*, 28(2), 147-172.
- Levy, A.** (2005). Formes urbaines et significations : Revisiter la morphologie urbaine. *Espaces et sociétés*, 122(3), 25-48.
- L'Hostis, A., & Conesa, A.** (2010). Définir l'accessibilité intermodale. In A. Banos & T. Thévenin (Éds.), *Systèmes de Transport Urbain*. Hermès.

Loga, T., & Diefenbach, N. (2010). *Use of building typologies for energy performance assessment of national building stocks. Existent experiences in European Countries and common approach. First TABULA synthesis report.* <https://www.osti.gov/etdeweb/biblio/21462812>

Long, N., & Kergomard, C. (2005). Classification morphologique du tissu urbain pour des applications climatologiques. *Revue Internationale de Géomatique*, 15, 487.

M

Maïzia, M. (2007). L'énergétique urbaine et la morphologie des villes. L'analyse du bâti parisien. *Les Annales de la Recherche Urbaine*, 103, 79.

Maïzia, M. (2010). Densité énergétique versus densité urbaine. *Études foncières*, No.145, 37-38.

Maïzia, M., Sèze, C., Berge, S., Teller, J., Reiter, S., & Ménard, R. (2009). *Energy requirements of characteristic urban blocks.* <http://orbi.ulg.ac.be/handle/2268/31629>

Malfroy, S., & Caniggia, G. (2001). *L'Approche morphologique de la ville et du territoire : Introduction à la terminologie* (2e édition). Ville recherche diffusion, Ecole d'architecture de Versailles.

Mangin, D., & Panerai, P. (1999). *Projet urbain.* Parenthèses.

Marshall, S. (2005). *Streets & patterns* (1st ed). Spon.

Martilli, A. (2014). An idealized study of city structure, urban climate, energy consumption, and air quality. *Urban Climate*, 10, 430-446. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2014.03.003>

Martin, L., & March, L. (1972). *Urban space and structures.* Cambridge University Press.

McNeel. (2013). *Rhinoceros version 5.0.* www.rhino3d.com/

Mérenne-Schoumaker, B. (2007). *Géographie de l'énergie : Acteurs, lieux et enjeux.* Belin.

Merlin, P. (2007). *L'aménagement du territoire en France.* La Documentation française.

Meynier, A. (1969). *Histoire pensée géographique France (1872-1969)* (1ère édition). Presses Universitaires de France - PUF.

Ministère de la Transition écologique. (2020). *Données de consommation et de points de livraison d'énergie à la maille IRIS - électricité—Données.* Commissariat général au développement durable. <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/donnees-de-consommation-et-de-points-de-livraison-denergie-la-maille-iris-electricite-annee-2020>

Ministère de la Transition écologique. (2021). *Dispositifs de soutien aux énergies renouvelables*. <https://www.ecologie.gouv.fr/dispositifs-soutien-aux-energies-renouvelables>

Mitchell, G. (2005). Urban development, form and energy use in buildings : A review for the solutions project 1. [preprint]. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/versions?doi=10.1.1.120.5763>

Mons, L. (2007). *Les enjeux de l'énergie : Pétrole, nucléaire, et après?* Larousse.

Morlet, O. (2001). *Coûts-avantages des basses densités résidentielles : États des lieux*. Association des études foncières (ADEF).

Mosteiro-Romero, M., Fonseca, J. A., & Schlueter, A. (2017). Seasonal effects of input parameters in urban-scale building energy simulation. *Energy Procedia*, 122, 433-438. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.459>

Moudon, A. (1997). Urban morphology as an emerging interdisciplinary field. *Urban Morphology*, 1, 3-10.

Munafò, S. (2016). *La ville compacte remise en cause ? Formes urbaines et mobilités de loisirs*. Editions Alphil Presses universitaires suisses. <https://www.oapen.org/record/624512>

N

Naess, P., Cao, X. (Jason), & Strand, A. (2017). Which D's are the important ones? The effects of regional location and density on driving distance in Oslo and Stavanger. *Journal of Transport and Land Use*, 10(1). <https://doi.org/10.5198/jtlu.2017.1183>

Næss, P., Røe, P. G., & Larsen, S. (1995). Travelling Distances, Modal Split and Transportation Energy in Thirty Residential Areas in Oslo. *Journal of Environmental Planning and Management*, 38(3), 349-370. <https://doi.org/10.1080/09640569512913>

Newman, P. W., & Kenworthy, J. R. (1989). *Cities and automobile dependence : A sourcebook*. Gower Technical.

Newman, P. W., & Kenworthy, J. R. (1996). The land use—Transport connection. *Land Use Policy*, 13(1), 1-22. [https://doi.org/10.1016/0264-8377\(95\)00027-5](https://doi.org/10.1016/0264-8377(95)00027-5)

Neyret, R. (2004). Du monument isolé au « tout patrimoine ». *Géocarrefour*, 79(vol. 79/3), 231-237. <https://doi.org/10.4000/geocarrefour.746>

Nouvelle édition de l'Observatoire Mondial des Marchés de l'Énergie (WEMO). (2020, novembre 3). Capgemini France. <https://www.capgemini.com/fr-fr/etudes/wemo2020/>

O

Oakil, A. T. M., Ettema, D., Arentze, T., & Timmermans, H. (2014). Changing household car ownership level and life cycle events : An action in anticipation or an action on occurrence. *Transportation*, 41(4), 889-904. <https://doi.org/10.1007/s11116-013-9507-0>

Observatoire des territoires. (2019). *Se déplacer au quotidien : Enjeux spatiaux, enjeux sociaux. Fiche d'analyse de l'Observatoire des territoires 2019—Rapport.* Observatoire des territoires.

Office de l'efficacité énergétique canadien. (2021). *Guide de consommation de carburant 2021—Rapport.* Ressources naturelles Canada. <https://fcr-ccc.nrcan-rncan.gc.ca/fr>

Oreszczyn, T., Hong, S. H., Ridley, I., & Wilkinson, P. (2006). Determinants of winter indoor temperatures in low income households in England. *Energy and Buildings*, 38(3), 245-252. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2005.06.006>

Orfeuill, J.-P. (2000). *L'évolution de la mobilité quotidienne. Comprendre les dynamiques, éclairer les controverses.* INRETS. <https://trid.trb.org/view/950044>

P

Pacheco, R., Ordóñez, J., & Martínez, G. (2012). Energy efficient design of building : A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(6), 3559-3573. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.03.045>

PACTE. (2017). *Analyse détaillée du parc résidentiel existant—Version 2.0 -Rapport.* <https://www.programmepacte.fr/analyse-detaillee-du-parc-residentiel-existant-rapport>

Page, J., Robinson, D., Morel, N., & Scartezzini, J.-L. (2008). A generalised stochastic model for the simulation of occupant presence. *Energy and Buildings*, 40(2), 83-98. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.01.018>

Panerai, P., Demorgon, M., & Depaule, J.-C. (1999). *Analyse urbaine.* Parenthèses.

Paquot, T., Lussault, M., & Body-Gendrot, S. (Éds.). (2000). *La ville et l'urbain : L'état des savoirs.* La Découverte.

Perez, N. (2017). *Contribution à la conception énergétique de quartiers : Simulation, optimisation et aide à la décision* [Thèse de doctorat]. Université de La Rochelle.

Pinho, P., & Oliveira, V. (2009). Cartographic Analysis in Urban Morphology. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 36(1), 107-127. <https://doi.org/10.1068/b34035>

Pinson, D. (2009). Histoire des villes. In J.-M. Stébé & Hervé Marchal (Éds.), *Traité sur la ville* (p. 41-89). Presses Universitaires de France. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01131514>

Polk, M. (2004). The influence of gender on daily car use and on willingness to reduce car use in Sweden. *Journal of Transport Geography*, 12(3), 185-195. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2004.04.002>

Pothitou, M., Kolios, A. J., Varga, L., & Gu, S. (2016). A framework for targeting household energy savings through habitual behavioural change. *International Journal of Sustainable Energy*, 35(7), 686-700. <https://doi.org/10.1080/14786451.2014.936867>

Pouyanne, G. (2004). *Forme urbaine et mobilité quotidienne* [Thèse de doctorat]. Université Montesquieu - Bordeaux IV.

Pronello, C., & Gaborieau, J.-B. (2018). Engaging in Pro-Environment Travel Behaviour Research from a Psycho-Social Perspective : A Review of Behavioural Variables and Theories. *Sustainability*, 10(7), 2412. <https://doi.org/10.3390/su10072412>

Pumain, D. (1997). Pour une théorie évolutive des villes. *L'Espace géographique*, 26(2), 119-134. <https://doi.org/10.3406/spgeo.1997.1063>

Pumain, D. (2006). Villes et systèmes de villes dans l'économie. *Revue d'économie financière*, 86, 29.

Pumain, D., Paquot, T., & Kleinschmager, R. (2006). *Dictionnaire la ville et l'urbain*. Economica ; Anthropos.

Pumain, D., & Saint-Julien, T. (1979). Les transformations récentes du système urbain français. *L'Espace géographique*, 8(3), 203-211.

