Contribution to the generation of multiscalar and evolutionary databases for a multidisciplinary approach to urban energy

Marion Bonhomme

▶ **To cite this version:**

Marion Bonhomme. Contribution to the generation of multiscalar and evolutionary databases for a multidisciplinary approach to urban energy. Architecture, aménagement de l'espace. INSA Toulouse, 2013. Français. NNT : . tel-02155394

HAL Id: tel-02155394

https://hal.insa-toulouse.fr/tel-02155394

Submitted on 13 Jun 2019

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.

Université de Toulouse

THÈSE

En vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par :

Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse (INSA de Toulouse)

Présentée et soutenue par :
Marion BONHOMME

le 11 décembre 2013

Titre :

Contribution à la génération de bases de données multi-scalaires et évolutives pour une approche pluridisciplinaire de l'énergétique urbaine

---

École doctorale et discipline ou spécialité :

ED MEGEP : Génie civil

Unité de recherche :

LMDC (INSA) et LRA (ENSA)

Directeur(s) de Thèse :

Luc ADOLPHE

Jury :

Marjorie MUSY (Rapporteur)
André POTVIN (Rapporteur)
Valéry MASSON (Examinateur)
Jean-Luc SALAGNAC (Examinateur)
Christiane WEBER (Examinateur)
Frédéric BONNEAUD (Invité)

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier Luc Adolphe pour avoir accepté d'encadrer cette thèse et pour l'avoir fait avec toutes les qualités qui lui sont propres : optimisme, ouverture d'esprit, bonne humeur, ...

Je souhaite également adresser mes remerciements tout particuliers à Frédéric Bonneaud, Directeur du LRA, sans qui cette thèse n'aurait pas été possible. Je tiens à lui exprimer ma sincère gratitude pour ses nombreux conseils.

Un grand merci à Jean-Luc Salagnac pour avoir très largement contribué au co-encadrement de cette thèse. Ses relectures méticuleuses font (presque) toujours mon bonheur !

Mes remerciements s'adressent également à Valéry Masson, Marjorie Musy, André Potvin et Christiane Weber qui ont accepté de participer à mon jury de thèse.

Je ne pourrais exprimer à quel point je suis reconnaissante aux membres des projets ACCLIMAT et MUSCADE pour m'avoir donné le goût de la recherche. Nos nombreux échanges ont été extrêmement enrichissants d'un point de vue scientifique mais les côtoyer a aussi été un plaisir sur le plan humain. Un merci tout particulier à Colette Marchadier et à Valéry Masson pour m'avoir accueilli à bras ouverts dans l'équipe (avec un badge et tout !), pour avoir toujours été de bon conseil et avoir été si compréhensifs face aux difficultés que j'ai pu rencontrer. Valéry a eu la gentillesse de coder GENIUS ce pourquoi je lui suis également extrêmement reconnaissante.

Passer ces trois années au LRA a été un immense plaisir au grâce à son équipe. Merci à Catherine et Tathiane pour avoir partagé, durant notre première année de thèse, nos doutes, nos espoirs mais surtout des éclats de rires dont je conserve un souvenir nostalgique. Merci à Marc pour tous les bons repas qui nous ont réunis. Merci à Sandra pour nos escapades durant la rédaction de nos mémoires. Merci à Nathalie pour son oreille toujours attentive et sa gentillesse. Merci à Catherine et Isabelle pour toutes les « pauses thés » que nous avons partagés et merci à Fred pour toutes les « pauses café » ! Merci à Patrice et à Serge pour leur aide fréquente mais surtout pour leur bonne humeur. Merci à Annie pour sa gentillesse et pour avoir toujours trouvé une solution à chaque problème. Merci à Alain Chatelet qui, en tant que Directeur, a fait énormément pour le LRA et qui nous manque déjà. Merci à Bernard, Biao, Corinne, Delphine, Hassan, Jean-Pierre, Jenny, Juan-Carlos, Sophie, Uyen et à tous ceux et celles avec qui j'ai eu le plaisir de partager un repas, une réunion, un café... Merci à vous tous pour avoir rendu cet endroit si accueillant. Merci également à tout le personnel de l'ENSA de m'avoir ouverts les portes de l'école.

Un grand merci à mes amis pour tous les bons moments passés ensemble et pour me rappeler en permanence qu'il existe une vie en dehors de la thèse ! Alex, Axel, Aurélie, Dorothée, Emma, Fanny, Lisa, Louis, Mélanie, Nathalie, Pauline et Sébastien, vous savoir à mes côtés (même à distance) après toutes ces années est une grande joie. Je n'oublie pas non plus mes voisins préférés, Claude et Marie.

Je voudrais également remercier ma famille pour leur soutien inconditionnel. Merci à mes formidables parents car je ne serais pas arrivée jusqu'ici sans la certitude de les savoir à mes côtés. Merci à mon extraordinaire frère Renaud d'être toujours là pour me ramener les pieds sur terre, me faire rire, me faire voyager.

Enfin, un immense remerciement à celui sans qui ces trois années auraient paru bien longues, sans qui le courage m'aurait manqué, avec qui j'ai pu partager les doutes et les joies de la vie de doctorante et d'enseignante : Maxime. Je n'y serai pas arrivé sans toi, ton amour, ton soutien, tes raclettes-de-remontage-de-moral (et autres petits plats plus ou moins sains) !

Résumé

Ce travail est une contribution à la recherche en énergétique urbaine. Il a conduit au développement d'un modèle, GENIUS, pour la génération de bases de données urbaines permettant des approches pluridisciplinaires.

En effet, depuis plusieurs années, la recherche tente de considérer la question de l'énergétique urbaine dans toute sa complexité : consommations des ressources, pollutions, microclimat, production et consommation d'énergie, usage … Ainsi, architectes, urbanistes, thermiciens, climatologues, modélisateurs, sociologues, géographes, se réunissent autour de la question de la ville, du climat et de l'énergie.

Pour tenter d'apporter des connaissances nouvelles sur ces problématiques, les outils de modélisation informatiques sont devenus essentiels à la recherche comme aux projets. Simulation du comportement thermique des bâtiments, du microclimat urbain, de l'étalement urbain, du trafic routier, … Les modèles sont nombreux mais rares sont les travaux qui convoquent suffisamment de disciplines pour rendre compte des interactions complexes des systèmes urbains. L'une des raisons réside dans la confrontation des différentes échelles de travail de ces modèles et des disciplines associées. L'un des vecteurs d'une recherche urbaine pluridisciplinaire est donc la création de bases de données multi-scalaires.

Trois parties aux objectifs distincts sont développées dans le mémoire.

Première partie : contexte et problématique

Dans la première partie nous présenterons un état de l'art des recherches en lien avec la ville, le climat et l'énergie. Nous verrons que de nombreuses études portent sur la typo-morphologie et son lien avec l'énergétique urbaine. La grande majorité des travaux s'accordent sur le fait qu'une ville respectueuse de l'environnement est une ville dense avec un bâti compact. Cependant, la plupart de ces études ne tiennent compte que d'une partie des facteurs impactant l'énergétique urbaine. Or, la prise en compte de l'éclairage, de la ventilation, du rafraichissement, de la production d'énergies renouvelables, du microclimat urbain et de l'énergie primaire totale liée aux matériaux est susceptible de remettre en question le paradigme de la densité et de la compacité urbaine.

Il est donc aujourd'hui nécessaire d'interroger les densités urbaines au regard d'une analyse pluridisciplinaire. Or, le manque d'intégration des études actuelles est en grande partie dû aux différences d'échelles qui existent entre différentes disciplines. Si on prend l'exemple de

la thermique du bâtiment et de l'étude du microclimat urbain, bien que ces disciplines partagent un savoir commun sur les bilans énergétiques, leurs échelles sont très différentes. L'étude du comportement thermique d'un bâtiment nécessite la connaissance d'informations détaillées : a minima la géométrie du bâtiment et les matériaux qui le composent. En ce qui concerne l'étude du microclimat urbain, les données nécessaires sont tout aussi vastes mais concernent plutôt l'échelle du quartier, voire de la ville. Les bases de données nécessaires aux études urbaines doivent donc répondre à ces différentes échelles.

Au-delà des échelles spatiales, les échelles temporelles impliquées dans l'étude de l'énergétique urbaine ont une importance primordiale. D'une part, elles divergent grandement d'une discipline à l'autre. Par exemple, là où le confort à l'intérieur d'un bâtiment nécessite une simulation thermique dynamique sur une année, la simulation des effets des changements climatiques est de l'ordre du siècle. D'autre part, cet horizon temporel séculaire est en lui-même un défi scientifique. Or, nous verrons que les modèles prospectifs existants ne permettent pas de générer des bases de données suffisamment précises pour des études d'énergétique de la ville.

Nous présenterons comment l'utilisation de bases de données adaptées peut résoudre une partie de ce problème. Après avoir passé en revue les différentes méthodes de construction de ces données, nous identifierons les évolutions attendues afin d'améliorer la polyvalence des bases de données urbaines.

Deuxième partie : développement de GENIUS

Dans cette thèse, on se propose de développer une méthode et un outil permettant de générer des bases de données multi-scalaires pour une recherche pluridisciplinaire. Le modèle que nous avons conçu est GENIUS, pour GENérateur d'Ilots UrbainS.

Le premier objectif est de produire des données adaptées aux différentes échelles spatiales afin de permettre le croisement de différentes disciplines. Pour cela, nous choisissons une représentation typologique de la ville car cette méthode combine les avantages de couvrir un large territoire tout en fournissant un niveau de détail élevé. Notre méthode se distingue des méthodes typologiques existantes par le fait qu'à chaque « individu » est associé un type de quartier mais également des caractéristiques propres. Sur la base d'une étude bibliographique, un ensemble de 7 archétypes urbains représentatifs des villes françaises est défini et un maillage de Paris et de Toulouse (nos cas d'étude) est réalisé. Chaque maille est caractérisée par un système d'indicateurs morphologiques calculé à l'aide d'un logiciel SIG et qui nous renseigne sur la forme urbaine. Nous avons ensuite sélectionné plusieurs méthodes de classification automatique et les avons mises en œuvre. La méthode retenue est celle de

l'analyse en composante principale qui nous a permis de réaliser des cartes archétypales de Paris et Toulouse.

Le deuxième objectif de GENIUS est de faire évoluer ces données dans le temps afin de tenir compte des différentes échelles temporelles impliquées dans toute étude pluridisciplinaire. Il ne s'agit pas ici de proposer un nouveau modèle prospectif d'expansion urbaine puisqu'il en existe déjà de nombreux de grande qualité. Dans ce travail, nous avons fait le choix de coupler notre modèle à un modèle prospectif existant afin d'y apporter de la précision en terme de forme urbaine. Notre travail consiste donc à faire une descente d'échelle à partir, d'une part, des données produites par ces modèles et, d'autre part, de mécanismes d'évolutions des morphologies urbaines. Ces mécanismes sont établis sur la base d'observations des évolutions passées et sur des scénarios prospectifs.

Troisième partie : applications de GENIUS

Dans la dernière partie, nous présenterons les applications de GENIUS. En particulier, nous considèrerons le cas de deux projets de recherche prospectifs et pluridisciplinaires ayant pour objet d'étude les interactions entre changement climatique et développement urbain : les projets MUSCADE et ACCLIMAT.

Les projets MUSCADE et ACCLIMAT sont deux projets de recherches portés par le CNRM (Centre National de Recherches Météorologiques - Météo-France). Ils visent à étudier, de nos jours à 2100, les interactions entre structure de ville, procédés constructifs, consommation d'énergie, production d'énergie décentralisée, microclimat urbain et changement climatique. Ces projets étudient le cas des agglomérations Parisienne (MUSCADE) et Toulousaine (ACCLIMAT) à l'échelle du siècle afin de tenir compte de l'inertie de la structure urbaine et du changement climatique. La finalité de ces projets est de sensibiliser et proposer une base de réflexion, à partir des exemples de Paris et Toulouse, aussi bien pour le monde scientifique que pour des décideurs, et permettre d'identifier des leviers d'action pour éclairer des choix futurs en termes de réglementation du bâti, modes de production d'énergie décentralisée et aménagement urbain. La première étape a consisté à construire un jeu de scénarios combinant hypothèses climatiques, macroéconomiques, urbaines, techniques et énergétiques. Par la suite, les modèles décrivant le comportement de différents éléments (bâti, ville, microclimat) et leurs interactions ont été étudiés à l'aide d'outils de modélisation numérique.

Dans le cadre de ces projets, GENIUS a permis de faire communiquer des modèles et de simuler les évolutions possibles des formes urbaines et leur impact sur l'énergétique urbaine.