R

Racine, J.-B. (1971). Le modèle urbain américain. Les mots et les choses. *Annales de géographie*, 80(440), 397-427. <https://doi.org/10.3406/geo.1971.15354>

Ratti, C., Baker, N., & Steemers, K. (2005). Energy consumption and urban texture. *Energy and Buildings*, 37(7), 762-776. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.10.010>

Ratti, C., Raydan, D., & Steemers, K. (2003). Building form and environmental performance : Archetypes, analysis and an arid climate. *Energy and Buildings*, 35(1), 49-59. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00079-8](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00079-8)

Redman, L., Friman, M., Gärling, T., & Hartig, T. (2013). Quality attributes of public transport that attract car users : A research review. *Transport Policy*, 25, 119-127. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2012.11.005>

Reinhart. (2005). *DAYSIM Version 2.1*.

Reinhart, C. F., & Cerezo Davila, C. (2016). Urban building energy modeling – A review of a nascent field. *Building and Environment*, 97, 196-202. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.12.001>

Reinhart, Dogan, T., Jakubiec, J., Rakha, T., & Sang, A. (2013). *UMI - An urban simulation environment for building energy use, daylighting and walkability*. Proceedings of BS 2013: 13th Conference of the International Building Performance Simulation Association.

Remmen, P., Lauster, M., Mans, M., Fuchs, M., Osterhage, T., & Müller, D. (2018). TEASER : An open tool for urban energy modelling of building stocks. *Journal of Building Performance Simulation*, 11(1), 84-98. <https://doi.org/10.1080/19401493.2017.1283539>

Rérat, P. (2012). Choix résidentiel et gentrification dans une ville moyenne. Profils, trajectoires et motivations des habitants des nouveaux logements à Neuchâtel (Suisse). *Cybergeographie: European Journal of Geography*. <https://doi.org/10.4000/cybergeographie.24931>

Reymond, H., Cauvin, C., Kleinschmager, R., & UPRES-A 7011 du CNRS « Image et ville. » (Éds.). (1998). *L'espace géographique des villes : Pour une synergie multistrates*. Anthropos.

Rickwood, P., Glazebrook, G., & Searle, G. (2008). Urban Structure and Energy—A Review. *Urban Policy and Research*, 26, 57-81. <https://doi.org/10.1080/08111140701629886>

Robinson, D., Haldi, F., Leroux, P., Perez, D., Rasheed, A., & Wilke, U. (2009). *CITYSIM: Comprehensive Micro-Simulation of Resource Flows for Sustainable Urban Planning*. IBPSA 2009 - International Building Performance Simulation Association 2009.

Rochard, U., Shanthirablan, S., Brejon, C., & Chateau Le Bras, M. (2015). *Bâtiments résidentiels—Typologie du parc existant et solutions exemplaires pour la rénovation énergétique en France (Réalisé dans la cadre du projet EPISCOPE)—Rapport*. Pouget Consultant.

Rocher, L. (2013). Le chauffage urbain dans la transition énergétique : Des reconfigurations entre flux et réseau. *Flux*, N° 92(2), 23-35.

Rode, P., Keim, C., Robazza, G., Viejo, P., & Schofield, J. (2014). Cities and Energy : Urban Morphology and Residential Heat-Energy Demand. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 41(1), 138-162. <https://doi.org/10.1068/b39065>

Rodrigue, J.-P. (2020). *The geography of transport systems* (Fifth edition). Routledge.

Rojey, A. (2008). *Énergie & climat : Réussir la transition énergétique*. Editions TECHNIP.

Royer, S., Thil, S., Talbert, T., & Polit, M. (2014). A procedure for modeling buildings and their thermal

zones using co-simulation and system identification. *Energy and Buildings*, 78, 231-237. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.04.013>

Ruprich-Robert, C., & Bencivenga, M. (2002). *Évaluation des politiques publiques : Nouveau guide pratique*. La Lettre du cadre territorial.

S

Saelens, B. E., & Handy, S. L. (2008). Built Environment Correlates of Walking : A Review. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 40(7), S550-S566. <https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e31817c67a4>

Sahraoui, Y., Lunardi, N., & Antoni, J.-P. (2014). Essai de typologie des espaces résidentiels à partir d'indicateurs désagrégés à l'échelle du bâtiment. Application à Besançon et à Metz. *Cybergeo : European Journal of Geography*. <https://doi.org/10.4000/cybergeo.26431>

Sainteny, G. (2008). L'étalement urbain. *Annales des Mines - Responsabilité et environnement*, N° 49(1), 7-15.

Salat, S., Labbé, F., Nowacki, C., & Centre scientifique et technique du bâtiment. (2011). *Les villes et les formes : Sur l'urbanisme durable*. Hermann : CSTB, Laboratoire des morphologies urbaines.

Salat, S., & Nowacki, C. (2010). De l'importance de la morphologie dans l'efficacité énergétique des villes. *Communication Science-Impact*, N° 86, 141-146.

Sanaieian, H., Tenpierik, M., Linden, K. van den, Mehdizadeh Seraj, F., & Mofidi Shemrani, S. M. (2014). Review of the impact of urban block form on thermal performance, solar access and ventilation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 38, 551-560. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.06.007>

Sanders, L. (1992). *Système de villes et synergétique*. Economica.

Sanders, L. (2013). Trois décennies de modélisation des systèmes de villes : Sources d'inspiration, concepts, formalisations. *Revue d'économie Régionale Urbaine*, 5, 833-856.

Sardianou, E. (2008). Estimating space heating determinants : An analysis of Greek households. *Energy and Buildings*, 40(6), 1084-1093. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.10.003>

Sarlos, G., Haldi, P.-A., & Verstraete, P. (2003). *Systèmes énergétiques : Offre et demande d'énergie : méthodes d'analyse*. PPUR presses polytechniques.

Scarwell, H.-J., Leducq, D., & Groux, A. (Éds.). (2015). *Réussir la transition énergétique*. Presses Universitaires du Septentrion.

Scheer, B. (2016). The epistemology of urban morphology. *Urban Morphology*, 20, 5-17.

Schwanen, T. (2002). Urban form and commuting behaviour : A cross-European perspective. *Tijdschrift Voor Economische En Sociale Geografie*, 93(3), 336-343. <https://doi.org/10.1111/1467-9663.00206>

Schwanen, T., Dieleman, F. M., & Dijst, M. (2001). Travel behaviour in Dutch monocentric and policentric urban systems. *Journal of Transport Geography*, 9(3), 173-186. [https://doi.org/10.1016/S0966-6923\(01\)00009-6](https://doi.org/10.1016/S0966-6923(01)00009-6)

Schwanen, T., Dieleman, F. M., & Dijst, M. (2003). Car Use in Netherlands Daily Urban Systems : Does Polycentrism Result in Lower Commute Times? *Urban Geography*, 24(5), 410-430. <https://doi.org/10.2747/0272-3638.24.5.410>

Schwanen, T., Dieleman, F. M., & Dijst, M. (2004). The Impact of Metropolitan Structure on Commute Behavior in the Netherlands : A Multilevel Approach. *Growth and Change*, 35(3), 304-333. <https://doi.org/10.1111/j.1468-2257.2004.00251.x>

Schwarz, N. (2010). Urban form revisited—Selecting indicators for characterising European cities. *Landscape and Urban Planning*, 96(1), 29-47. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2010.01.007>

SDES - Ministère de la Transition Écologique. (2020a). *Bilan annuel des transports en 2019—Rapport*. Commissariat général au développement durable. https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/2020-09/datalab_70_chiffres_cles_energie_edition_2020_septembre2020.pdf

SDES - Ministère de la Transition Écologique. (2020b). *Chiffres clés de l'énergie Édition 2020—Rapport*. Commissariat général au développement durable. https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/2020-09/datalab_70_chiffres_cles_energie_edition_2020_septembre2020.pdf

SDES - Ministère de la Transition Écologique. (2020c). *Chiffres clés des énergies renouvelables Édition 2020—Rapport*. Commissariat général au développement durable. https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/2020-09/datalab_70_chiffres_cles_energie_edition_2020_septembre2020.pdf

SDES - Ministère de la Transition Écologique. (2020d). *Chiffres clés du climat France, Europe et Monde—Rapport*. Commissariat général au développement durable. <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/bilan-energetique-de-la-france-pour-2019>

SDES - Ministère de la Transition Écologique. (2021). *Bilan énergétique de la France pour 2019—Rapport*. Commissariat général au développement durable. <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/bilan-energetique-de-la-france-pour-2019>

Segaud, M., Brun, J., & Driant, J. C. (Éds.). (2002). *Dictionnaire critique de l'habitat et du logement*. Armand

Colin.

SIA. (2017). *SIA Energy Efficiency Path. SIA Standard 2024.*

Silva, M., Oliveira, V., & Leal, V. (2017a). Urban Form and Energy Demand : A Review of Energy-relevant Urban Attributes. *Journal of Planning Literature*, 32(4), 346-365. <https://doi.org/10.1177/0885412217706900>

Silva, M., Oliveira, V., & Leal, V. (2017b). Urban Form and Energy Demand : A Review of Energy-relevant Urban Attributes. *Journal of Planning Literature*, 32(4), 346-365. <https://doi.org/10.1177/0885412217706900>

Simard, M. (2014). Étalement urbain, empreinte écologique et ville durable. Y a-t-il une solution de rechange à la densification ? *Cahiers de géographie du Québec*, 58(165), 331-352. <https://doi.org/10.7202/1033008ar>

Simma, A., & Axhausen, K. (2001). Structures of commitment in mode use : A comparison of Switzerland, Germany and Great Britain. *Transport Policy*, 8, 279-288. [https://doi.org/10.1016/S0967-070X\(01\)00023-3](https://doi.org/10.1016/S0967-070X(01)00023-3)

Sokol, J., Cerezo, C., & Reinhart, C. (2016). Validation of a Bayesian-Based Method for Defining Residential Archetypes in Urban Building Energy Models. *Energy and Buildings*, 134. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.10.050>

Sola, A., Corchero, C., Salom, J., & Sanmarti, M. (2020). Multi-domain urban-scale energy modelling tools : A review. *Sustainable Cities and Society*, 54, 101872. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101872>

Solé-Ollé, A., & Hortas Rico, M. (2008). *Does urban sprawl increase the costs of providing local public services? Evidence from Spanish municipalities - Report* (Working Paper N° 2008/6). Institut d'Economia de Barcelona (IEB). <https://econpapers.repec.org/paper/iebwpaper/doc2008-6.htm>

Stead, D., & Marshall, S. (2001). The Relationships between Urban Form and Travel Patterns. An International Review and Evaluation. *European Journal of Transport and Infrastructure Research*, 1(2). <https://doi.org/10.18757/EJTIR.2001.1.2.3497>

Steadman, P. (1977). Energy and Patterns of Land Use. *Journal of Architectural Education*, 30(3), 62-67. <https://doi.org/10.1080/10464883.1977.10758113>

Steadman, P., Hamilton, I., & Evans, S. (2014). Energy and urban built form : An empirical and statistical approach. *Building Research and Information*, 42. <https://doi.org/10.1080/09613218.2013.808140>

Stemmers, K. (2003). Energy and the City : Density, Buildings and Transport. *Energy and Buildings*, 35, 3-14. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00075-0](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00075-0)

Stemmers, K., Baker, N., Crowther, D., Dubiel, J., Nikolopoulou, M.-H., & Ratti, C. (1997). City texture

and microclimate. *Urban Design Studies*, 3, 25-49.

Stevens, M. R. (2017). Does Compact Development Make People Drive Less? *Journal of the American Planning Association*, 83(1), 7-18. <https://doi.org/10.1080/01944363.2016.1240044>

Stock, M. (2004). L'habiter comme pratique des lieux géographiques. *EspacesTemps.net Revue électronique des sciences humaines et sociales*. <https://www.espacestemp.net/articles/habiter-comme-pratique-des-lieux-geographiques/>

Swan, L. G., & Ugursal, V. I. (2009). Modeling of end-use energy consumption in the residential sector : A review of modeling techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(8), 1819-1835. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.09.033>

T

Tannier, C., Hirtzel, J., Stephenson, R., Couillet, A., Vuidel, G., & Youssoufi, S. (2016). Conception and use of an individual-based model of residential choice in a planning decision process. Feedback from an experimental trial in the city of Besançon, France. *Progress in Planning*, 108, 1-38. <https://doi.org/10.1016/j.progress.2015.04.001>

Thierry, C. (2015). *Ville et fortifications : De l'héritage à la production du territoire urbain* [Thèse de doctorat]. Université de Franche-Comté.

Thomas, I., Frankhauser, P., & Biernacki, C. (2008). The morphology of built-up landscapes in Wallonia (Belgium): A classification using fractal indices. *Landscape and Urban Planning*, 84(2), 99-115. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2007.07.002>

Trotta-Brambilla, G., & Novarina, G. (2018). La typo-morphologie en Italie et en France. Élaboration, appropriation et diffusion d'un modèle urbanistique. *RIURBA, Numéro 6*. <http://www.riurba.review/Revue/la-typo-morphologie-en-italie-et-en-france-elaboration-appropriation-et-diffusion-dun-modele-urbanistique/>

Troy, P. N. (1992). Let's Look at that Again. *Urban Policy and Research*, 10(1), 41-49. <https://doi.org/10.1080/08111149208551483>

Tsai, Y.-H. (2005). Quantifying Urban Form : Compactness versus « Sprawl ». *Urban Studies*, 42(1), 141-161. <https://doi.org/10.1080/0042098042000309748>

Tufféry, S. (2017). *Data mining et statistique décisionnelle : La science des données*. Technip.

Turner, J., & Grieco, M. (2000). Gender and Time Poverty : The Neglected Social Policy Implications of Gendered Time, Transport and Travel. *Time & Society - TIME SOC*, 9, 129-136.

V

Van Der Maren, J.-M. (2014). Chapitre 11. La modélisation et la simulation. *Méthodes en sciences humaines*, 3e éd., 239-254.

Van Raaij, W. F., & Verhallen, T. M. M. (1983). Patterns of residential energy behavior. *Journal of Economic Psychology*, 4(1-2), 85-106. [https://doi.org/10.1016/0167-4870\(83\)90047-8](https://doi.org/10.1016/0167-4870(83)90047-8)

Vandersmissen, M.-H., Villeneuve, P., & Thériault, M. (2003). Analyzing Changes in Urban Form and Commuting Time*. *The Professional Geographer*, 55(4), 446-463. <https://doi.org/10.1111/0033-0124.5504004>

Viala, L. (2005). Contre le déterminisme de la forme urbaine, une approche totale de la forme de la ville. *Espaces et sociétés*, 122(3), 99-114.

Vickerman, R. (1995). Location, accessibility and regional development : The appraisal of trans-European networks. *Transport Policy*, 2(4), 225-234. [https://doi.org/10.1016/S0967-070X\(95\)00013-G](https://doi.org/10.1016/S0967-070X(95)00013-G)

Villalba, B., & Semal, L. (2018). *Sobriété énergétique : Contraintes matérielles, équité sociale et perspectives institutionnelles*. Editions Quae.

Vorger, É. (2014). *Étude de l'influence du comportement des habitants sur la performance énergétique du bâtiment* [Thèse de doctorat]. Paris, ENMP.

W

Walter, E., & Kämpf, J. H. (2015). A verification of CitySim results using the BESTEST and monitored consumption values. *Proceedings of the 2nd Building Simulation Applications conference*, 215-222.

Wilke, U., Haldi, F., Scartezzini, J.-L., & Robinson, D. (2013). A bottom-up stochastic model to predict building occupants' time-dependent activities. *Building and Environment*, 60, 254-264. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.10.021>

X

Xu, B., Fu, L., & Di, H. (2009). Field investigation on consumer behavior and hydraulic performance of a district heating system in Tianjin, China. *Building and Environment*, 44(2), 249-259. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.03.002>

Y

Yamasaki, E., & Tominaga, N. (1997). Evolution of an aging society and effect on residential energy demand. *Energy Policy*, 25(11), 903-912. [https://doi.org/10.1016/S0301-4215\(97\)00040-2](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(97)00040-2)

Youssofi, S. (2011). *Satisfaction résidentielle et configurations spatiales en milieu périurbain* [Thèse de doctorat]. Université de Franche-Comté.

Z

Zélem, M.-C. (2016). Les effets pervers de la sobriété énergétique. Une écologisation contrainte des modes de vie. *Revue des sciences sociales*, 55, 70-80. <https://doi.org/10.4000/revss.2001>

Liste des abréviations

CEA	City Energy Analyst
CVC	Chauffage Ventilation Climatisation
ECS	Eau Chaude Sanitaire
EDGT	Enquête Déplacements Grand Territoire
EDVM	Enquête Déplacements Villes Moyennes
EMD	Enquête Ménage Déplacement
EnR	Énergie Renouvelable
GIEC	Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat
INSEE	Institut National de la Statistique et des Études Économiques
KWh	Kilowatt heure
MAP	Marche À Pied
MOS	Modèle d'Occupation des Sols
RC	Résistance Capacité
SI	Système international des unités
SIG	Système d'information géographique
TC	Transports Collectifs
TEP	Tonne Équivalent Pétrole
TRE	Taux de retour énergétique
VP	Voiture Particulière