Sommaire

Introduction **13**

Première partie : contexte et problématique **17**

1. La ville, le climat, l'énergie **18**

1.1. Introduction 18

1.2. La ville consommatrice d'énergie 19

1.2.1. Problématique et limites 20

1.2.2. Consommations du bâti 21

1.2.3. Consommations liées aux déplacements 25

1.2.4. Énergie primaire totale des matériaux pour le bâti et les réseaux 30

1.3. La ville productrice d'énergie 33

1.3.1. Problématique et limites 35

1.3.2. Énergie solaire 35

1.3.3. Énergie éolienne 39

1.3.4. Biomasse 41

1.3.5. Géothermie 43

1.4. La ville distributrice d'énergie 47

1.4.1. Les limites d'un réseau centralisé 47

1.4.2. Des alternatives à l'échelle urbaine 48

1.5. Le microclimat urbain 50

1.5.1. Un contexte de réchauffement climatique 50

1.5.2. L'ilot de chaleur urbain 50

1.5.3. Causes du phénomène 51

1.5.4. Impacts de l'ilot de chaleur urbain 56

1.6. Données et connaissances convoquées dans l'étude du triptyque ville, énergie, climat .. 57

1.6.1. Thermique du bâtiment 57

1.6.2. Architecture bioclimatique 60

1.6.3. Approvisionnement et distribution énergétique 63

1.6.4. Étude du microclimat urbain 67

1.6.5. Étude des réseaux de transports 69

1.6.6. Urbanisme et énergétique urbaine 71

2. Énergétique et morphologies urbaines : les densités de la ville **77**

2.1. Densités 77

2.1.1. Définitions d'un indicateur controversé 77

2.1.2. Évolutions des densités 80

2.1.3. La densité perçue 82

2.2. Le paradoxe énergétique urbain 84

2.2.1. Problématique 84

2.2.2. Les pistes de réflexion passées et actuelles 88

2.2.3. Conclusion 93

2.3. Problématiques énergétiques dans les politiques et les pratiques urbaines 94
2.3.1. Contexte – Politiques énergétiques de l'échelle mondiale à l'échelle locale 94
2.3.2. Les freins à la prise en compte de l'énergétique urbaine 96
2.3.3. Les pistes d'améliorations liées à la recherche 99
2.4. Conclusion et positionnement 102

3. Bases de données multi-scalaires pour les études énergétiques et microclimatiques à l'échelle urbaine 103
3.1. Problématique 103
3.2. La pluridisciplinarité des approches, des échelles et des bases de données associées 103
3.2.1. Problématique 103
3.2.2. Revue de littérature des méthodes actuelles 105
3.3. Les échelles temporelles des problématiques urbaines, climatiques et sociales 111
3.3.1. Problématique 111
3.3.2. Modèles prospectifs d'évolution urbaine : Revue de litterature 112

4. Conclusion de la première partie : positionnement et objectifs 119

Deuxième partie : développement de GENIUS pour la génération de bases de données multi-scalaires 121

1. Objectifs et méthode 122
1.1. Objectif 122
1.1.1. De la modélisation synchronique … 122
1.1.2. … à la modélisation diachronique 123
1.2. Méthode générale 125
1.2.1. Première étape : modélisation synchronique 125
1.2.2. Deuxième étape : modélisation diachronique 127
1.2.3. Limites géographiques de ce travail 129

2. Modélisation synchronique – Une base de données urbaines multi-scalaire 132
2.1. Revue de littérature des méthodes existantes 132
2.1.1. Les méthodes du type « familles de référence » 132
2.1.2. Les méthodes du type « morphologies simplifiées » 133
2.1.3. Les méthodes « statistiques » 134
2.1.4. Choix d'une méthode 136
2.2. Sélection des quartiers types 137
2.2.1. Quartiers types sélectionnés 137
2.2.2. Taille des mailles 141
2.3. Choix et calcul des paramètres 146
2.3.1. Base de données 146
2.3.2. Analyse bibliographique 148
2.3.3. Analyse opérationnelle 156
2.3.4. Calcul des paramètres 166

2.4. Classification automatique des mailles 169
2.4.1. Identification préalable 169
2.4.2. Les différentes méthodes de classifications 169
2.4.3. Méthodes de classification automatique retenues 177
2.4.4. Analyse en composante principale 180
2.4.5. Méthode k-means 192
2.4.6. Méthode des cartes de Kohonen 194
2.4.7. Discussion 195
2.5. Caractérisation des quartiers types 202
2.5.1. Attribution des usages 202
2.5.2. Attribution de caractéristiques techniques 206
2.6. Validation de la carte initiale 212
2.6.1. Méthode 212
2.6.2. Analyse 213
2.7. Analyse des typologies obtenues 217
2.7.1. Pavillon discontinu 217
2.7.2. Pavillon continu 218
2.7.3. Immeuble discontinu 219
2.7.4. Immeuble continu 219
2.7.5. Centre ancien 220
2.7.6. Immeuble de grande hauteur 220
2.7.7. Bâtiment d'activités 221
2.7.8. Conclusion 221
2.8. GENIUS synchronique : discussion 229

3. Modélisation diachronique – Une base de données urbaines évolutive 232
3.1. Problématique 232
3.2. Choix d'un modèle prospectif d'expansion urbaine 234
3.2.1. Comparaison des modèles existants 234
3.2.2. Limites du modèle 238
3.3. Contribution aux modèles prospectifs actuels : prise en compte des évolutions typologiques, morphologiques et techniques 240
3.3.1. Différentes méthodes de prise en compte des évolutions urbaines 240
3.3.2. Analyse bibliographique des tendances passées : les évolutions urbaines constatées types par types 242
3.3.3. Construction de scénarios par entretiens avec des experts 247
3.4. Évolution typologique des quartiers 250
3.4.1. Méthode retenue pour prendre en compte les mécanismes d'évolution de la ville liés aux typologies urbaines existantes 250
3.4.2. Méthode retenue pour prendre en compte les mécanismes d'évolution de la ville liés aux politiques urbaines 253
3.5. Évolution morphologique des quartiers 255
3.5.1. Principes généraux 255
3.5.2. Exemple de l'évolution de la hauteur moyenne des bâtiments 257
3.6. Évolution technologique des bâtiments 264
3.7. Codage de GENIUS 265

3.8. Validation de GENIUS 266
3.8.1. Mise au point des cartes passées 266
3.8.2. Simulation 270
3.8.3. Résultats 271
3.9. GENIUS diachronique : discussion 279

4. Conclusion de la deuxième partie : intérêts de la méthode 281

Troisième partie : les applications de GENIUS, des contributions à l'énergétique urbaine 285

1. Introduction 286

2. Ville, énergie, climat : utilisation de GENIUS dans ACCLIMAT et MUSCADE 287
2.1. Les projets de recherche ACCLIMAT et MUSCADE 287
2.1.1. Présentation générale 287
2.1.2. Méthode des projets 288
2.1.3. Les sept scénarios systémiques 295
2.2. Application de GENIUS : évolutions de la ville de Toulouse 301
2.2.1. Rappel concernant les scénarios 301
2.2.2. Évolutions globales de la ville 302
2.2.3. Évolutions typologiques de la ville 307
2.2.4. Évolutions morphologiques de la ville 318
2.2.5. Évolution des caractéristiques techniques des bâtiments 320
2.2.6. Discussion 323
2.3. Résultats pour l'énergétique urbaine 325
2.3.1. Consommations des bâtiments 325
2.3.2. Microclimat urbain 327
2.3.3. Analyse 331
2.4. Analyse multicritère 335
2.4.1. Méthodes d'agrégation pour une analyse multicritère 335
2.4.2. Méthodes d'agrégation inter-thématiques 336
2.4.3. Exemple d'analyse multicritère pour les résultats d'ACCLIMAT 336
2.5. Discussion 344

3. Perspectives 348
3.1. Utilisation de GENIUS dans le cadre du projet EPICURE 348
3.1.1. Problématique : la nécessité d'une étude de sensibilité 348
3.1.2. Méthode 348
3.1.3. Perspectives 349
3.2. Utilisation de GENIUS dans le cadre du projet MApUCE 352
3.2.1. Problématique 352
3.2.2. Méthode 352
3.2.3. Perspectives 353

4. Conclusion de la troisième partie 354

Conclusion générale 357

Glossaire 365

Bibliographie 379

Liste des tableaux 405

Liste des figures 407

Annexes 415

Avis des rapporteurs et rapport du jury 547

Introduction

L'architecte Sir Richard Rogers a écrit « L'ironie veut que notre modèle d'habitat – Les villes – soit le plus grand prédateur de l'écosystème » (Rogers, 2000). Bâtiments, transports, industries, … On sait depuis plusieurs décennies que les villes sont les plus grandes consommatrices d'énergie et les premières responsables des émissions de gaz à effet de serre* (GES).

On sait également que ces mêmes villes peuvent être le remède aux maux qu'elles provoquent car, selon un consensus partagé depuis plusieurs années au sein de la communauté scientifique, les villes permettent de limiter l'impact de l'homme sur son environnement (Maïzia et al., 2009; Steemers, 2003).

En particulier, les tissus urbains* traditionnels sont spécifiquement adaptés aux climats locaux. On peut bien sur citer le tracé des villes romaines dont l'orientation tenait compte de la géométrie solaire ainsi que des vents dominants. Vitruve a ainsi beaucoup écrit sur les relations qui lient l'aménagement des villes et les conditions climatiques (Oliver, 1997). On peut également se référer à l'architecture vernaculaire, issue des connaissances d'une population acquises au fil des générations, et qui est souvent adaptée à l'environnement local. De part son orientation et sa matérialité, cette architecture permet de limiter la consommation de combustible et d'améliorer le confort (Fathy, 1986). Dans les pays chauds, elle va par exemple se traduire par des rues étroites et des couleurs claires limitant les apports solaires. Les tissus urbains traditionnels à cours présentent également de nombreux avantages microclimatiques, en particulier dans les climats tempérés. Les ouvertures sur cours permettent des apports solaires en hiver alors que les ouvertures sur rue sont protégées du soleil en été (Salat, 2011a). Ainsi, on peut dire que le climat a toujours influencé la conception de la ville

Plus récemment dans l'histoire des sciences, la climatologie urbaine, ayant pour objet les interactions entre ville et climat, est apparue. Cette science a permis de mettre en évidence l'effet d'ilot de chaleur urbain (ICU) : c'est à dire l'influence du cadre bâti sur le microclimat urbain*, se traduisant généralement par une élévation des températures dans la ville par rapport à la campagne environnante (Oke, 1982). Cet effet d'ilot de chaleur urbain a des conséquences bien réelles – en termes de biodiversité, de confort, de santé et de consommations énergétiques des bâtiments – qui inquiètent les acteurs de l'urbanisme et les habitants.

Ces conséquences sont d'autant plus préoccupantes qu'elles seront probablement accentuées par le changement climatique et le développement urbain en constante progression. D'une part, sous l'effet des émissions de GES, le climat se modifie et, selon le

* Voir glossaire

groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), cela devrait conduire à une augmentation des températures moyennes à l'échelle du globe et à une multiplication des phénomènes extrêmes comme les canicules (GIEC, Pachauri, & Reisinger, 2008). D'autre part, la population urbaine a aujourd'hui dépassé la population rurale à l'échelle du globe et la tendance se poursuit. Dans les pays développés, environ 75% de la population vit dans les zones urbaines et à l'horizon 2030, ce chiffre devrait monter à 84% de la population d'après les projections des Nations-Unies (UN - Habitat, 2006).

Ainsi, depuis quelques années, la recherche tente de considérer la question de l'énergétique urbaine* dans toute sa complexité. Car c'est bien une problématique très complexe tant elle convoque un large spectre de disciplines. Architectes, urbanistes, thermiciens, climatologues, modélisateurs, sociologues, géographes, etc. se réunissent autour de la question de la ville, du climat et de l'énergie.

Pour tenter d'apporter des connaissances nouvelles à ces problématiques, les outils de modélisation informatiques sont devenus essentiels à la recherche comme aux projets de conception urbaine et architecturale. Simulation du comportement thermique des bâtiments, du microclimat urbain, de l'étalement urbain*, du trafic routier, … les modèles sont nombreux mais rares sont les travaux qui convoquent suffisamment de disciplines pour rendre compte des interactions complexes entre systèmes urbains. L'une des raisons réside dans la confrontation des différentes échelles de travail de ces modèles. Nous verrons que l'un des vecteurs d'une recherche urbaine pluridisciplinaire est la création de bases de données multi-scalaires.

Ce mémoire s'organise en trois parties aux objectifs distincts et complémentaires.

Dans la première partie nous présenterons la problématique générale de cette thèse. Nous débuterons par un bref état de l'art des recherches en lien avec la ville, le climat et l'énergie. Nous poursuivrons par la mise en évidence du paradoxe énergétique urbain et nous verrons que les limites des recherches actuelles proviennent principalement de la difficulté à croiser plusieurs disciplines. Nous présenterons comment l'utilisation de bases de données adaptées peut solutionner une partie de ce problème. Après avoir passé en revue les différentes méthodes de construction de ces données pour l'énergétique urbaine, nous identifierons les évolutions attendues afin d'améliorer la polyvalence de ces bases de données.

Dans la deuxième partie, nous expliciterons la méthode retenue pour générer des bases de données multi-scalaires à l'aide de l'outil GENIUS développé au cours de cette thèse. Le

* Voir glossaire

premier objectif est de produire des données adaptées aux différentes échelles spatiales afin de permettre le croisement de différentes disciplines. Nous exposerons ensuite comment GENIUS permet de faire évoluer ces données afin de tenir compte des différentes échelles temporelles impliquées dans toute étude pluridisciplinaire.

Dans la dernière partie, nous présenterons les applications de GENIUS. En particulier, nous présenterons le cas de deux projets de recherche prospectifs et pluridisciplinaires ayant pour objet d'étude les interactions entre changement climatique et développement urbain.