Liste des figures

Figure 0-1 : La structure de la thèse.....	8
Figure 1-1 : Aménager l'espace urbain : composer avec un espace hérité (d'après Thierry, 2015).	19
Figure 1-2 : Consommation de carburant et densité urbaine d'après Newman & Kenworthy (1989) (version française publiée par Frédéric Héran, 2001).....	24
Figure 1-3 : Les quatre stades énergétiques.	26
Figure 1-4 : Évolution de la proportion entre énergie grise et énergie d'exploitation du bâtiment (d'après l'ICEB, 2012).....	27
Figure 1-5 : Bilan énergétique de la France en 2019 (d'après le SDES - Ministère de la Transition Écologique, 2020b).	28
Figure 1-6 : Consommation désagrégée d'énergie en fonction du type de société (d'après Sarlos et al., 2003).	29
Figure 1-7 : Évolution de la consommation mondiale d'énergie (hors biomasse) depuis 1860 (d'après Shilling & Al. (1977), IEA (1997), Observatoire de l'Énergie (1997), cités dans Jancovici, 2001).	30
Figure 1-8 : TRE pour les découvertes de l'industrie pétrolière et gazière américaine. L'encart présente les mêmes données sur une échelle différente (d'après Guilford et al., 2011).	32
Figure 1-9 : Déséquilibre entre les émissions et la capacité de stockage du CO2 (d'après le SDES - Ministère de la Transition Écologique, 2020d).	33
Figure 1-10 : Évolution de la température moyenne annuelle mondiale de 1850 à 2019 (d'après le SDES - Ministère de la Transition Écologique, 2020d).....	34
Figure 1-11 : Risques pour les populations humaines et les écosystèmes posés par les effets du changement climatique sur les processus terrestres (d'après le GIEC, 2019).	35
Figure 1-12 : La démarche négaWatt.....	37
Figure 1-13 : Part des énergies renouvelables dans la consommation finale brute d'énergie (d'après le SDES - Ministère de la Transition Écologique, 2020c).	38
Figure 2-1 : Évolution de la consommation d'énergie primaire (corrigées des variations climatiques) en France depuis 1973 (adapté du SDES - Ministère de la Transition Écologique, 2020b).....	44
Figure 2-2 : Répartition de la consommation d'énergie primaire en France (d'après le SDES - Ministère de la Transition Écologique, 2020b).....	45
Figure 2-3 : Consommation finale énergétique par secteur (d'après le SDES - Ministère de la Transition Écologique, 2020b).	46
Figure 2-4 : Consommations finales électriques (tous secteurs confondus) à la maille géographique de l'IRIS en 2020 (Source des données : Ministère de la Transition écologique, 2020b).	46
Figure 2-5 : Évolution des consommations d'énergie et du transport de voyageurs par mode (d'après le SDES - Ministère de la Transition Écologique, 2020a).	47
Figure 2-6 : Efficacité énergétique globale des modes de transport de voyageurs en France en zone urbaine	

et périurbaine (en voyageur par kilomètre) (d'après l'ADEME, 2008).....	48
Figure 2-7 : Parts modales de déplacement selon le lieu de résidence (d'après l'Observatoire des territoires, 2019).	48
Figure 2-8 : Temps de déplacements selon le motif (d'après l'Observatoire des territoires, 2019).	49
Figure 2-9 : Évolution du parc, de la circulation et du parcours annuel moyen des voitures particulières (d'après le SDES - Ministère de la Transition Écologique, 2020a).....	49
Figure 2-10 : Consommation d'énergie des ménages (données non corrigées des variations climatiques) et dépense associées (d'après le SDES - Ministère de la Transition Écologique, 2020b).....	50
Figure 2-11 : Consommation finale énergétique dans le secteur résidentiel (d'après le SDES - Ministère de la Transition Écologique, 2020b).....	51
Figure 2-12 : Consommation finale énergétique dans le secteur résidentiel par usage (d'après le SDES - Ministère de la Transition Écologique, 2020b).....	51
Figure 2-13 : Évolution annuelle moyenne du nombre de logements par catégorie depuis 1985 (d'après le SDES - Ministère de la Transition Écologique, 2020a).	52
Figure 2-14 : Taille et occupation des logements depuis 1984 (d'après l'INSEE, 2017).	53
Figure 2-15 : Répartition du parc résidentiel par familles de logements et par périodes de construction (nombre de logements) (d'après PACTE, 2017).....	53
Figure 2-16 : L'emboîtement des trois échelles de la forme urbaine.	55
Figure 2-17 : Les déterminants de la consommation énergétique résidentielle (d'après Baker & Steemers, 2000, cités par Ratti et al., 2005).	56
Figure 2-18 : Trois archétypes différents : (a) « <i>pavillons</i> », (b) « <i>rues</i> », et (c) « <i>cours</i> » considérés par Martin et March dans leur travail sur l'utilisation du sol par les bâtiments (d'après Martin et March, 1972).	63
Figure 2-19 : Représentation axonométrique (67:5m * 67:5 m) d'un quartier traditionnel arabe (gauche : cour sur trois étages) et de deux structures pavillonnaires (centre : micro-pavillon, trois étages ; droite : pavillon, six étages) (d'après Ratti et al., 2003).	64
Figure 2-20 : Les zones passives et les zones actives sur un plan (d'après Baker & Steemers, 2000).	64
Figure 2-21 : les six formes urbaines archétypales étudiées (a) et leur bilan énergétique annuel (b) (d'après Arantes et al., 2016).	65
Figure 2-22 : Indicateurs et métriques de la forme urbaine influençant la demande d'énergie dans les villes (d'après Silva et al., 2017b).....	69
Figure 2-23 : La problématique du croisement des échelles spatiales mobilisées.	71
Figure 2-24 : Les impacts des principaux attributs de la forme urbaine sur les consommations énergétiques individuelles (adapté de Bonhomme, 2013 et Silva et al., 2017).	72
Figure 3-1 : Déclinaison de l'hypothèse principale de recherche selon les échelles considérées.	77
Figure 3-2 : Résolutions spatiales des villes archétypales modélisées.	83
Figure 3-3 : Table chorématique d'après Brunet (1986).....	86
Figure 3-4 : Les chorèmes urbains de J. Baro (2015).	87
Figure 3-5 : Différents exemples de « <i>patterns</i> » identifiés par les morphologues urbains (d'après Scheer, 2016).	91
Figure 3-6 : Hiérarchie et emboîtement des échelles des patterns (d'après Kropf, 2014).	91

Figure 3-7 : Motifs de réseau. (a) Motif géométrique. (b) Motif topologique. (c) Motif hiérarchique (d'après Marshall, 2005).....	93
Figure 3-8 : Quatre catégories de classification. (a) Catégories définies par la forme. (b) Catégories définies par l'usage. (c) Catégories définies par les relations. (d) Catégories définies par la désignation (d'après Marshall, 2005).....	93
Figure 3-9 : Méthodologie de génération des villes archétypales utilisée dans cette thèse.....	95
Figure 3-10 : Architecture de la plateforme Mobisim (d'après Hirtzel, 2015).....	99
Figure 3-11 : Le fonctionnement de Mobisim-Soft.....	101
Figure 3-12 : Taxonomie des modèles d'estimation de la consommation énergétique par usage du secteur résidentiel (d'après Swan & Ugursal, 2009).	102
Figure 3-13 : Le fonctionnement général des modèles énergétiques bottom-up de type ingénieur (d'après Ferrando et al., 2020b).	104
Figure 3-14 : Un exemple de résultats de l'outil UMI visualisés dans Rhinoceros (d'après Reinhart et al., 2013).	107
Figure 3-15 : Les différentes bases de données de CEA.....	118
Figure 3-16 : La définition des plannings d'occupations avec un modèle déterministe (haut) et stochastique (bas) (d'après City Energy Analyst 3.26.0 documentation, 2017).	119
Figure 3-17 : Le modèle RC de CEA (d'après Fonseca & Schlueter, 2015).....	120
Figure 4-1 : les trois modèles classiques de la structure des villes américaines (d'après Racine, 1971).	130
Figure 4-2 : La théorie des lieux centraux de Christaller (d'après Rodrigue, 2020).....	131
Figure 4-3 : Les dimensions de la structure urbaine identifiées dans la littérature (d'après Le Néchet, 2015).	133
Figure 4-4 : Cadre d'évaluation de la diversité des structures urbaines sélectionnées.	133
Figure 4-5 : Les six figures idéaltypiques de la structure urbaine (d'après Le Néchet, 2015).	134
Figure 4-6 : Les modèles de structures urbaines en France (d'après Baro, 2015).	135
Figure 4-7 - Comparaison des différents modèles de structures urbaines en fonction des dimensions identifiées.	136
Figure 4-8 : Les trois modèles de structure de ville sélectionnés.	137
Figure 4-9 : Caractérisation des cinq types de tissus urbains sélectionnés au regard des dimensions identifiées dans la littérature.....	141
Figure 4-10 : Les sept types architecturaux identifiés (d'après Bonhomme, 2013).....	143
Figure 4-11 : Les neuf types architecturaux identifiés à Paris (d'après l'Apur, 2007).	144
Figure 4-12 : La matrice typologique des bâtiments résidentiels en France dans le cadre des projets TABULA/EPISCOPE (d'après Rochard et al., 2015).	145
Figure 4-13 : Comparaison des différentes architectures bâties sélectionnées en fonction des dimensions identifiées.	146
Figure 4-14 : Représentation graphique des différentes architectures bâties modélisées.....	148
Figure 4-15 : Articulation des architectures bâties et des tissus urbains sélectionnés.	149
Figure 4-16 : Plan hippodaméen de Milet (d'après Gruet, 2008).	150
Figure 4-17 : Plan de la ville de Karlsruhe (Allemagne) en 1827 par T. Bradley.	151