Première partie : contexte et problématique

1. La ville, le climat, l'énergie

1.1. Introduction

Durant les dernières décennies, les recherches sur les bâtiments économes en énergie se sont largement développées : énergies renouvelables*, économies d'énergie (compacité*, isolation, inertie, apports solaires passifs*), performances des systèmes… Désormais, on envisage le bâtiment non seulement comme un consommateur mais également comme un producteur potentiel d'énergie.

Plus largement, les problématiques de l'énergétique urbaine ont été amplement questionnées. Qu'il s'agisse des consommations liées aux déplacements ou de celles liées au chauffage des bâtiments, la grande majorité des études s'accordent sur le fait qu'une ville économe en énergie est une ville dense* avec un bâti compact (Chen, Jia, & Lau, 2008; Rogers, 2000; Thomas & Cousins, 1996). En particulier, Maïzia et al. (Maïzia et al., 2009) et Steemers (Steemers, 2003) défendent le fait que des formes urbaines plus compactes réduiraient significativement les consommations d'énergie dans le secteur du bâtiment et des transports. Cependant, la plupart de ces études ne prennent en compte qu'une partie des facteurs impactant les consommations énergétiques de la ville, soit les consommations liées au chauffage, soit celles liées aux déplacements, rarement les deux simultanément. Il est aujourd'hui nécessaire d'interroger ce paradigme au regard d'une analyse multidisciplinaire, multi-scalaire, multi-temporelle.

Ce changement d'échelle spatiale et temporelle vers l'échelle de l'aménagement urbain nécessite la prise en compte des interactions entre morphologie urbaine*, énergie consommée et potentiellement produite par la ville et microclimat urbain. Une telle étude ne peut donc s'envisager que dans la pluridisciplinarité, c'est à dire dans l'association de plusieurs compétences et de plusieurs entités de recherche.

* Voir glossaire

1.2. La ville consommatrice d'énergie

La ville est particulièrement concernée par les consommations d'énergie et les émissions de GES associées. En 2011, le parc de bâtiments résidentiels et tertiaires français représentait 44,2% de la consommation énergétique finale française et le secteur des transports en représentait 32,0% (Commissariat général au développement durable, 2012b).

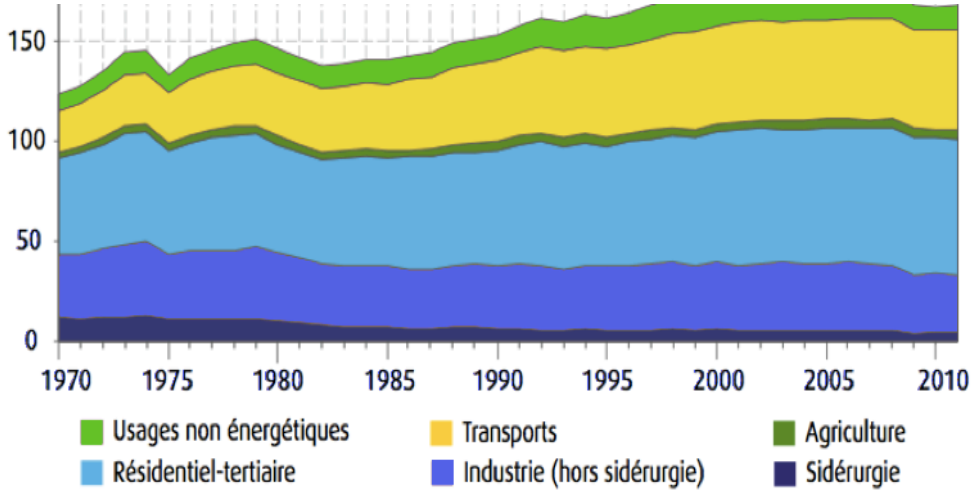


Figure 1 : Évolution des consommations d'énergie finale en France par secteur en million de tonnes équivalent pétrole (Commissariat général au développement durable, 2012b)*

Ces consommations énergétiques des villes sont à l'origine d'émissions de GES. En 2008, le secteur des transports arrivait en première position avec 38,1% des émissions françaises, suivi par le secteur des bâtiments résidentiels et tertiaires responsable de 25,9% des émissions (Commissariat général au développement durable, 2009).

* Voir glossaire

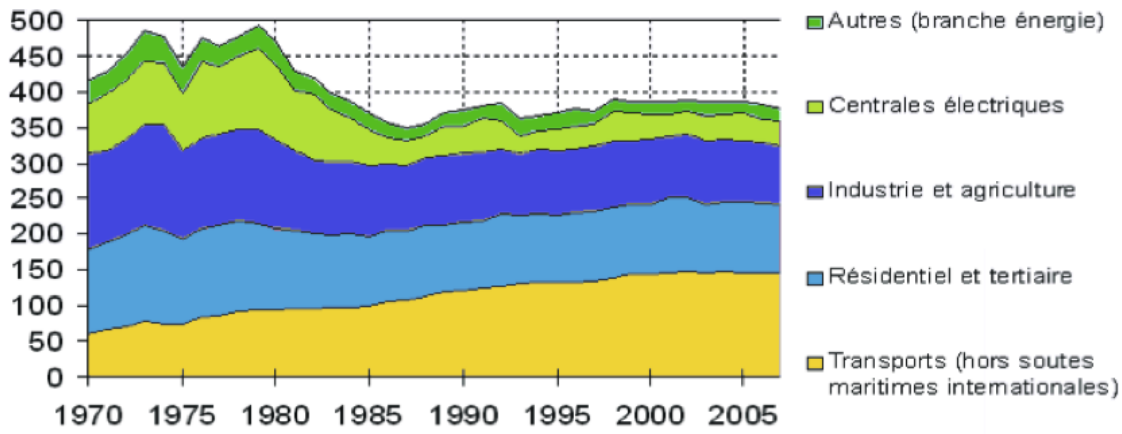


Figure 2 : Évolution des émissions de gaz à effet de serre en France par secteur en million de tonnes de CO_2 (Commissariat général au développement durable, 2009)

Comme on peut le voir sur la Figure 1 et la Figure 2, ces impacts environnementaux du secteur du bâtiment et du secteur des transports ne semblent pas diminuer et ce en dépit des constantes évolutions réglementaires (règlementations thermiques pour le parc de bâtiments et réglementations limitant les émissions de polluants pour le parc de véhicules). Or, les centres urbains concentrent la majorité de ces activités d'habitat et de transport (UN - Habitat, 2006). L'impact environnemental croissant des villes est donc principalement dû au développement urbain qui poursuit sa course depuis la révolution industrielle.

Dans les pays développés, environ 75% de la population vit dans les zones urbaines (77,5% en France en 2007 d'après l'INSEE (Clanché & Rascol, 2011)). D'ici l'horizon 2030, ce chiffre devrait monter à 84% de la population d'après les projections des Nations-Unies (UN - Habitat, 2006). Dans ce contexte d'augmentation de la population urbaine et d'extension des agglomérations, la consommation d'énergie des villes va s'accroitre. Afin de la limiter, il est nécessaire de comprendre les mécanismes urbains qui vont être influents.

1.2.1. Problématique et limites

Les enjeux énergétiques que doivent relever les villes ont mené à l'émergence de nombreux travaux scientifiques portant sur le lien entre morphologie urbaine et énergie consommée par les villes. Ces études ont conduit, au fil du temps, à l'idée généralement partagée par la classe politique, les concepteurs et le corps enseignant qu'une ville dense est une ville énergétiquement sobre, que ce soit en termes de consommations des bâtiments ou des transports. Sans rejeter cette position, nous verrons dans la suite de ce chapitre que des précautions sont à prendre : préserver des espaces pour de la végétation urbaine, respecter des contraintes d'ensoleillement minimum des bâtiments, composer une trame urbaine permettant la circulation de flux d'air, etc. Pour cela, nous nous intéresserons à la littérature

scientifique traitant du lien complexe entre morphologie urbaine et énergie consommée pour le chauffage, la climatisation, l'éclairage et la ventilation des bâtiments, les transports et l'énergie primaire totale des matériaux.

1.2.2. Consommations du bâti

De nombreuses études abordent la question du lien entre la morphologie urbaine et l'énergie consommée par le bâtiment (Adolphe, 2001; Ratti, Baker, & Steemers, 2005; Steemers, Baker, Crowther, Nikolopoulou, & Clocquet, 1996; J. P. Traisnel, 2001), chacune tendant à démontrer qu'une forme urbaine* compacte est plus efficace en termes de consommation de chauffage. Cela résulte principalement du fait que pour ces bâtiments, les surfaces d'enveloppe déperditives sont réduites par rapport au volume à chauffer. Dans la suite de ce chapitre nous citerons quelques exemples représentatifs de ces études.

Adolphe a montré dans le projet de recherche SAGACITE (Adolphe, 2001) que la compacité est l'un des indicateurs* morphologiques les plus significativement liés aux consommations de chauffage. Pour cela, la compacité nette moyenne des bâtiments a été calculée à l'aide du logiciel SIG* MORPHOLOGIC (Adolphe, 2003) pour une vingtaine de quartiers.

$$Compacité\ nette = \frac{Surface\ extérieure\ d'enveloppe\ non\ contiguë\ du\ bâtiment}{(Volume\ du\ bâtiment)^{2/3}}$$

Des modélisations avec le logiciel de simulation thermique dynamique ESP-r (ESRU, 2002) pour chacun de ces quartiers ont permis de montrer des corrélations très significatives entre les besoins* de chauffage des quartiers et leur compacité nette moyenne (voir Figure 3).

* Voir glossaire

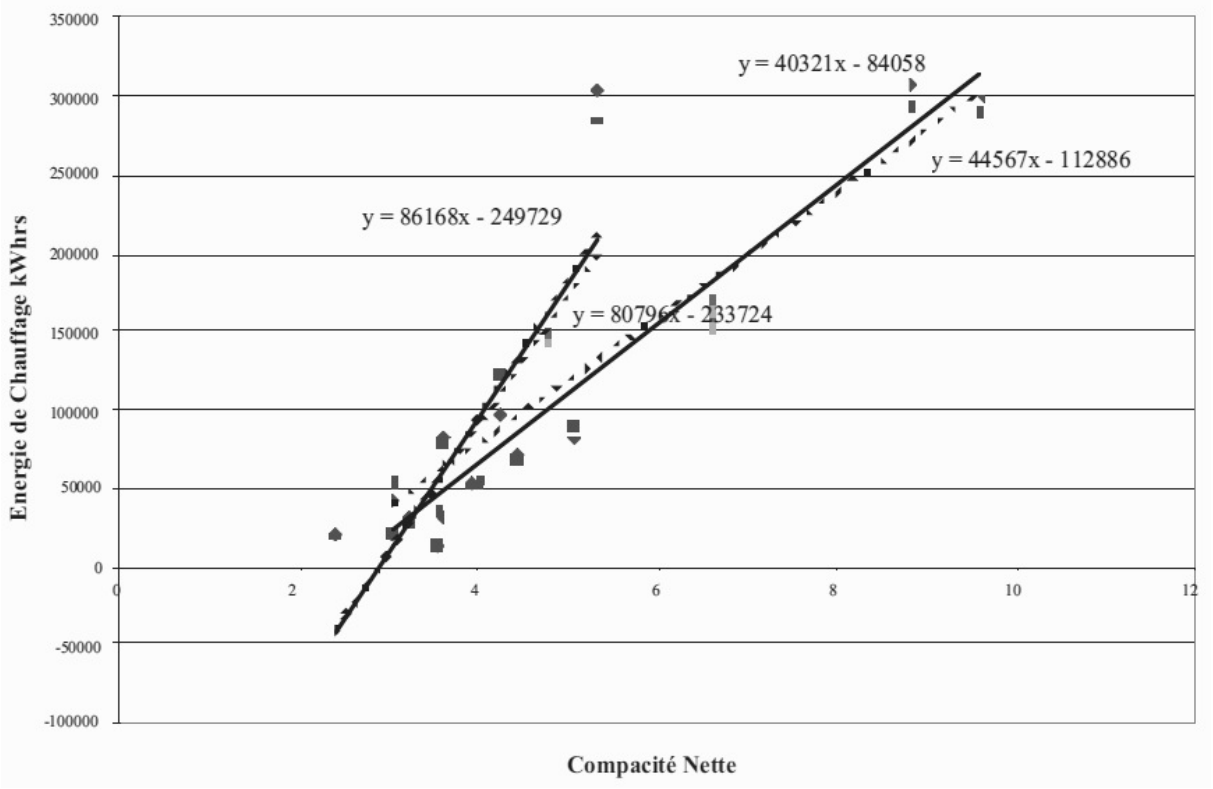


Figure 3 : Besoins énergétiques de chauffage pour plusieurs configurations de quartiers (Adolphe, 2001)

A une plus large échelle, l'Atelier Parisien d'Urbanisme (APUR) a réalisé une comparaison de neuf typologies* parisiennes prenant en compte la forme bâtie et des typologies d'isolation (Atelier Parisien d'URbanisme, 2007; Maïzia, 2007a). Cette étude fait apparaitre que les formes urbaines de type tour d'habitation consomment beaucoup plus d'énergie pour le chauffage que les formes urbaines traditionnelles parisiennes. Bien que l'étude montre que ces dernières sont plus denses et ont une contiguïté* plus élevée, il est difficile de tirer des conclusions sur l'impact des différentes morphologies car l'influence de l'isolation semble prépondérante.

De son coté, Jean-Pierre Traisnel a mis en exergue l'effet de la contiguïté du bâti sur les besoins de chauffage (J. P. Traisnel, 2001). A une première analyse morphologique, il associe une analyse typologique en comparant trois ensembles urbains : (1) un tissu traditionnel dense parisien (époque haussmannienne), (2) des grands ensembles et (3) des maisons individuelles en lotissement. La comparaison de ces trois types de quartier (voir Figure 4) met en avant le fait que, à niveau d'isolation thermique équivalente, les typologies denses sont bien plus performantes du point de vue des besoins de chauffage que les pavillons individuels, en raison de la contiguïté et de la compacité qui les caractérisent.

* Voir glossaire

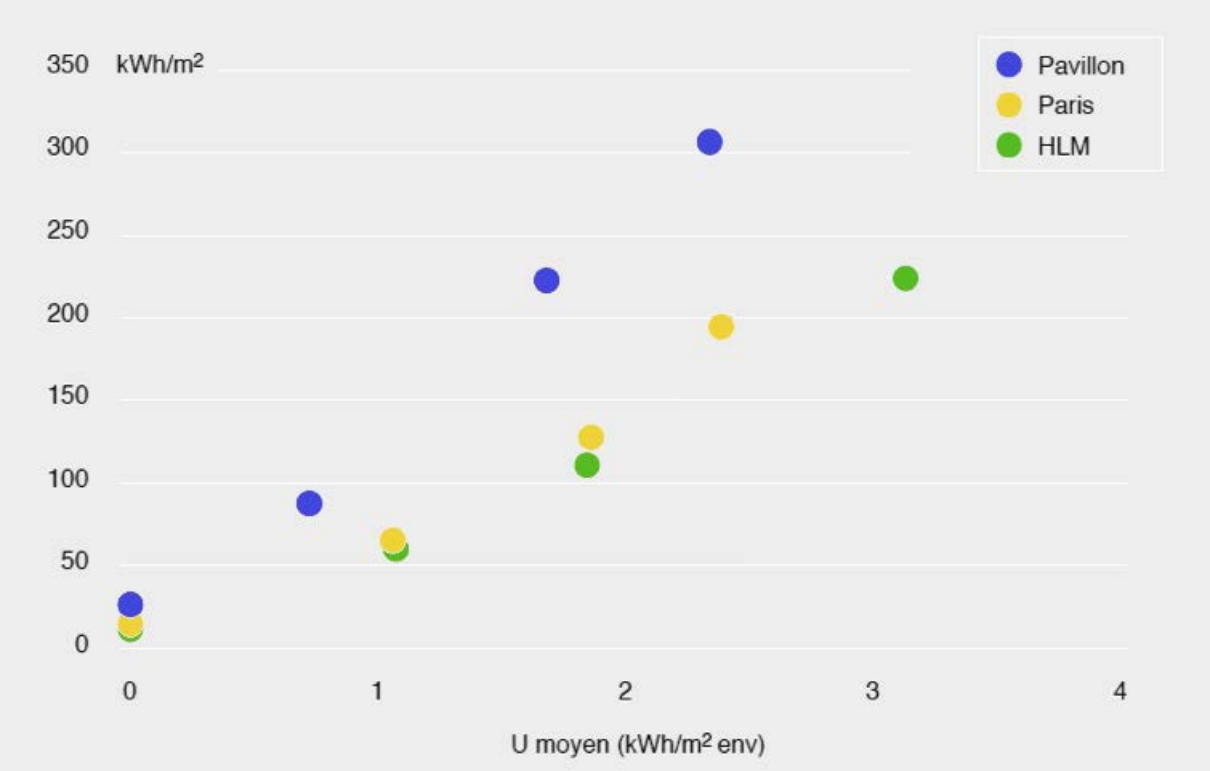


Figure 4 : Besoins de chauffage de trois morphologies urbaines en fonction de différentes performances d'isolation de l'enveloppe (J. P. Traisnel, 2001)

Cependant, il est nécessaire de noter que ces études prennent surtout en compte l'énergie liée au chauffage et à l'eau chaude sanitaire. Or, le lien entre forme urbaine dense et compacte et performance énergétique est moins évident dès lors que l'on prend en compte les consommations d'éclairage, de ventilation et de climatisation.

Les consommations de climatisation sont a priori réduites lorsque le bâti est compact (Hui, 2001) : moins de surface d'enveloppe représente moins d'échanges thermiques avec l'extérieur et moins d'apports solaires directs. De plus, dans une ville compacte, les bâtiments se font de l'ombre les uns aux autres ce qui réduit encore les apports solaires. Cependant, avec l'augmentation des performances thermiques des enveloppes (niveau d'isolation, émissivité, albédo*) et la probable augmentation des températures dans un contexte de changement climatique, le facteur microclimatique prend de plus en plus d'importance dans la réduction des consommations de climatisation (Smith & Levermore, 2008). Comme on le verra dans le chapitre 1.5, l'effet d'ilot de chaleur que l'on rencontre dans les milieux urbains va se traduire, entre autres, par une augmentation de la température de l'air et, de fait, des consommations de climatisation.

* Voir glossaire

De plus, la ventilation et l'éclairage naturels, qui permettent de réduire les consommations globales d'un bâtiment, ne sont pas favorisés par des formes urbaines denses et compactes (Hui, 2001). D'une part, la densité de la ville va avoir tendance à limiter la circulation du vent et donc réduire le rafraichissement et la ventilation naturels (Tablada, De Troyer, Blocken, Carmeliet, & Verschure, 2009). D'autre part, les ombres portées et les masques solaires générés par les bâtiments voisins vont réduire les apports lumineux et augmenter les consommations d'éclairage artificiel (Cheng, Steemers, Montavon, & Compagnon, 2006). Pour finir, dans le cas de bâtiments compacts, la réduction de la surface d'échange entre le bâtiment et son environnement va limiter les apports de lumière et de ventilation naturelle. Cette question est évoquée par Baker et Steemers au travers du volume passif (Baker & Steemers, 2004). Cet indicateur morphologique correspond à la somme des volumes compris à moins de six mètres d'une façade et supposés pouvoir être éclairés et ventilés naturellement. D'après Salat, le volume passif doit être maximisé, quitte à négliger la compacité (Salat, 2007). Nous présenterons ses travaux plus en détail dans le chapitre 2.2.2.

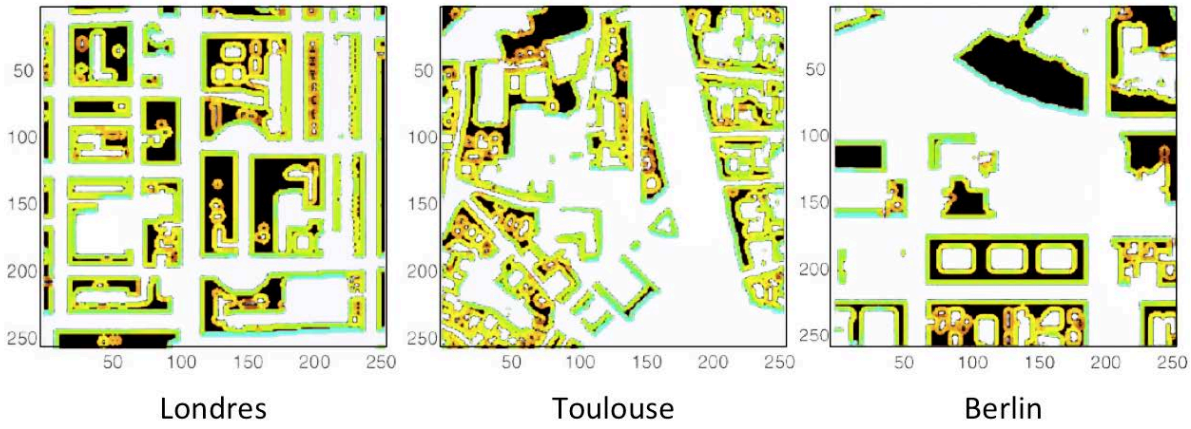


Figure 5 : Volumes passifs dans trois tissus urbains (Salat, 2011b)

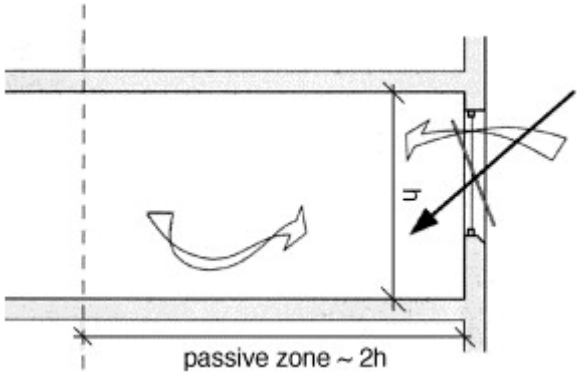


Figure 6 : Illustration du volume passif sur une coupe (Ratti et al., 2005)

Bien que les consommations de climatisation, d'éclairage et de ventilation soient évoquées dans les études citées précédemment, elles sont rarement toutes prises en compte dans le calcul global des consommations énergétiques. La plupart du temps, les besoins de chauffage seuls sont pris en compte. Il est donc difficile aujourd'hui de conclure sur l'intérêt d'une forme urbaine par rapport à une autre au regard des consommations énergétiques globales du bâtiment.

1.2.3. Consommations liées aux déplacements

La densité comme consensus

L'état de l'art concernant le lien entre transport et forme urbaine est vaste et les théories contrastées. Cependant, la grande majorité des études s'accorde sur le fait que, tant en nombre de déplacements qu'en distance, les consommations énergétiques liées au transport sont plus faibles pour les villes denses que pour les agglomérations étalées. Cela s'explique par trois phénomènes combinés : (1) la réduction des distances de déplacement consécutive à la réduction de l'étalement urbain, (2) le développement d'infrastructures de transports en communs et de transports doux* qui est facilité dans les zones à forte densité de population et (3) la mixité fonctionnelle et les aménités urbaines présentes dans des zones denses qui limitent les distances de déplacements.

On peut bien sûr citer la très célèbre étude de Newman et Kenworthy qui a permis de relier la densité de population globale d'une ville à ses consommations de carburants (voir Figure 7). Ces travaux constituent une contribution majeure du domaine et ont influencé nombre de décideurs politiques. Au travers de l'étude de 37 villes d'Europe, d'Amérique du Nord, d'Australie et d'Asie, Newman et Kenworthy ont mis en avant les avantages de la densification des villes en prenant au regard exclusif des aspects suivants : (1) les distances parcourues en automobile pour les trajets quotidiens, (2) le taux moyen d'occupation des automobiles, (3) le nombre de voyageurs et les distances moyennes parcourues pour chaque mode de transport collectif et (4) les consommations moyennes de chaque mode de transport (Newman & Kenworthy, 1989).

* Voir glossaire

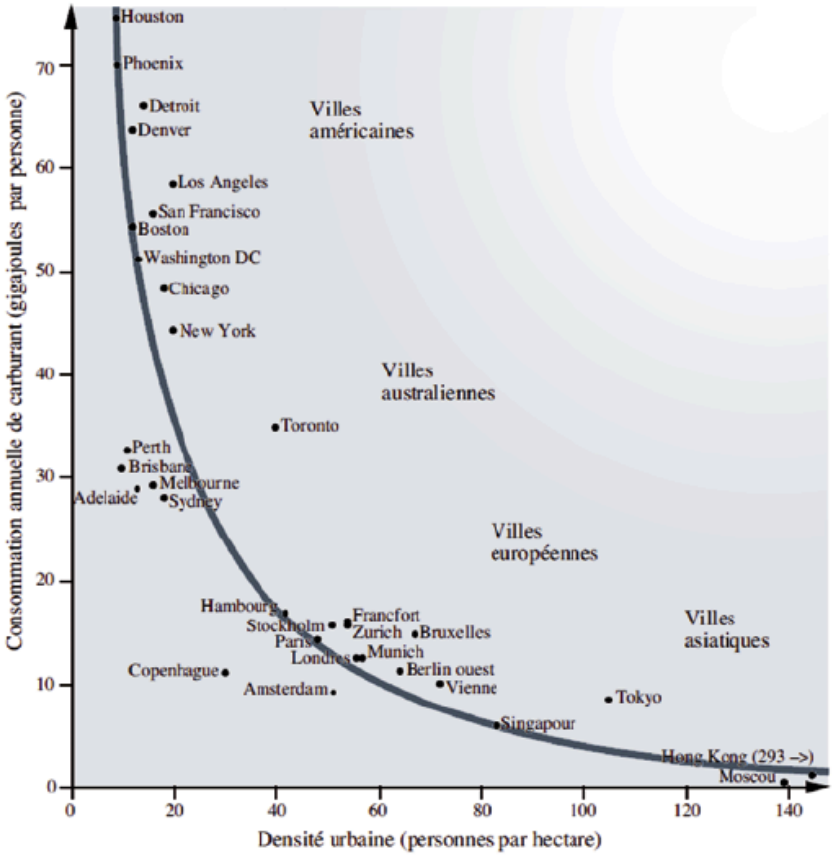


Figure 7 : Consommation de carburant et densité urbaine d'après (Newman & Kenworthy, 1989) (version française publiée par Frédéric Héran, 2001)

Encore aujourd'hui, ces résultats demeurent globalement valables comme l'ont montré d'autres études, en particulier en Amérique du Nord. On peut par exemple citer les travaux de Brownstone et Golob (Brownstone & Golob, 2009) qui ont comparé les consommations de carburant de ménages californiens situés dans des zones résidentielles de différentes densités.