Figure 4-18 : Plan du projet de ville linéaire d'Arturo Soria.....	152
Figure 4-19 : Les modèles de réseaux de transports et structures urbaines associées.....	153
Figure 4-20 : Les apports et les manques des modèles urbains conceptuels identifiés dans la littérature pour une génération de villes archétypales.....	155
Figure 5-1 : Synthèse des indicateurs identifiés dans la littérature.....	160
Figure 5-2 : Gestion du chevauchement des entités sur plusieurs mailles.....	162
Figure 5-3 : Coefficients de corrélation linéaire entre les indicateurs morphologiques sélectionnés (variables décrites dans le Tableau 5-2).	163
Figure 5-4 : La méthode des centres mobiles (d'après Tufféry, 2017).....	165
Figure 5-5 : Éboulis des valeurs propres.....	166
Figure 5-6 : Cercle des corrélations de l'ACP (dimension 1 et 2) (variables décrites dans le Tableau 5-2).	168
Figure 5-7 : Projection des 7 classes sur le nuage de points des individus.	168
Figure 5-8 : Surface au sol moyenne des bâtiments par maille en fonction du tissu urbain.	172
Figure 5-9 : Surface d'enveloppe moyenne des bâtiments par maille en fonction du tissu urbain.	172
Figure 5-10 : Hauteur moyenne des bâtiments par maille en fonction du tissu urbain.....	173
Figure 5-11 : Compacité moyenne des bâtiments par maille en fonction du tissu urbain.....	173
Figure 5-12 : Nombre de parcelles par maille en fonction du tissu urbain.	174
Figure 5-13 : Nombre de bâtiments par maille en fonction du tissu urbain.	174
Figure 5-14 : Densité nette de bâtiment par maille (fsi) en fonction du tissu urbain.	175
Figure 5-15 : Coefficient d'emprise au sol (gsi) en fonction du tissu urbain.....	175
Figure 5-16 : Nomenclature de l'Urban Atlas.	177
Figure 5-17 : Nomenclature du MOS de Besançon.	179
Figure 5-18 : Indicateur de densité des aménités.	184
Figure 5-19 : Indicateur de distribution des aménités.	184
Figure 5-20 : Indicateur de hiérarchie de la répartition.....	184
Figure 5-21 : Indicateur de densité des lieux d'études supérieures.	185
Figure 5-22 : Indicateurs d'organisation spatiale des emplois.	186
Figure 5-23 : Les écarts aux courbes de références pour l'indicateur de hiérarchie.	188
Figure 5-24 : Composition et répartition spatiale des mailles de tissus urbains à Besançon.	190
Figure 5-25 : Composition et répartition spatiale des mailles de tissus urbains à Amiens.	191
Figure 5-26 : Composition et répartition spatiale des mailles de tissus urbains à Limoges.....	192
Figure 5-27 : Composition et répartition spatiale des mailles de tissus urbains à Mulhouse.	194
Figure 5-28 : Composition et répartition spatiale des mailles de tissus urbains à Grenoble.	195
Figure 5-29 : Composition et répartition spatiale des mailles de tissus urbains à Bordeaux.	196
Figure 5-30 : Composition et répartition spatiale des mailles de tissus urbains à Chambéry.....	198
Figure 5-31 : Composition et répartition spatiale des mailles de tissus urbains à Clermont-Ferrand.	199
Figure 5-32 : Composition et répartition spatiale des mailles de tissus urbains à Nîmes.	200
Figure 5-33 : Les réseaux routiers structurants des villes monocentriques périurbaines.	203
Figure 5-34 : Les réseaux routiers structurants des villes monocentriques axialisées.	204
Figure 5-35 : Les réseaux routiers structurants des polycentriques hiérarchisées.	205

Figure 5-36 : Articulation des tissus urbains et des structures urbaines sélectionnés	207
Figure 5-37 : Les villes archétypales à modéliser	209
Figure 6-1 : Modification des surfaces par transformation d'un polygone en un maillage de cellules.	213
Figure 6-2 : Table attributaire des mailles constituant les villes théoriques dans Qgis.	213
Figure 6-3 : Caractéristiques principales et représentations 3D des différentes mailles d'architectures bâties généérées.....	219
Figure 6-4 : Les trois villes archétypales générées et leur composition en mailles de tissus urbains.....	223
Figure 6-5 : Les règles de localisation des différentes aménités dans les villes théoriques.	225
Figure 6-6 : Méthode de distribution directionnelle.	226
Figure 6-7 : Ellipses directionnelles des ventilations des différents équipements dans la ville archétypale monocentrique périurbaine.	228
Figure 6-8 : Densité de commerces et services dans les trois villes archétypales.	231
Figure 6-9 : Densité d'emplois dans les trois villes archétypales.	232
Figure 6-10 : Comparaison des temps d'accès au centre-ville dans les différentes structures urbaines.	237
Figure 7-1 : Exemple du croisement entre les zones fines et les tissus urbains à Nancy (cercle de rayon 20 km).....	257
Figure 7-2 : Représentation des variables dans les dimensions 1 et 2 de l'ACM.....	261
Figure 7-3 : Motifs de déplacements en fonction de la structure des ménages dans les différents territoires sélectionnés.	264
Figure 7-4 : Motifs de déplacements en fonction du genre dans les différents territoires sélectionnés.	264
Figure 7-5 : Composition des différents tissus urbains en fonction des catégories d'individus.	265
Figure 7-6 : Parts modales de déplacements et distance moyenne de déplacement chez les scolaires en fonction du tissu urbain de résidence dans les différents territoires sélectionnés.....	267
Figure 7-7 : Parts modales de déplacements et distance moyenne de déplacement chez les étudiants en fonction du tissu urbain de résidence dans les différents territoires sélectionnés.....	268
Figure 7-8 : Parts modales et distances moyennes de déplacement chez les retraités en fonction du tissu urbain de résidence dans les différents territoires sélectionnés.	268
Figure 7-9 : Parts modales de déplacements et distance moyenne de déplacement chez les inactifs en fonction du tissu urbain de résidence dans les différents territoires sélectionnés.....	269
Figure 7-10 : Parts modales de déplacements et distance moyenne de déplacement chez les actifs en fonction du tissu urbain de résidence dans les différents territoires sélectionnés.....	270
Figure 7-11 : Composition des différentes structures urbaines en fonction des tissus urbains.	270
Figure 7-12 : Composition des différentes structures urbaines en fonction des catégories d'individus.....	271
Figure 8-1 : L'objectif du chapitre 8.....	276
Figure 8-2 : Méthodologie d'affectation de la population des données carroyées Insee au maillage en tissus urbains construit dans la thèse.....	278
Figure 8-3 : Des déplacements aux chaînes de déplacements.	282
Figure 8-4 : Nombre de chaînes de déplacements générées par jour par motif et par catégorie d'individu.....	283
Figure 8-5 : Distances moyennes aux différentes destinations par motif principal pour chaque catégorie d'individu.	284

Figure 8-6 : Les effets des différentes variables du modèle sur l'utilisation des modes de déplacement.	287
Figure 8-7 : Comparaison des distances moyennes d'un déplacement par catégorie d'individus.	288
Figure 8-8 : Comparaison des distances moyennes d'un déplacement par motif principal.	289
Figure 8-9 : Comparaison des parts modales.	290
Figure 8-10 : Comparaison des parts modales selon la catégorie d'individus.	291
Figure 8-11 : Comparaison des parts modales selon le motif principal de déplacement.	292
Figure 8-12 : Les principales caractéristiques de mobilités quotidiennes des tissus urbains.	294
Figure 8-13 : L'impact de la forme urbaine locale sur les pratiques de mobilités.	295
Figure 8-14 : Parts modales de déplacements et distance moyenne de déplacement chez les scolaires en fonction du tissu urbain de résidence.	296
Figure 8-15 : Parts modales de déplacements et distance moyenne de déplacement chez les étudiants en fonction du tissu urbain de résidence.	297
Figure 8-16 : Parts modales de déplacements et distance moyenne de déplacement chez les retraités en fonction du tissu urbain de résidence.	297
Figure 8-17 : Parts modales de déplacements et distance moyenne de déplacement chez les inactifs en fonction du tissu urbain de résidence.	298
Figure 8-18 : Parts modales de déplacements et distance moyenne de déplacement chez les actifs en fonction du tissu urbain de résidence.	299
Figure 8-19 : Les principales caractéristiques de mobilités quotidiennes des différentes structures urbaines archétypales.	299
Figure 8-20 : L'impact de la forme urbaine globale sur les pratiques de mobilités quotidiennes.	300
Figure 8-21 : Distance moyenne de déplacements en fonction de la localisation résidentielle dans les structures urbaines et dans les tissus urbains.	301
Figure 8-22 : Distances moyennes de déplacements par catégories d'individus en fonction de la localisation résidentielle dans les structures urbaines et dans les tissus urbains.	301
Figure 8-23 : La composition de l'étiquette énergétique d'un lave-linge.	304
Figure 8-24 : Les étiquettes énergétiques pour les consommations liées aux mobilités quotidiennes.	304
Figure 8-25 : L'impact de la forme urbaine locale sur la consommation d'énergie individuelle liée aux mobilités quotidiennes.	306
Figure 8-26 : Consommation énergétique des mobilités quotidiennes par catégories d'individus et par motifs dans les différents tissus urbains (en kWh/jour/personne).	308
Figure 8-27 : L'impact de la structure urbaine sur la consommation d'énergie individuelle liée aux mobilités quotidiennes.	310
Figure 8-28 : Consommation énergétique des mobilités quotidiennes par habitant en fonction du motif, du tissu urbain et de la structure urbaine (en kWh/jour/personne).	312
Figure 8-29 : Consommations énergétiques liées aux mobilités quotidiennes par habitant en fonction de la catégorie d'individu, du tissu urbain et de la structure urbaine (en kWh/jour/personne).	314
Figure 8-30 : L'impact de la forme urbaine sur les consommations énergétiques individuelles liées aux mobilités quotidiennes.	317
Figure 9-1 : Le premier objectif du chapitre 9.	320