Des précautions nécessaires

Cependant, Newman et Kenworthy et leurs conclusions ont depuis été largement questionnés. A peu près à la même époque, un autre chercheur américain, Ewing, s'est appuyé sur l'étude de la ville de Los Angeles pour démontrer que l'étalement urbain conduisait à une réduction des temps de déplacements (Ewing, 1997).

D'autres travaux de recherches (Desjardins, 2010; Larivière & Lafrance, 1999; Mindali, Raveh, & Salomon, 2004; Owens, 1995) ont également mis en avant les limites de ce type

d'étude parmi lesquelles le fait de ne pas tenir compte de la mobilité longue distance*, ni des trajets autres que pendulaires, ni de l'effet des embouteillages sur la pollution, ni des variations des pratiques selon les pays, ni des variabilités socio-professionnelles.

Dès les premières recherches sur la question à la fin des années 1980, un courant de pensée dit « libéral » produit des études scientifiques pour la défense des villes étalées. On peut citer les travaux de Gordon et Richardson ou encore de Levinson et Kumar qui défendent la théorie suivant laquelle, dans un contexte peu dense, ménages et entreprises réajustent régulièrement leurs localisations pour réduire les coûts de déplacement (Gordon & Richardson, 1997; Levinson & Kumar, 1997). Ainsi, l'impact environnemental des déplacements est réduit sous l'influence de mécanismes de marchés économiques. Notons cependant que les travaux qui fondent ce courant sont essentiellement nord-américains, c'est à dire issus d'un contexte géographique où l'étalement urbain est moins problématique qu'en Europe ou en Asie (en raison de l'échelle du territoire) et où le faible coût des énergies fossiles ne constitue pas un frein à l'usage des véhicules individuels.

Afin d'illustrer les limites des travaux de Newman et Kenworthy, on peut citer d'autres études où la prise en compte des phénomènes de congestion conduit à des conclusions plus nuancées (Breheny, 1995; Hui, 2001; Smit, Brown, & Chan, 2008). C'est également l'un des constats de Lydie Laigle suite à une étude ayant pour objet les relations entre mobilité et formes urbaines dans la ville de Barcelone. Elle note que la forte congestion et les trajets courts qui caractérisent cette ville compacte sont à l'origine d'importantes émissions de CO_2 (Laigle et al., 2012).

Boarnet et Crane (Boarnet & Crane, 2001) ont eux estimé que si le prix du trajet était pris en compte dans ce type d'analyse, la densité urbaine se révèlerait comme un facteur faiblement déterminant dans les consommations énergétiques liées aux déplacements.

Par ailleurs, la prise en compte de la mobilité longue distance peut conduire à des tendances inversées par rapport à celles mises en avant par Newman et Kenworthy. En effet, comme l'explique Hélène Nessi, si les ménages vivants en milieu urbain dense ont moins de poids dans la mobilité quotidienne*, ce sont eux qui se déplacent le plus si l'on rajoute la mobilité longue distance et les trajets du week-end (Nessi, 2010). Ce phénomène est avant tout socio-économique : en Europe, les centres urbains denses accueillent des ménages plus aisés qui ont les moyens de voyager plus et plus loin. Mais l'explication est aussi à rechercher dans la qualité de l'aménagement urbain. Des chercheurs norvégiens ont montré que l'accès à un jardin réduisait la mobilité dans tous les contextes urbains (Holden & Norland, 2005).

* Voir glossaire

Cette théorie était déjà avancée par Jean-Pierre Traisnel qui a comparé les consommations de mobilité quotidienne et longue distance pour trois typologies parisiennes démontrant ainsi que les formes urbaines denses sont celles où la mobilité longue distance est la plus élevée, compensant ainsi les économies de transports réalisées au quotidien (J. P. Traisnel, 2001).

Les facteurs sociaux économiques font globalement défaut à l'étude de Newman et Kenworthy. Il est évidemment difficile de comparer des consommations de carburant dans des pays différents. En effet, les climats, les cultures, la technologie des véhicules et les moyens économiques y sont extrêmement variés et induisent inévitablement des comportements très différents en termes d'usages des véhicules personnels. Les recherches de van de Coevering et Schwanen mettent également en avant que la dimension historique du développement des villes joue sur les transports un rôle tout aussi important que la densité de population. Par exemple, les centres villes historiques qui n'ont pas été conçus pour la voiture sont bien plus propices aux déplacements doux que la plupart des quartiers (van de Coevering & Schwanen, 2006).

Cette problématique est très largement explorée dans les travaux de Bertaud. Ce dernier met en avant que la densité moyenne n'est pas un critère suffisant pour évaluer les consommations liées aux transports (Bertaud & Malpezzi, 2003; Bertaud, 2004). Il défend que la manière dont cette densité se répartie dans la ville et la structure urbaine existante sont des facteurs bien plus influents. Il illustre cette théorie en comparant les villes d'Atlanta et de Barcelone. Dans la ville d'Atlanta, très peu dense, seul 4% de la population vit à moins de 800 m d'une station de métro. S'il fallait que cette ville atteigne l'accessibilité de Barcelone (60% de la population à moins de 800 m d'une station de métro) seules deux solutions seraient possibles : (1) étendre le réseau de transport en commun ou (2) augmenter la densité de population à proximité du réseau existant. D'après Bertaud, la première solution reviendrait à ajouter 3400 km de réseaux (contre 74 km de métro à Atlanta et 99 km à Barcelone). La deuxième solution reviendrait à détruire 67% du stock de bâtiments pour déplacer la population et les emplois dans les 33% de la ville restants. Aucune de ces solutions n'est réalisable pour la ville d'Atlanta. D'après Bertaud, une autre ville peu dense mais à dominante mono-centrique permettrait une mise en œuvre plus aisée d'un réseau de transport en commun. La structure existante de la ville contraint donc la faisabilité de transports en commun efficients (voir Figure 8).

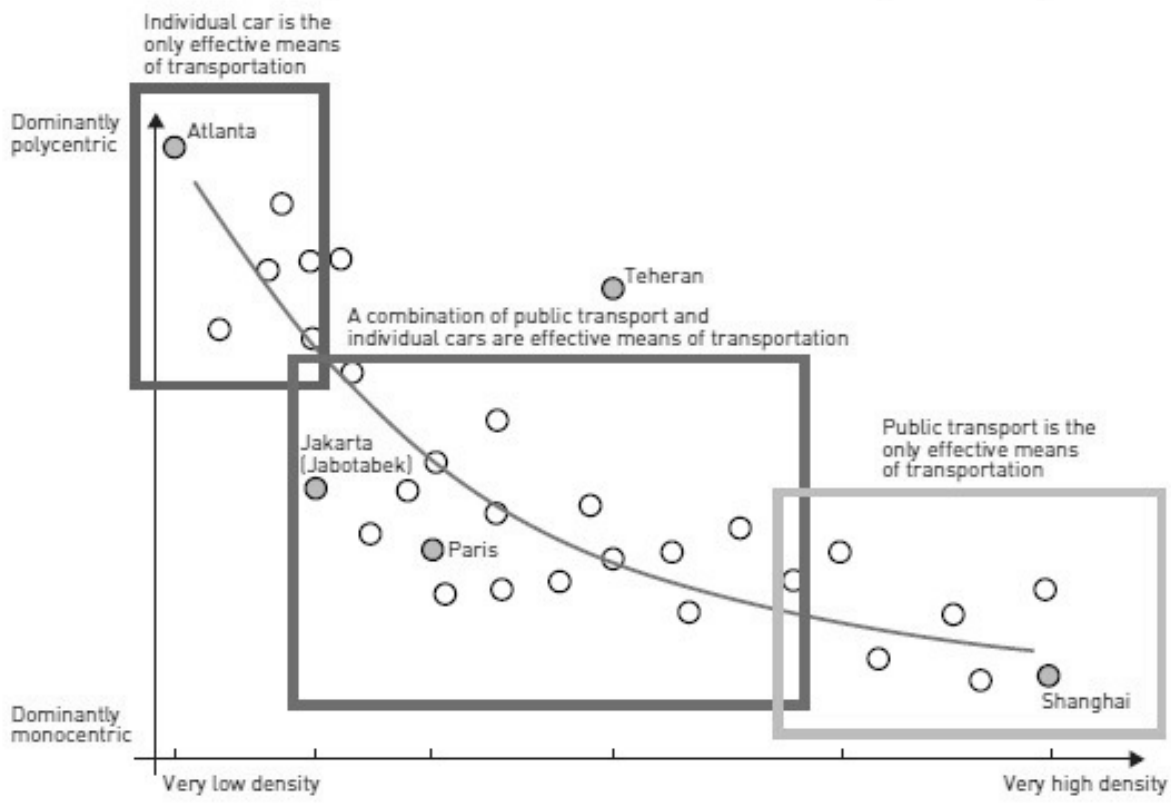


Figure 8 : Relation entre la structure spatiale et l'efficacité des transports publics d'après Bertaud (version publiée par Laigle, 2012)

La structure urbaine a également un impact sur les déplacements en véhicules privés. Contrairement à ce que l'on aurait pu penser, une ville polycentrique ne permet pas forcément de réduire les consommations de transports liées aux véhicules individuels, principalement en raison du fait que les ménages ne sont pas forcément localisés dans les mêmes pôles que leurs emplois (Bertaud, 2004). Ainsi, en Europe et en Amérique du Nord, une ville polycentrique génère des déplacements tangentiels alors que les réseaux de transport publics sont généralement radiaux (Aguiléra, Madre, & Mignot, 2004; Cervero & Wu, 1997; Schwanen, Dieleman, & Dijst, 2001). En revanche, cela conduit à moins de congestion et donc à des temps de trajet globalement plus courts (Sultana, 2000).

Aguiléra, Madre et Mignot font remarquer que la nature des pôles a également un impact sur les déplacements (Aguiléra et al., 2004). Plus largement, la mixité fonctionnelle est un élément essentiel de la mobilité. Plusieurs travaux ont mené à la conclusion que la présence de logements abordables dans des quartiers où l'on trouve des emplois et / ou des services de proximité réduisait les distances de transports et facilitait la mise en place et l'utilisation de transports en communs ou de transports doux (Krizek, 2003; Kuzmyak, Pratt, Douglas, & Spielberg, 2003).

Pour finir, la conception même des réseaux de transport est primordiale. Comme on a pu le voir dans le cas des structures de villes polycentriques, un réseau radial ne correspond pas toujours aux besoins de déplacement des habitants. Les grands ensembles sont un autre exemple de cette problématique : nombreux sont ceux qui attribuent leur échec au fait que ces quartiers ont souvent été implantés en périphérie de la ville, partiellement déconnecté du réseau de transport de celle-ci. Aujourd'hui encore, il est fréquent de voir des opérations immobilières ne pas rencontrer le succès escompté car elles se situent dans des quartiers difficiles à relier au reste de la ville. Structure urbaine et structure des réseaux de déplacement doivent donc être pensées de pair (Dupuy, 1991).

En conclusion il apparaît que les villes denses consomment globalement moins d'énergie pour les transports que les villes étalées. Cependant, un regard élargi résultant d'approches pluridisciplinaires de la question permet de nuancer ces conclusions.

1.2.4. Énergie primaire totale des matériaux pour le bâti et les réseaux

La comparaison de différentes morphologies urbaines amène à s'interroger sur les consommations liées aux matériaux qui constituent ces différentes formes.

Dans la littérature traitant de cette problématique, on trouve parfois le terme d'énergie grise qui désigne l'énergie nécessaire à l'élaboration d'un produit (Niemann, 2006). Bien qu'il n'existe pas de définition officielle de l'énergie grise, on peut la décomposer en deux éléments : l'énergie procédé (énergie consommée par les procédés de transformation, de transport, de mise en œuvre, de déconstruction …) et l'énergie matière (énergie contenue dans le produit qui correspond à une mobilisation d'une matière première avec un pouvoir calorifique) (Chevalier, 2010; Cornillier & Vial, 2008). L'énergie primaire totale d'un produit, définie par la norme NF P01-010, relative au format de communication des données environnementales et sanitaires des produits de construction, est égale à l'addition des énergies matière et procédé (AFNOR, 2004).