Figure 9-2 : Les étiquettes énergétiques pour les consommations liées aux usages résidentiels	326
Figure 9-3 : Consommation énergétique résidentielle par habitant selon la forme architecturale et le standard de construction (en kWh/jour/personne)	327
Figure 9-4 : Consommation énergétique résidentielle par mètre carré selon la forme architecturale et le standard de construction (en kWh/jour/m ²)	328
Figure 9-5 : L'impact de l'architecture bâtie et des tissus urbains sur la consommation d'énergie résidentielle des individus	329
Figure 9-6 : Les consommations énergétiques résidentielles par habitant par tissu urbain (en kWh/jour/personne)	329
Figure 9-7 : Les différents croisements de consommations énergétiques possibles	331
Figure 9-8 : L'étiquette énergétique pour les consommations énergétiques totales des individus	332
Figure 9-9 : Les consommations énergétiques individuelles totales par habitant en fonction des tissus urbains	333
Figure 9-10 : Synthèse de l'analyse des consommations énergétiques totales par habitant en fonction des tissus urbains	334
Figure 9-11 : Synthèse de l'analyse des consommations énergétiques totales par habitant en fonction des tissus urbains et des catégories d'individus	336
Figure 9-12 : Consommations énergétiques totales par habitant en fonction du tissu et de la catégorie d'individu (en kWh/jour/personne)	337
Figure 9-13 : Consommation énergétique totale par habitant en fonction de la structure urbaine	338
Figure 9-14 : Consommation énergétique individuelle totale en fonction du tissu urbain et de la structure urbaine (en kWh/jour/personne)	340
Figure 9-15 : L'impact de la forme urbaine sur les consommations énergétiques individuelles résidentielles	342
Figure 9-16 : l'impact de la forme urbaine sur les consommations énergétiques globales	344

Liste des tableaux

Tableau 1-1 : Années de construction du parc actuel de logements (d'après SOeS, enquête Phébus 2013).	20
Tableau 2-1 : L'influence des facteurs sociodémographiques sur les besoins en chauffage.	58
Tableau 2-2 : Le paradoxe énergétique urbain (adapté de Bonhomme, 2013).	67
Tableau 3-1 : Récapitulatif des différents types d'évaluation (Source : François (2019) d'après Ruprich-Robert & Bencivenga (2002)).	79
Tableau 3-2 : Classification des modèles d'affectation (d'après Bonnel, 2002).	98
Tableau 3-3 : Grille de comparaison des différents outils de simulation des consommations énergétiques résidentielles.	106
Tableau 3-4 : Comparaison des différents outils de simulation des consommations énergétiques résidentielles.	112
Tableau 3-5 : Les standards de construction des bâtiments proposés par CEA.	115
Tableau 3-6 : Les 19 types de bâtiments proposés par CEA.	116
Tableau 3-7 : Le planning d'occupation des bâtiments de type « restaurant » (d'après CEA).	118
Tableau 4-1 : Comparaison des différentes typologies de tissus urbains identifiées dans la littérature.	140
Tableau 4-2 : Les quatre classes de bâtiments sélectionnées (d'après Rochard et al., 2015).	144
Tableau 4-3 : Les dix périodes constructives utilisées pour la typologie des bâtiments résidentiels en France (d'après Rochard et al., 2015).	145
Tableau 4-4 : les matrices typologiques des bâtiments résidentiels individuels (gauche) et collectifs (droite) en France dans le cadre du projet Pacte (d'après PACTE, 2017).	146
Tableau 4-5 : Caractéristiques détaillées des différentes architectures bâties modélisées dans les villes théoriques.	147
Tableau 5-1 : Les aires urbaines sélectionnées, leur population et leur superficie.	158
Tableau 5-2 : Les indicateurs morphologiques retenus.	161
Tableau 5-3 : Avantages et inconvénients des principales méthodes de classification (adapté de Tufféry, 2017).	164
Tableau 5-4 : Coordonnées des variables, qualité de représentation et contribution aux axes factoriels (variables décrites dans le Tableau 5-2).	167
Tableau 5-5 : Résultats de l'ANOVA (variables décrites dans le Tableau 5-2).	171
Tableau 5-6 : Comparaison de notre classification avec les données de l'Urban Atlas.	178
Tableau 5-7 : Comparaison de notre classification avec les données du MOS de Besançon.	180
Tableau 5-8 : Les équipements de la BPE sélectionnés et leurs types.	182
Tableau 5-9 : Les effectifs d'emplois à partir de la base Sirene.	183
Tableau 5-10 : Les indicateurs d'organisation spatiale des commerces et services.	188
Tableau 5-11 : Densité de bâtiment des différentes mailles de tissus urbains.	206

Tableau 5-12 : Les surfaces urbanisées des différentes taches bâties dans les villes théoriques.	207
Tableau 6-1 : Vitesses de circulation selon l’environnement géographique et le type de voie (d’après Hilal, 2010).	220
Tableau 6-2 : Les réseaux de transports générés dans les villes archétypales.	224
Tableau 6-3 : Les valeurs moyennes de densité et de diversité affectées à chaque classe.....	225
Tableau 6-4 : Comparaison des distances standards (en mètres) de chaque ventilation par type de tissus et type d’équipements pour la ville monocentrique périurbaine.	229
Tableau 6-5 : Répartition des aménités dans les villes théoriques en fonction des tissus urbains.....	230
Tableau 6-6 : Un exemple de matrice origine-destination produite par Modaccess.	234
Tableau 6-7 : Les vitesses attribuées au réseau routier des villes réelles.....	234
Tableau 6-8 : Comparaison des temps d’accès aux aménités par tissus urbains dans les villes monocentriques périurbaines.....	238
Tableau 6-9 : Comparaison des temps d’accès aux aménités par tissus urbains dans les villes monocentriques axialisées.....	239
Tableau 6-10 : Comparaison des temps d’accès aux aménités par tissus urbains dans les villes polycentriques hiérarchisées.....	239
Tableau 7-1 : Présentation des différentes enquêtes déplacements utilisées dans ce travail.....	253
Tableau 7-2 : Les différents motifs de déplacements sélectionnés dans les enquêtes déplacements.	254
Tableau 7-3 : Les différents modes des déplacements conservés dans les enquêtes déplacements.	255
Tableau 7-4 : Nombre de ménages, personnes et déplacements par villes sélectionnées.	256
Tableau 7-5 : Nombre de ménages, personnes et déplacements étudiés après préparation des données.	257
Tableau 7-6 : Les différentes variables sociodémographiques des enquêtes déplacements.	259
Tableau 7-7 : Test de la corrélation des variables sociodémographiques quantitatives.	259
Tableau 7-8 : Création d’une variable unique à partir des variables sociodémographiques quantitatives.	260
Tableau 7-9 : Test de la corrélation des variables sociodémographiques qualitatives des enquêtes déplacements.	260
Tableau 7-10 : Test de la corrélation entre les variables sociodémographiques et les variables de mobilités.	262
Tableau 7-11 : Synthèse des pratiques de mobilités des différentes catégories d’individus.	262
Tableau 7-12 : Données de mobilité par personne en fonction du tissu urbain dans les différents territoires sélectionnés.	266
Tableau 7-13 : Données de mobilité par personne en fonction de la structure urbaine dans les différents territoires sélectionnés.....	272
Tableau 8-1 : Le nombre d’habitants affectés à chaque maille de tissu urbain.....	278
Tableau 8-2 : La composition par catégories d’individus de chaque maille de tissu urbain.....	279
Tableau 8-3 : La population générée dans les trois villes archétypales.	280
Tableau 8-4 : L’ordre d’importance des différents motifs de déplacements.	282
Tableau 8-5 : Correspondance entre les motifs de déplacements et les aménités (commerces et services).	284
Tableau 8-6 : Écarts entre les distances moyennes d’un déplacement en fonction de la catégorie d’individu.	288

Tableau 8-7 : Écarts entre les distances moyennes d'un déplacement en fonction du motif	289
Tableau 8-8 : Écarts entre les parts modales.....	290
Tableau 8-9 : La consommation de carburant de différents types de voiture particulière (d'après l'Office de l'efficacité énergétique canadien, 2021).	302
Tableau 8-10 : La consommation de carburant de différents types de transports collectifs (d'après l'AQTr - Association québécoise des transports (2011) et l'ADEME (2008)).	303
Tableau 8-11 : Les consommations énergétiques par habitant liées aux mobilités quotidiennes selon le tissu urbain.	305
Tableau 8-12 : Les consommations énergétiques par habitant des mobilités quotidiennes selon les structures urbaines.	309
Tableau 9-1 : La population affectée aux différentes mailles d'architectures bâties	322
Tableau 9-2 : Les probabilités de présence journalière fournies par CEA pour les usages résidentiels.....	322
Tableau 9-3 : Les principales caractéristiques des différents standards de construction	324
Tableau 9-4 : Les consommations énergétiques résidentielles totales et par habitant par ville archétypale	330
Tableau 9-5 : La part du résidentiel dans les consommations énergétiques totales	332

Liste des annexes

Annexe 1 : Les différentes variables de la base de données par défaut « Architecture » de CEA	356
Annexe 2 : Les différentes variables de la base de données par défaut « Usages des bâtiments » de CEA	357
Annexe 3 : Les différents indicateurs de composition des tissus urbains identifiés dans les villes réelles	358
Annexe 4 : Les différents indicateurs de configuration des tissus urbains identifiés dans les villes réelles	359
Annexe 5 : Création des courbes de hiérarchie de la distribution des aménités fonctionnelles	359
Annexe 6 : Surface bâtie des neuf villes réelles étudiées	360
Annexe 7 : Répartition des tissus urbains dans les différentes villes réelles	361
Annexe 8 : Ellipses directionnelles des ventilations des différents équipements dans la ville archétypale monocentrique axialisée	362
Annexe 9 : Ellipses directionnelles des ventilations des différents équipements dans la ville archétypale polycentrique hiérarchisée	363
Annexe 10 : Comparaison des distances standards de chaque ventilation par type de tissus et type d'équipements pour la ville monocentrique axialisée	364
Annexe 11 : Comparaison des distances standards de chaque ventilation par type de tissus et type d'équipements pour la ville polycentrique hiérarchisée	365
Annexe 12 : Nombre de commerces et services détaillés par type d'équipements par tissus urbains par villes archétypales	366
Annexe 13 : Comparaison des temps d'accès moyens aux différents équipements par tissu urbain pour les villes monocentriques périurbaines	368
Annexe 14 : Comparaison des temps d'accès moyens aux différents équipements par tissu urbain pour les villes monocentriques axialisées	370
Annexe 15 : Comparaison des temps d'accès moyens aux différents équipements par tissu urbain pour les villes polycentriques hiérarchisées	372
Annexe 16 : Parts modales de déplacements en fonction des catégories d'individus dans les différents territoires sélectionnés	372
Annexe 17 : Motifs de déplacements en fonction des catégories d'individus dans les différents territoires sélectionnés	373
Annexe 18 : Distance moyenne de déplacements par personne par catégorie d'individu par jour dans les différents territoires sélectionnés	373
Annexe 19 : Test de la relation entre les variables de pratiques de mobilités et le tissu urbain	374
Annexe 20 : Parts modales de déplacements en fonction du motif et de la localisation résidentielle dans les différents territoires sélectionnés	374
Annexe 21 : Test de la relation deux à deux entre les variables de pratiques de mobilités et la structure urbaine des villes	374

Annexe 22 : Nombre de déplacement et distance moyenne parcourue par type d'individu en fonction du tissu urbain dans les différents territoires sélectionnés	377
Annexe 23 : Parts modales de déplacements en fonction du tissu urbain de résidence dans les différents territoires des EMD	378
Annexe 24 : Parts modales de déplacements par type d'individus en fonction de la structure urbaine dans les différents territoires des EMD	378
Annexe 25 : La population générée dans les trois villes archétypales détaillée par catégories d'individus	380
Annexe 26 : Classement des motifs et des sous-motifs de déplacements dans Mobisim-Soft	380
Annexe 27 : Les résultats des différents tests de validation du modèle Mobisim-Soft	381
Annexe 28 : Comparaison des distances moyennes de déplacements des données de calibration, de validation et simulées en fonction de la catégorie d'individus et du motif de déplacement.	384
Annexe 29 : Comparaison des parts modales de déplacements des données de calibration, de validation et simulées en fonction du motif et de la catégorie d'individu.	394
Annexe 30 : Distance moyenne des chaînes de déplacement par mode en fonction du tissu urbain dans les trois villes archétypales	395
Annexe 31 : Parts modales et distances moyennes de déplacement par individu en fonction du tissu urbain, du type d'individu et du motif de déplacement dans les trois villes archétypales	398
Annexe 32 : Distribution des consommations énergétiques liées aux mobilités quotidiennes en fonction des tissus urbains	399
Annexe 33 : Distribution des consommations énergétiques individuelles liées aux mobilités quotidiennes en fonction de la structure urbaine	399
Annexe 34 : Cartographie des consommations énergétiques par habitant liées aux mobilités quotidiennes dans les trois villes archétypales.....	401
Annexe 35 : Cartographie des consommations énergétiques par habitant liées aux mobilités quotidiennes dans les trois villes archétypales en fonction de la catégorie d'individus	404
Annexe 36 : Probabilités d'usages énergétiques fournies par CEA pour les bâtiments résidentiels.....	405
Annexe 37 : Consommations énergétiques résidentielles détaillées pour la forme architecturale bâtie 1	407
Annexe 38 : Consommations énergétiques résidentielles détaillées pour la forme architecturale bâtie 2.....	409
Annexe 39 : Consommations énergétiques résidentielles détaillées pour la forme architecturale bâtie 3.....	411
Annexe 40 : Consommations énergétiques résidentielles détaillées pour la forme architecturale bâtie 4.....	413
Annexe 41 : Consommations énergétiques résidentielles détaillées pour la forme architecturale bâtie 5.....	415
Annexe 42 : Consommations énergétiques résidentielles détaillées pour la forme architecturale bâtie 6.....	417
Annexe 43 : Consommations énergétiques résidentielles détaillées pour la forme architecturale bâtie 7.....	419
Annexe 44 : Consommations énergétiques résidentielles détaillées pour la forme architecturale bâtie 8.....	421
Annexe 45 : Consommations énergétiques résidentielles détaillées pour la forme architecturale bâtie 9.....	423
Annexe 46 : Consommations énergétiques résidentielles détaillées pour la forme architecturale bâtie 10.....	425
Annexe 47 : Cartographie des consommations énergétiques résidentielles par habitant dans les trois villes archétypales en fonction des standards de construction.....	426
Annexe 48 : Consommation énergétique totale par habitant en fonction du tissu urbain, de la structure urbaine et de la catégorie d'individu (en kWh/jour/personne) – Croisements 1, 4 et 7	427

Annexe 49 : Consommation énergétique totale par habitant en fonction du tissu urbain, de la structure urbaine et de la catégorie d'individu (en kWh/jour/personne) – Croisements 2, 5 et 8	428
Annexe 50 : Consommation énergétique totale par habitant en fonction du tissu urbain, de la structure urbaine et de la catégorie d'individu (en kWh/jour/personne) – Croisements 3, 5 et 9	429
Annexe 51 : Cartographie des consommations énergétiques totales par individu dans les trois villes archétypales en fonction des standards de construction et des niveaux de mobilités	432

Table des matières

Avant-propos	3
Remerciements	5
Introduction générale	6
PREMIERE PARTIE LA FORME URBAINE FACE A LA TRANSITION ENERGETIQUE	9
Introduction de la partie 1.....	11
Chapitre 1 Étudier la forme urbaine pour penser la ville durable	13
1.1 Ville et forme urbaine : entre adaptabilité et inertie	14
1.1.1 La ville, une entité physique et fonctionnelle	14
1.1.2 La forme urbaine comme résultat d'un processus évolutif	17
1.1.3 L'énergie, principal vecteur de transformation de la ville	24
1.2 Forme urbaine et transition énergétique : un nouvel objectif à intégrer	31
1.2.1 Contexte et enjeux de la transition énergétique	31
1.2.2 Une nouvelle donne énergétique	36
1.2.3 L'aménagement du territoire comme levier d'action pour la transition énergétique	39
1.3 Synthèse et objectif de recherche.....	41
Chapitre 2 Identifier les liens entre forme urbaine et consommations énergétiques	43
2.1 Les consommations énergétiques au travers des pratiques des individus	44
2.1.1 L'énergie consommée : ordre de grandeur et tendances françaises	44
2.1.2 Consommations énergétiques et pratiques de mobilités.....	47
2.1.3 Consommations énergétiques et pratiques résidentielles.....	50
2.2 Des liens complexes entre la forme urbaine et les consommations énergétiques.....	54
2.2.1 La forme urbaine comme support des pratiques individuelles	54
2.2.2 La forme urbaine comme déterminant des consommations énergétiques.....	55
2.3 Formes urbaines et consommation d'énergie : une absence de consensus	59
2.3.1 Mobilités quotidiennes et forme urbaine	59
2.3.2 Consommation résidentielle et forme urbaine.....	62

2.3.3	Une conclusion est-elle possible ?	67
2.4	Synthèse du chapitre 2	72

Chapitre 3 Méthodologie d'évaluation des liens entre la forme urbaine et les consommations énergétiques individuelles 75