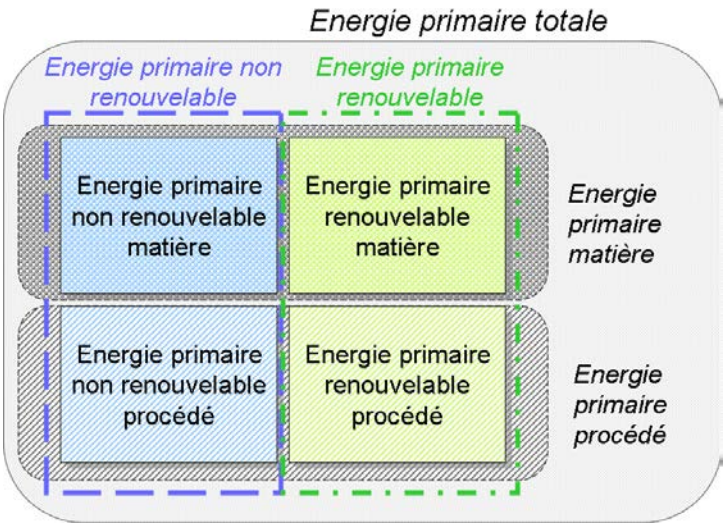


Figure 9 : Différents éléments de l'énergie primaire totale ou énergie grise (Chevalier, 2010)

A priori, on peut penser qu'une forme urbaine compacte présentant une contiguïté importante permet de réduire la surface d'enveloppe extérieure des bâtiments et éventuellement de réduire la quantité de matériaux nécessaire. De plus, les formes urbaines denses limitent les réseaux (en particulier les réseaux routiers) ce qui pourrait également réduire l'énergie primaire totale de ces quartiers. La densité urbaine pourrait être un facteur favorable à la limitation des consommations d'énergie primaire totale des matériaux urbains.

Certains auteurs présentent cependant la question sous un autre angle : une ville plus dense pourrait impliquer des modes constructifs à plus forte intensité énergétique, principalement pour des raisons structurelles. Par exemple, les immeubles de grandes hauteurs nécessitent des fondations plus profondes, plus d'acier, des équipements plus nombreux, etc. C'est notamment la thèse de Steadman qui y voit un argument en faveur des villes étalées (Steadman, 1977).

Cependant, même s'il existe des études évaluant l'énergie primaire totale des matériaux d'une ville (Huang & Hsu, 2003), peu d'études traitent aujourd'hui du lien entre cette énergie et la morphologie urbaine (Hui, 2001). Il est donc difficile de tirer des conclusions à partir des quelques exemples et théories présentés ci-après.

On peut cependant citer l'analyse de Traisnel qui a évalué l'énergie primaire totale des matériaux nécessaire à trois typologies ; d'une part pour le bâti et d'autre part pour les réseaux routiers (J. P. Traisnel, 2001). Comme vu précédemment, il compare trois ensembles urbains : (1) un tissu traditionnel dense parisien (époque haussmannienne), (2) des grands ensembles et (3) des maisons individuelles en lotissement. La comparaison de ces trois types

de quartier (voir Tableau 1) montre que l'immeuble parisien, qui contient une masse de briques importante, présente un coût énergétique plus élevé que les autres typologies par unité de surface (+ 50% par rapport à la maison individuelle). Il serait intéressant de répéter ce type d'étude avec des matériaux comparables afin d'évaluer l'effet de la morphologie urbaine seule. Cependant, Traisnel fait remarquer que des formes urbaines denses et compactes telles que les immeubles collectifs nécessitent souvent « l'emploi de matériaux de performance structurelle plus élevée, principalement l'acier, associé ou non au béton, mais de coût énergétique également supérieur ».

Tableau 1 : Énergie primaire totale des matériaux de construction pour trois ensembles urbains (J. P. Traisnel, 2001)

	Immeuble Paris 1900	HLM 1960 solution moyenne	Pavillon 1950	Pavillon 1990
I, Investissement énergétique initial (en GJ/m2)	4,93 (base 1950)	3,53 (base 1950)	3,28 (base 1950)	2,89 (base 1990)

Par ailleurs, dans cette même étude, le chercheur compare les typologies en fonction de l'énergie primaire nécessaire à la mise en place de réseaux routiers (voir Tableau 2). Les tendances sont alors beaucoup plus défavorables pour les types « maison individuelle » et « grands ensembles » dont les tissus urbains peu denses nécessitent le développement de grandes surfaces de voiries par rapport au nombre de logement.

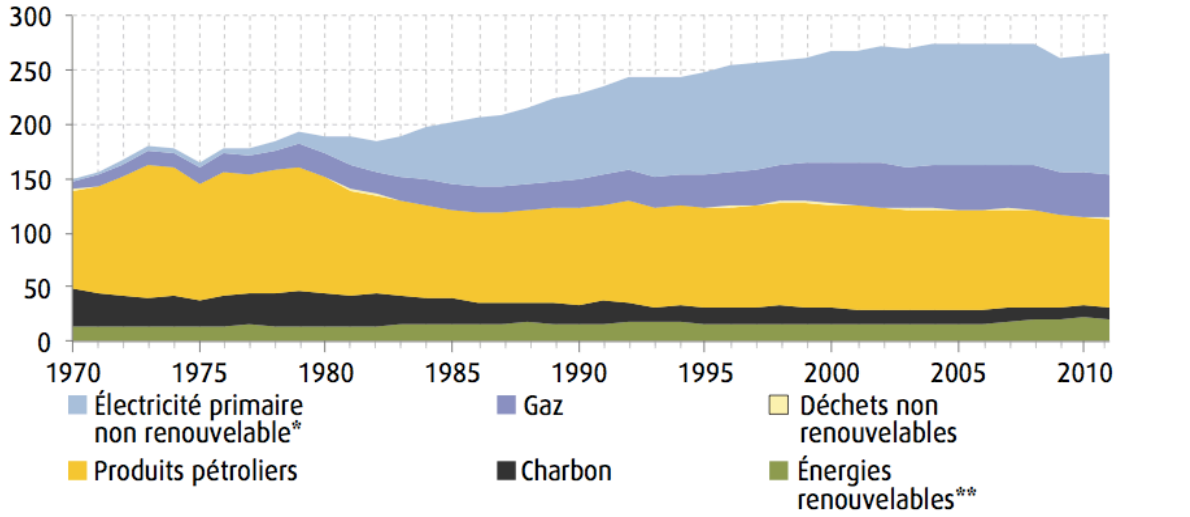
Tableau 2 : Parts de la voirie dans la consommation d'énergie (construction initiale) par mètre carré de logement pour trois ensembles urbains (J. P. Traisnel, 2001)

	Paris	HLM	Pavillon
Voirie (MJ/m2)	123,0	341,6	450,5
Total (MJ/m2)	4459,7	3487,5	3338,9
% voirie	2,8	9,8	13,5

On peut finalement rappeler que la rénovation et la reconstruction urbaine vont avoir des impacts importants sur l'énergie primaire totale des matériaux. Bien que des études aient été menées à l'échelle du bâtiment sur l'influence de la durée de vie des bâtiments (Méquignon, Ait Haddou, Thellier, & Bonhomme, 2013), rares sont celles qui traitent de l'échelle urbaine dans sa globalité en prenant en compte le bâti et les réseaux sur une échelle temporelle large.

1.3. La ville productrice d'énergie

En France, un des objectifs phares du Grenelle de l'environnement concerne l'augmentation de la production d'énergie à partir de sources renouvelables afin d'atteindre 23% des consommations d'énergie en 2020 (Commissariat général au développement durable, 2012a). Or, en 2011, seul 7,9 % de la consommation d'énergie primaire française provenait de sources renouvelables (Commissariat général au développement durable, 2013). Si cette production reste stable dans le temps, la part des énergies renouvelables sur la consommation d'énergie primaire totale diminue (voir Figure 10). La question de l'intégration des énergies renouvelables au cadre bâti se pose alors comme prioritaire, y compris dans un contexte urbain.



* Comprend la production nucléaire, déduction faite du solde exportateur d'électricité (pour simplifier, le solde exportateur d'électricité est retranché de l'électricité nucléaire) et la production hydraulique par pompage.
** Ensemble des énergies renouvelables primaires électriques et thermiques.

Figure 10 : Évolution de la consommation d'énergie primaire en millions de tonnes équivalent pétrole (Commissariat général au développement durable, 2013)

Cette échelle urbaine d'implantation des énergies renouvelables est une préoccupation nouvelle. En 2009, un rapport de l'agence internationale de l'énergie (IEA, 2009) soulignait l'intérêt et la possibilité d'intégrer des systèmes d'énergies renouvelables dans le tissu urbain. Plusieurs raisons sont évoquées, comme la possibilité de réduire localement les émissions de polluants, de réduire les pertes en lignes, d'apporter une réponse à la précarité énergétique d'une partie des ménages (les locataires de logements sociaux équipés de systèmes de production d'énergie renouvelable voient leurs factures énergétiques réduites) etc.

En France, la transition vers une gestion à l'échelle urbaine des énergies renouvelables est en cours. L'État transfère une grande partie des responsabilités en la matière aux établissements publics de coopération intercommunale. Ainsi, sur le terrain, les actions politiques locales peuvent prendre des formes variées comme la création d'éco-quartiers, d'agendas 21, de plans climat territoriaux, etc.

On peut citer l'exemple de la communauté urbaine du Grand Lyon qui a fait évaluer, dans le cadre de son Plan Climat Territorial, le potentiel en énergies renouvelables de son territoire (Bureau d'études AXENNE, 2007). Le bureau d'étude en charge de cette mission a estimé la capacité de production d'énergie renouvelable entre 10 et 15% des consommations du Grand Lyon au travers d'énergie solaire thermique et photovoltaïque, de bois énergie, d'hydroélectricité, de géothermie, de biogaz, de valorisation des déchets et d'éolien. On peut également faire référence à la ville de Sénart qui évalue à 26% la couverture possible de ses consommations d'électricité par des énergies renouvelables (Bureau d'études Explicit, 2011). A Toulouse, le Plan Climat a permis de faire un diagnostic de l'usage actuel des énergies renouvelables et a fixé l'objectif de doubler ce potentiel (Bureau d'études Futur Facteur 4, Bureau d'étude CRP Consulting, Bureau d'études Écologie Urbaine, Bureau d'études Énergies Demain, & Bureau d'études Anewworld, 2012).

Notons que les Plans Climat Territoriaux ne revêtent pas tous le même degré d'exhaustivité. Si certains, comme celui du Grand Lyon, prennent en compte une dimension prospective dans l'évaluation d'un potentiel de production d'énergies renouvelables et tiennent compte de l'impact de la morphologie urbaine, d'autres n'abordent que très peu ces questions.

Par ailleurs, malgré les recommandations de l'ADEME à ce sujet, il est rare que les Plans Climat Territoriaux prennent en compte l'impact du changement climatique sur le potentiel de production d'énergies renouvelables (ADEME, 2013). Ces impacts peuvent être de deux types. D'une part, l'augmentation des températures va provoquer une modification des profils de consommation énergétiques des bâtiments. Il est probable que les consommations de climatisation augmentent en période estivale et que les consommations de chauffage diminuent en hiver. D'autre part, les évènements climatiques extrêmes qui sont susceptibles de se multiplier avec le changement climatique auront un impact direct sur les réseaux (rupture d'alimentation énergétique), mais également sur la production énergétique : la production hydro-électrique deviendra plus aléatoire sous l'effet d'une perturbation de la pluviométrie ; les systèmes de refroidissement des centrales thermiques et nucléaires perdront de leur efficacité dans un contexte d'augmentation des températures de l'air et des eaux (Salagnac, 2007a) etc.

1.3.1. Problématique et limites

Le rapport de l'Agence Internationale de l'Énergie cité précédemment met en avant que la conception urbaine est un facteur clé de l'intégration des énergies renouvelables dans la ville (IEA, 2009). Cependant, comme le font remarquer Vettorato, Geneletti et Zambelli, le critère de l'optimisation de la production d'énergies renouvelables est rarement pris en compte dans la planification et la conception urbaine (Vettorato, Geneletti, & Zambelli, 2011). En effet, comme le souligne Butera, les planificateurs urbains se basent plus souvent sur l'alignement aux routes existantes que sur la rose des vents et le parcours du soleil pour établir les documents règlementaires (Butera, 2011).

De nombreux travaux de typo-morphologie urbaine ont permis de conclure qu'une ville dense avec un bâti compact et performant est une ville énergétiquement sobre, avec cependant un certain nombre de réserves que nous avons présentées au chapitre 1.2. Cependant, plus rares sont les études qui mettent en perspective ces résultats avec le potentiel de production d'énergie renouvelable dans une ville. Or, comme nous allons le voir, cette question est susceptible de remettre en cause le paradigme de la densité urbaine. Afin d'approfondir cette question, nous nous intéresserons à la littérature scientifique traitant du lien complexe entre morphologie urbaine et énergie renouvelable potentiellement produite. Nous faisons l'hypothèse que la morphologie urbaine et la localisation des bâtiments dans la ville auront principalement un impact sur les énergies renouvelables solaire, éolienne, biomasse et géothermique.

1.3.2. Énergie solaire

La ville, et plus spécifiquement la densité bâtie, réduisent l'ensoleillement incident sur les façades et les capteurs au travers de deux phénomènes.

D'une part, le trouble atmosphérique, ou turbidité (quantité de poussières, aérosols et gouttelettes d'eau dans l'air) résultant de la pollution urbaine réduit l'ensoleillement de 10 à 3% (Ringenbach, 2004). En effet, les particules en suspension dans l'air absorbent et diffusent le rayonnement solaire (Ringenbach, 2004; Sacre, 1983). Des chercheurs ont démontré que l'atténuation du rayonnement solaire direct peut atteindre 30% dans des villes très polluées (le rayonnement diffus augmente en contrepartie mais sans compenser les pertes) (Ringenbach, 2004). Ce phénomène va donc contribuer à réduire le potentiel d'énergie solaire dans les centres urbains concentrant une forte activité humaine et donc une forte pollution atmosphérique. De plus, la pollution de l'air se traduit également en dépôt de poussière sur les panneaux solaires qui vont perdre peu à peu de leur efficacité (Close, 1996).

D'autre part, les bâtiments constituent les uns pour les autres des masques solaires réduisant l'ensoleillement diffus et direct (Robinson & Stone, 2004). Ce phénomène et le lien qu'il entretient avec la morphologie urbaine est exploré dans de nombreux travaux, souvent pour l'impact qu'il peut avoir sur la captation solaire passive (Alzoubi & Alshboul, 2010; Bourbia & Awbi, 2004; Montavon, 2010). Beaucoup de ces travaux exposent l'importance du prospect et du facteur de vue du ciel sur l'ensoleillement des façades et des toitures. Le prospect correspond au rapport entre la hauteur d'un bâtiment en vis-à-vis et la distance qui le sépare du point de mesure (généralement au pied de la façade du bâtiment étudié). Il va grandement influencer la portion de voute céleste visible depuis la façade du bâtiment étudié et, en fonction de l'orientation des bâtiments, les ombres portées d'un bâtiment sur l'autre (Adolphe et al., 2002).

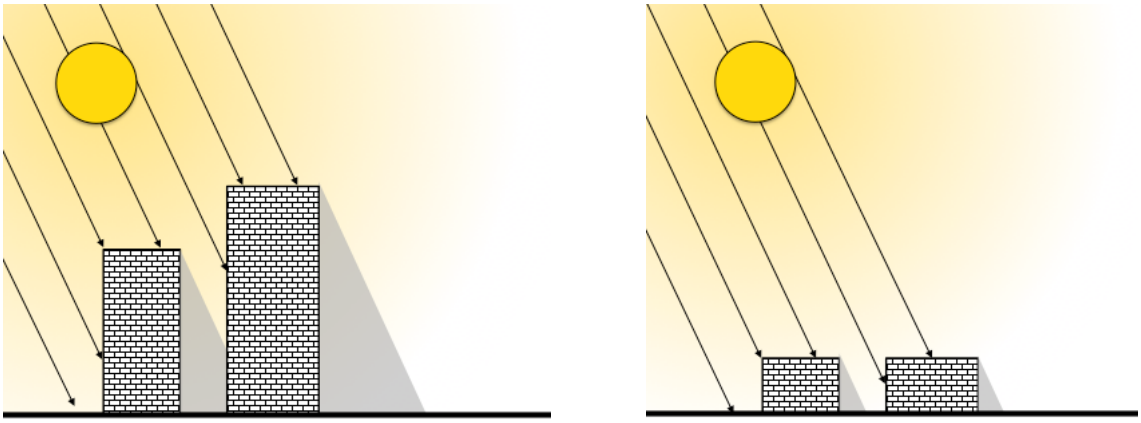


Figure 11 : Différents prospects (illustration de l'auteur)

Le facteur de vue du ciel correspond à la portion de ciel observable à partir de la surface considérée selon une projection stéréographique. Ce facteur varie entre 0 et 1 (1 correspondant au cas d'une surface plane sans obstacle). Plus la ville est dense, plus le facteur de vue du ciel est faible, et plus l'ensoleillement est réduit (Adolphe et al., 2002).

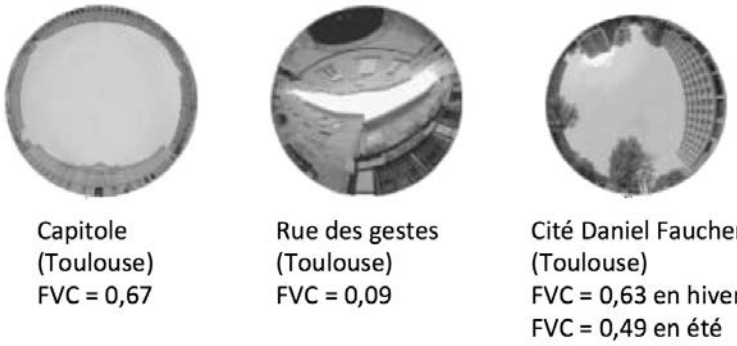


Figure 12 : Différents facteurs de vue du ciel à Toulouse (Adolphe et al., 2002)

Parmi les recherches les plus emblématiques de la prise en compte de l'ensoleillement dans l'aménagement urbain on peut citer les travaux de Knowles et son concept d'enveloppe solaire. En tenant compte des masques solaires bâtis, ce chercheur a proposé la matérialisation d'un volume dans lequel un nouveau bâtiment pourrait s'inscrire sans compromettre l'accès au soleil des bâtiments voisins ni ses propres besoins (Knowles et Berry 1980).

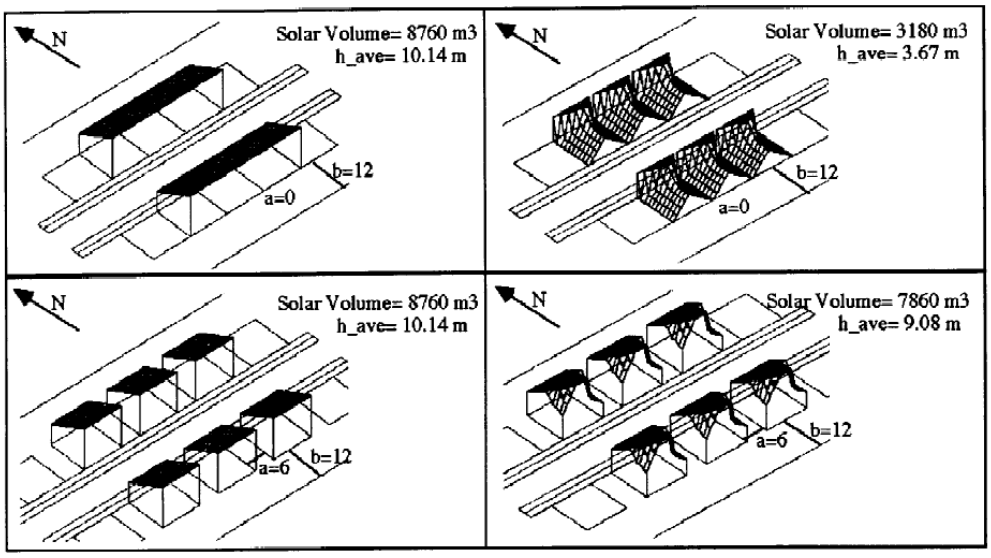


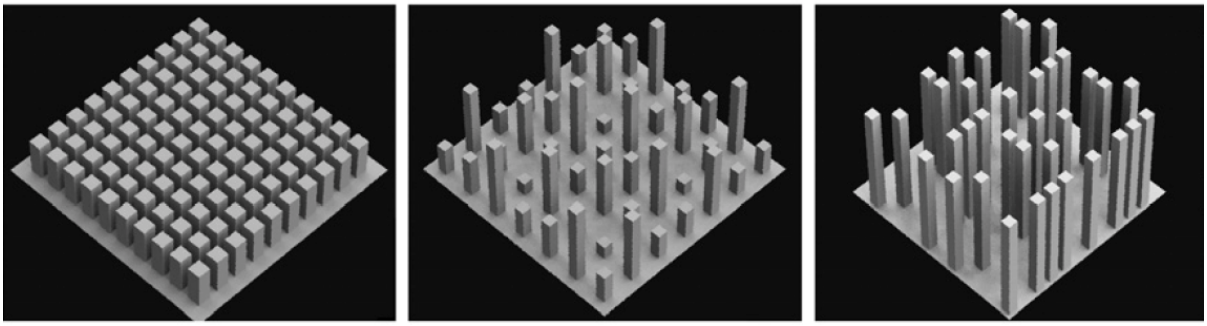
Figure 13 : Enveloppe solaire - à gauche : accès solaire aux façades Sud, A droite : accès solaire à toutes les façades (Capeluto & Shaviv, 2001)

Ces travaux ont été utilisés par la suite par de nombreux chercheurs, dont Capeluto et Shaviv qui ont voulu démontrer qu'il est possible de combiner accessibilité solaire et densité bâtie brute (Capeluto & Shaviv, 2001). Cependant, les densités proposées par ses travaux restent modérées (1,8 au maximum).

Ce lien qu'entretiennent morphologie urbaine et ensoleillement va évidemment avoir un impact sur le potentiel d'énergie solaire, autant thermique que photovoltaïque. Nombre d'études mettent en avant cette relation (Cheng et al., 2006; Grosso, 1998; Steadman, 1977).

A titre d'exemple, Cheng et al. ont réalisé une étude morphologique mettant en avant l'influence négative de la densité sur le potentiel d'énergie solaire photovoltaïque (Cheng et al., 2006). Pour cela, ces chercheurs ont défini 6 formes urbaines théoriques en faisant varier :

- la densité bâtie brute (en abscisse de la Figure 15),
- le coefficient d'emprise au sol ou CES* (représenté par le pourcentage SC sur la Figure 15),
- la répartition régulière ou aléatoire des bâtiments dans le plan (cas 5 ou 7 sur la Figure 14)
- et la répartition régulière ou aléatoire des hauteurs (cas 5 ou 14 sur la Figure 14).



Cas 5 (Uniform, Uniform)	Cas 2 (Uniform, Random)	Cas 3 (Random, Uniform)
Densité bâtie brute = 3,6	Densité bâtie brute = 1,4	Densité bâtie brute = 3,6
Coefficient d'emprise au sol = 36%	Coefficient d'emprise au sol = 9%	Coefficient d'emprise au sol = 9%
Répartition régulière des bâtiments	Répartition régulière des bâtiments	Répartition aléatoire des bâtiments
Répartition régulière des hauteurs	Répartition aléatoire des hauteurs	Répartition régulière des hauteurs

Figure 14 : Trois des 6 types de l'étude (Cheng et al., 2006)

Cette étude a démontré l'influence négative de la densité sur l'ensoleillement mais également l'intérêt d'une répartition aléatoire des bâtiments dans le plan et d'une répartition aléatoire des hauteurs (voir Figure 15)

* Voir glossaire

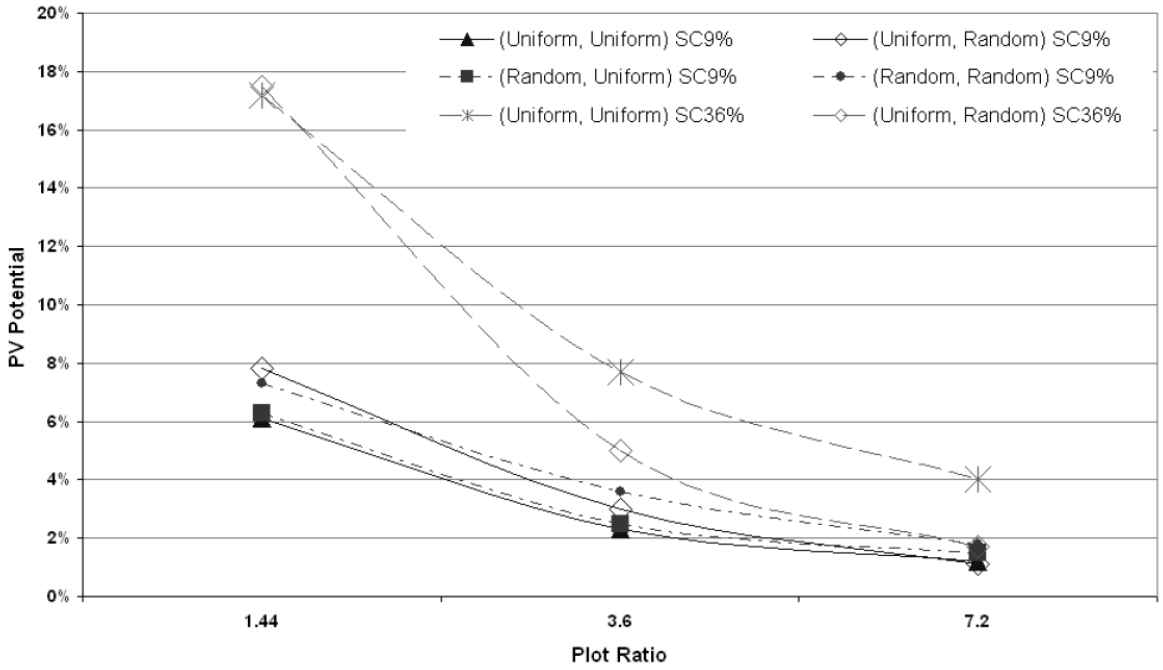


Figure 15 : Potentiel photovoltaïque en fonction de la densité bâtie brute pour les 6 types de quartiers (Cheng et al., 2006)

En ce qui concerne l'énergie photovoltaïque, rappelons la relation entre ensoleillement et production énergétique n'est pas linéaire car, en fonction du montage électrique, un seul capteur mal ensoleillé peut réduire la production de l'ensemble de l'installation. Un module photovoltaïque est généralement composé de plusieurs cellules photovoltaïques distribuées en sous-réseaux. Lorsqu'une cellule est à l'ombre, une diode court-circuite automatiquement le sous-réseau concerné afin d'éviter les points chauds. Par conséquent, il suffit qu'une seule cellule soit à l'ombre pour stopper la production d'un sous-réseau entier (Hayoun & Arrigoni, 2011).