3.1	Problématique et démarche de recherche	76
3.1.1	Problématique et hypothèses de recherche	76
3.1.2	Une approche modélisatrice multi-échelle pour évaluer les effets de la forme urbaine sur les consommations énergétiques individuelles	77
3.2	La génération de villes archétypales comme territoires d'étude.....	85
3.2.1	Les approches sollicitées.....	85
3.2.2	La méthode appliquée	94
3.3	L'évaluation des consommations énergétiques individuelles dans les villes archétypales.....	96
3.3.1	La modélisation des consommations liées aux pratiques de mobilités quotidiennes	96
3.3.2	La modélisation des consommations énergétiques résidentielles	101
3.4	Synthèse du chapitre 3	121

Conclusion de la partie 1 122

DEUXIEME PARTIE MODELISATION ET GENERATION DES VILLES ARCHETYPALES 125

Introduction de la partie 2..... 127

Chapitre 4 Proposition d'un cadre conceptuel de modélisation des villes archétypales 129

4.1	Les modèles de structures urbaines	130
4.1.1	Les théories fondatrices des modèles urbains	130
4.1.2	Des modèles de structures urbaines actualisés.....	132
4.1.3	Les modèles de structures urbaines sélectionnés.....	135
4.2	Les modèles de tissus urbains et de types architecturaux	139
4.2.1	Types de tissus urbains	139
4.2.2	Types d'architectures bâties.....	142
4.3	Les modèles de réseaux de transports.....	150
4.3.1	Les premiers modèles de réseaux de transports	150
4.3.2	Des modèles de réseaux de transports actualisés	152
4.3.3	Les modèles de réseaux de transports sélectionnés	154
4.4	Synthèse du chapitre 4.....	155

Chapitre 5 Définition et quantification des modèles urbains conceptuels 157

5.1	Identification préalable des tissus urbains à modéliser dans des villes réelles.....	158
5.1.1	Mise en place de la méthodologie d'identification des tissus urbains.....	158
5.1.2	Identification des tissus urbains.....	162
5.1.3	Évaluation de la classification.....	175
5.2	Analyse des villes réelles pour quantifier les modèles urbains conceptuels.....	181
5.2.1	Les caractéristiques fonctionnelles des tissus urbains.....	181
5.2.2	La répartition des différents tissus urbains au sein des structures urbaines.....	189
5.2.3	La structure du réseau routier principal.....	201
5.2.4	Les apports de l'analyse des tissus urbains et des structures urbaines des villes réelles.....	206
5.3	Synthèse du chapitre 5.....	210

Chapitre 6 Génération de villes archétypales 211

6.1	Génération des villes archétypales.....	212
6.1.1	Génération du cadre physique des villes archétypales.....	212
6.1.2	Génération du cadre fonctionnel des villes archétypales.....	224
6.2	Évaluation des résultats : des villes réalistes ?.....	233
6.2.1	Méthode et outil.....	233
6.2.2	Les résultats.....	234
6.3	Synthèse du chapitre 6.....	240

Conclusion de la partie 2 241

TROISIEME PARTIE ANALYSE STATISTIQUE DU LIEN ENTRE FORME URBAINE ET CONSOMMATIONS ENERGETIQUES INDIVIDUELLES 245

Introduction de la partie 3..... 247

Chapitre 7 Analyse préalable des déplacements quotidiens dans les grandes aires urbaines françaises 249

7.1	Les enquêtes déplacements : des photographiques des déplacements quotidiens.....	250
7.1.1	Les différentes enquêtes déplacements utilisées.....	250
7.1.2	Préparation des données.....	254
7.2	Le rôle majeur des caractéristiques sociodémographiques des individus sur les pratiques de mobilités quotidiennes.....	258
7.2.1	Préparation des données.....	258
7.2.2	L'impact des variables sociodémographiques sur les pratiques de mobilités.....	261

7.3	Les enjeux liés à la localisation résidentielle des ménages.....	265
7.3.1	L'impact de la forme urbaine locale sur les pratiques de mobilités.....	265
7.3.2	L'impact de la forme urbaine globale sur les pratiques de mobilités.....	270
7.4	Synthèse du chapitre 7.....	273
Chapitre 8 Appréhender l'impact énergétique des mobilités quotidiennes à l'aide d'un outil de simulation		275
8.1	Mobisim Soft.....	277
8.1.1	Génération de la population.....	277
8.1.2	Usage du modèle Mobisim-soft pour simuler les mobilités quotidiennes	280
8.1.3	Validation du modèle.....	285
8.1.4	Les forces et les faiblesses du modèle.....	292
8.2	Présentation et analyses des résultats de simulation.....	294
8.2.1	Forme urbaine et pratiques de mobilités quotidiennes.....	294
8.2.2	Forme urbaine et consommations énergétiques liées aux mobilités quotidiennes.....	302
8.3	Synthèse du chapitre 8.....	315
Chapitre 9 Une évaluation multisectorielle des consommations énergétiques individuelles 319		
9.1	Appréhender l'impact énergétique des pratiques résidentielles à l'aide d'un outil de simulation 321	
9.1.1	Usage de City Energy Analyst (CEA) pour simuler les consommations énergétiques résidentielles	321
9.1.2	Présentation et analyses des résultats de consommations résidentielles	325
9.2	Analyse conjointe des consommations énergétiques individuelles	331
9.2.1	Méthode d'analyse des résultats	331
9.2.2	Analyse croisée des consommations énergétiques individuelles.....	332
9.3	Synthèse du chapitre 9.....	341
Conclusion de la partie 3		345
Conclusion générale.....		349
Annexes		355
Bibliographie.....		433

Liste des abréviations	459
Liste des figures	461
Liste des tableaux	469
Liste des annexes	472
Table des matières	476

The impact of urban forms in the implementation of energy transition policies: a modelling approach

Energy sobriety appears to be a central element of the sustainable city in the face of the problem of global warming and the growing difficulties of energy supply. Approximately 50% of the final energy consumed in France is used directly by individuals, i.e. in buildings for heating, lighting or specific electricity needs (29%) and in transportation for daily travel (20%). These two sectors emerge as two major fields of action for significantly reducing overall energy consumption. These consumptions depend on several factors, such as climate, behaviours, technology but also the urban form. This thesis proposes a reflection on the interactions between urban form and individual energy consumption. In order to question these interactions and to shed new light on this issue, we propose (1) to use archetypal cities as study areas and (2) to have a disaggregated modelling approach of the practices generating energy consumption. The first proposal makes it possible to have "*standardised*" territories, representative of French cities, characterised by varied forms at all the scales considered and fully parameterisable. The second proposal, which places the individual and his living space at the heart of the modelling, allows us to spatialise energy and to combine both the transportation and building sectors. This work is carried out using the daily mobility simulation platform MobiSim-Soft and the residential consumption simulation platform CityEnergyAnalyst (CEA). Finally, the results of this thesis show the interest of the multi-scale archetypal cities method combined with a disaggregated modelling of practices, allowing us to conduct a systemic and multi-scale analysis of the effects of urban form on energy consumption.

Keywords: urban forms – daily mobility – spatial modelling – energy simulations – residential consumption – archetypal cities – planning

L'impact des formes urbaines dans la mise en place des politiques de transition énergétique : une approche par la modélisation

La sobriété énergétique apparaît comme un élément central de la ville durable face à la problématique du réchauffement climatique et aux difficultés croissantes d'approvisionnement énergétique. Environ 50 % de l'énergie finale consommée en France est utilisée directement par les individus, c'est à dire dans les bâtiments pour les besoins de chauffage, d'éclairage ou encore d'électricité spécifique (29 %) et dans les transports pour se déplacer quotidiennement (20 %). Ces deux secteurs apparaissent ainsi comme deux champs d'action majeurs permettant de réduire significativement la consommation globale d'énergie. Ces consommations dépendent de plusieurs facteurs, comme le climat, les comportements, la technologie mais également la forme urbaine. Ce travail propose une réflexion sur les interactions entre la forme urbaine et les consommations énergétiques individuelles. Pour questionner ces interactions et donner de nouveaux éclairages sur cette question, nous proposons (1) de recourir à des villes archétypales comme terrains d'études et (2) d'avoir une approche de modélisation désagrégée des pratiques générant des consommations énergétiques. La première proposition permet d'avoir des territoires « *standardisés* », représentatifs des villes en France, caractérisés par des formes variées à toutes les échelles considérées et entièrement paramétrables. La seconde proposition qui place l'individu et son lieu de vie au cœur de la modélisation permet de spatialiser l'énergie et ainsi de combiner à la fois le secteur des transports et celui du bâtiment. Ce travail est réalisé à l'aide de la plateforme de simulations des mobilités quotidiennes MobiSim-Soft et à l'aide de la plateforme de simulation des consommations résidentielles CityEnergyAnalyst (CEA). Finalement, les résultats de ce travail de thèse montrent l'intérêt de la méthode villes archétypales – modélisation désagrégée des pratiques, en nous permettant de conduire une analyse systémique et multi-échelles des effets de la forme urbaine sur les consommations énergétiques.

Mots clés : formes urbaines - mobilité quotidienne – modélisation spatiale – simulations énergétiques – consommations résidentielles – villes archétypales – aménagement du territoire