En conclusion, on peut dire que le corpus de recherches menées sur la question de la morphologie urbaine et son impact sur le potentiel de production d'énergie solaire permet de questionner la densité des villes. Dans les zones urbaines très denses, une attention particulière doit être portée à la morphologie urbaine et à la conception architecturale afin de permettre la mise en place de capteurs solaires efficaces.

1.3.3. Énergie éolienne

Le terme « éolien urbain » désigne les systèmes de production d'énergie éolienne spécialement adaptés à l'environnement urbain. Bien que le potentiel existe (Abdelli, 2007), la mise en place d'éoliennes urbaines reste un phénomène limité (Roboam, 2005). Cela est dû à plusieurs raisons, en particulier au fait que la morphologie urbaine a un impact très

important sur l'écoulement des vents et donc sur la possibilité de mettre en place des éoliennes.

Tout d'abord, la rugosité liée aux obstacles bâtis ralentit le vent, et diminue donc, à hauteur donnée, la puissance récupérable par des éoliennes ou pour une ventilation naturelle (Escourou, 1981). Ainsi, pour une même hauteur d'environ vingt mètres au-dessus du sol, on observe une vitesse moyenne d'environ 20 à 30 % moins importante en ville. En revanche, la turbulence est accrue de l'ordre de 50 à 100 % (Sacre, 1983).

Il existe dans la littérature des modèles simplifiés pour prendre en compte la diminution des vitesses de vents sous l'effet de la rugosité du milieu urbain (Adolphe et al., 2002). Par exemple, la Loi de Prandlt permet d'évaluer la diminution de la vitesse du vent en fonction de la rugosité. La rugosité elle-même peut s'exprimer en fonction de la morphologie urbaine. Coantic (1986) lie la rugosité à la hauteur H du (ou des) obstacle(s). Landsberg (1981) lie la rugosité à la hauteur de l'obstacle, à son profil au vent, et à son emprise au sol grâce à la formule suivante :

$$Z_0 = \frac{H \times a}{2 \times A}$$

Avec :
H : hauteur moyenne des obstacles (m)
a : surface de la silhouette de l'obstacle rencontré (m^2)
A : emprise au sol de l'obstacle (m^2)

Ce type de méthode est communément utilisé en climatologie urbaine (Grimmond & Oke, 1999). Cependant, la prise en compte de phénomènes plus complexes comme la turbulence nécessite des outils de simulation numérique précis et difficilement applicables à l'échelle urbaine.

Par ailleurs, il existe des contraintes règlementaires influençant le lieu d'implantation des éoliennes. Ces contraintes varient en fonction de la hauteur, de la puissance et de la localisation géographique (proximité avec des habitations ou des zones protégées). Afin de les préciser on peut se tourner vers le code de l'urbanisme et le code de l'environnement (Dubois, 2009; Landes & Martin, 2009). L'acceptabilité des éoliennes urbaines par les riverains est également un facteur limitant.

Malgré ces obstacles, il existe un certain nombre de projets concernant l'intégration de l'éolien à la ville. On peut par exemple citer le projet Wind Energy for the Built environment (WEB) (Campbell et al., 2001). Ce projet a conduit des propositions de « bonnes pratiques » et de modèles architecturaux d'intégration des éoliennes. On peut également citer le projet WINEUR qui a également amené à des préconisations urbaines et architecturales pour la

mise en place d'éoliennes urbaines (Cace et al., 2007). Il est cependant important de noter que les préconisations proposées par une partie de ces projets ne sont pas généralisables à la ville dans son ensemble (voir Figure 16 et Figure 17).

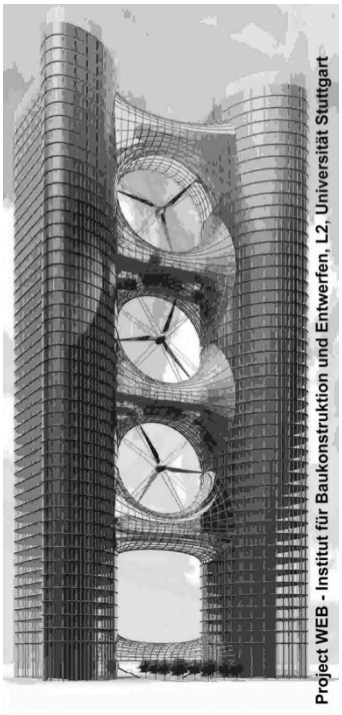


Figure 16 : Prototype du projet WEB (Campbell et al., 2001)

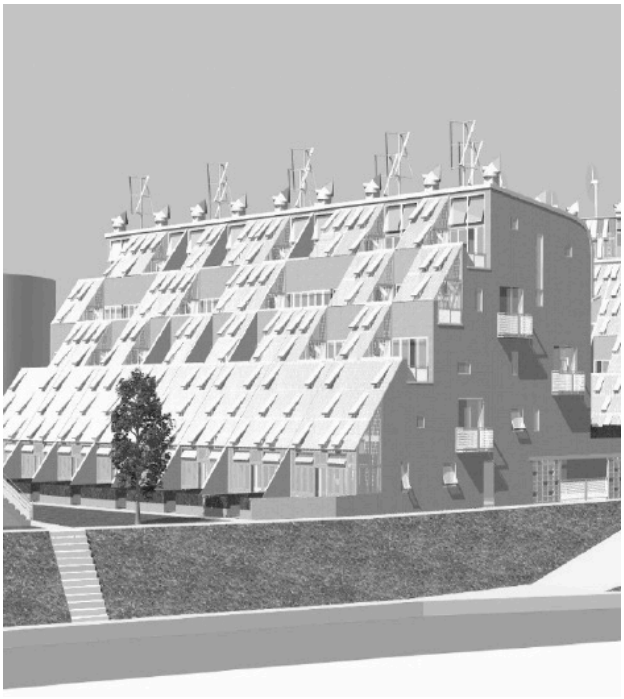


Figure 17 : Préconisation du projet WINEUR (Cace et al., 2007)

Plus modestement, plusieurs études s'intéressent au lien entre morphologie urbaine et vent. On peut par exemple citer les travaux de Hang, Sandberg et Li qui ont testé des morphologies très simplifiées vis-à-vis de l'écoulement des vents (Hang, Sandberg, & Li, 2009).

On peut finalement conclure que le potentiel éolien est largement diminué dans les villes denses (Hui, 2001), mais qu'il existe des moyens pour exploiter cette ressource.

1.3.4. Biomasse

La biomasse désigne l'ensemble des végétaux et des animaux, ainsi que les déchets organiques. L'énergie issue de la biomasse est donc celle résultant de la transformation de végétaux et de déchets organique (boues de stations d'épuration y-compris). Cette transformation peut se faire de différentes manières : combustion, méthanisation, cogénération.

La morphologie urbaine va principalement influencer l'espace disponible pour les équipements de transformation de la biomasse en énergie : chaudière, zone de stockage, usine de combustion, de méthanisation ou de cogénération (Bureau d'études AXENNE, 2007). Dans son évaluation du potentiel de production d'énergie renouvelable du Grand Lyon, le bureau d'étude AXENNE rappelle que des critères technico-économiques doivent également être pris en compte. En effet, dans l'existant, la mise en place d'une chaudière ou le raccordement à un réseau de chaleur alimenté par de la biomasse seront plus ou moins intéressants (d'un point de vue économique et environnemental) en fonction des équipements existants. Il faut également s'interroger sur la disponibilité de la ressource (forêts exploitables, déchets des industries du bois et des industries agroalimentaires, déchets organiques des ménages, boues des stations d'épuration, déchets verts, etc.).

Cependant, très peu d'études prennent en compte l'influence de la morphologie urbaine sur le potentiel de biomasse. La plupart des auteurs se concentrent sur l'impact de la ressource bois à travers l'étude de la sylviculture locale. C'est par exemple le cas de l'étude menée par Vettorato qui évalue le potentiel d'énergies renouvelables de Trentino (Italie) en tenant compte de la présence et de la localisation des forêts ainsi que de leur production annuelle (Vettorato et al., 2011).

Malgré le peu d'études existantes, on retiendra que la densité urbaine joue défavorablement sur le potentiel d'énergie biomasse.

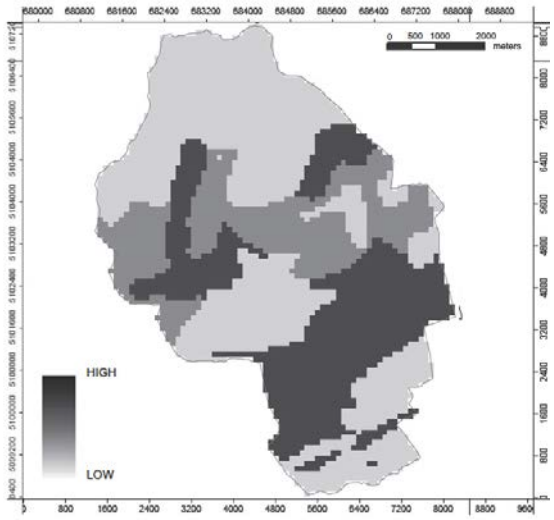


Figure 18 : Carte du potentiel de production d'énergie bois (Vettorato et al., 2011)

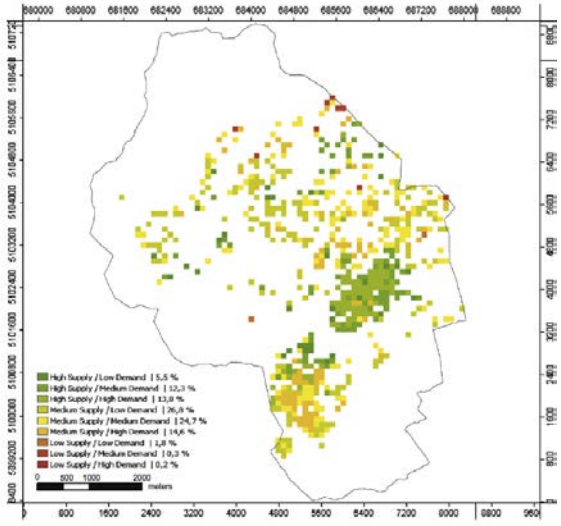


Figure 19 : Carte comparative entre besoins énergétiques et capacité de production d'énergies renouvelables (solaire, géothermique, biomasse, hydrologique) (Vettorato et al., 2011)

1.3.5. Géothermie

On distingue plusieurs types de géothermie (Castello, 2004) dont une classification simplifiée est présentée dans le Tableau 3 ci-après.

Tableau 3 : Différents types de géothermie

Type de géothermie	Caractéristiques du réservoir	Utilisations
Très basse énergie	Nappe à moins de 100 m Température < à 30°C	Chauffage et rafraîchissement de locaux, avec pompe à chaleur
Basse énergie	30°C < Température < 150°C	Chauffage urbain, utilisations industrielles, thermalisme, balnéothérapie
Moyenne et Haute énergie	180°C < Température < 350°C	Production d'électricité
Géothermie profonde	Roches chaudes sèches à plus de 3 000 m de profondeur	Au stade de la recherche, pour l'électricité ou le chauffage

La géothermie profonde ainsi que la géothermie moyenne et haute énergie sont encore peu exploitées en France et les ressources sont peu connues. Nous nous limiterons ici à une brève description de la géothermie très basse énergie exploitée via des pompes à chaleur sol/eau ou eau/eau. C'est en effet cette technologie qui sera la plus influencée par la morphologie urbaine.

Une pompe à chaleur (ou PAC) est une machine thermodynamique qui, lorsqu'on lui fournit un certain travail (mécanique ou chaleur), prélève de l'énergie à une source froide extérieure (par exemple le sol ou l'eau d'une nappe phréatique) pour la céder à une source chaude (l'intérieur d'un bâtiment). Une pompe à chaleur réversible peut fonctionner à l'inverse en puisant l'énergie d'un local à refroidir et en la cédant à une source extérieure (Maïzia, 2007b).

On peut considérer les pompes à chaleur comme des productrices d'énergie renouvelable dans la limite de la règlementation européenne. En effet, la définition de la directive 2009/28/CE du 23 avril 2009 relative à la promotion de l'utilisation de l'énergie produite à partir de sources renouvelables est la suivante : « L'énergie aérothermique, géothermique et hydrothermique captée par des pompes à chaleur est prise en considération […] pourvu que le rendement énergétique final excède significativement l'apport énergétique primaire requis pour faire fonctionner les pompes à chaleur. La quantité de chaleur devant être considérée comme de l'énergie produite à partir de sources renouvelables aux fins de la présente directive est calculée selon la méthodologie fixée à l'annexe VII. » (Parlement Européen, 2009).

La géothermie très basse énergie est exploitable par des pompes à chaleur à capteurs horizontaux ou verticaux, elle suppose donc de disposer d'une surface libre suffisante (1 à 2 fois la surface à chauffer, de préférence ensoleillée et perméable). Dans un contexte urbain, on peut également envisager des pompes à chaleur à capteurs verticaux. Cela suppose cependant une certaine connaissance de la géologie locale (Maïzia, 2007b). A ces fins, des atlas ont été réalisés par le BRGM et l'ADEME (voir Figure 20). Notons que dans le cas d'une pompe à chaleur sur nappe, la question de la saturation de celle-ci (notamment sa montée en température en été) se pose (Bureau d'études AXENNE, 2007).

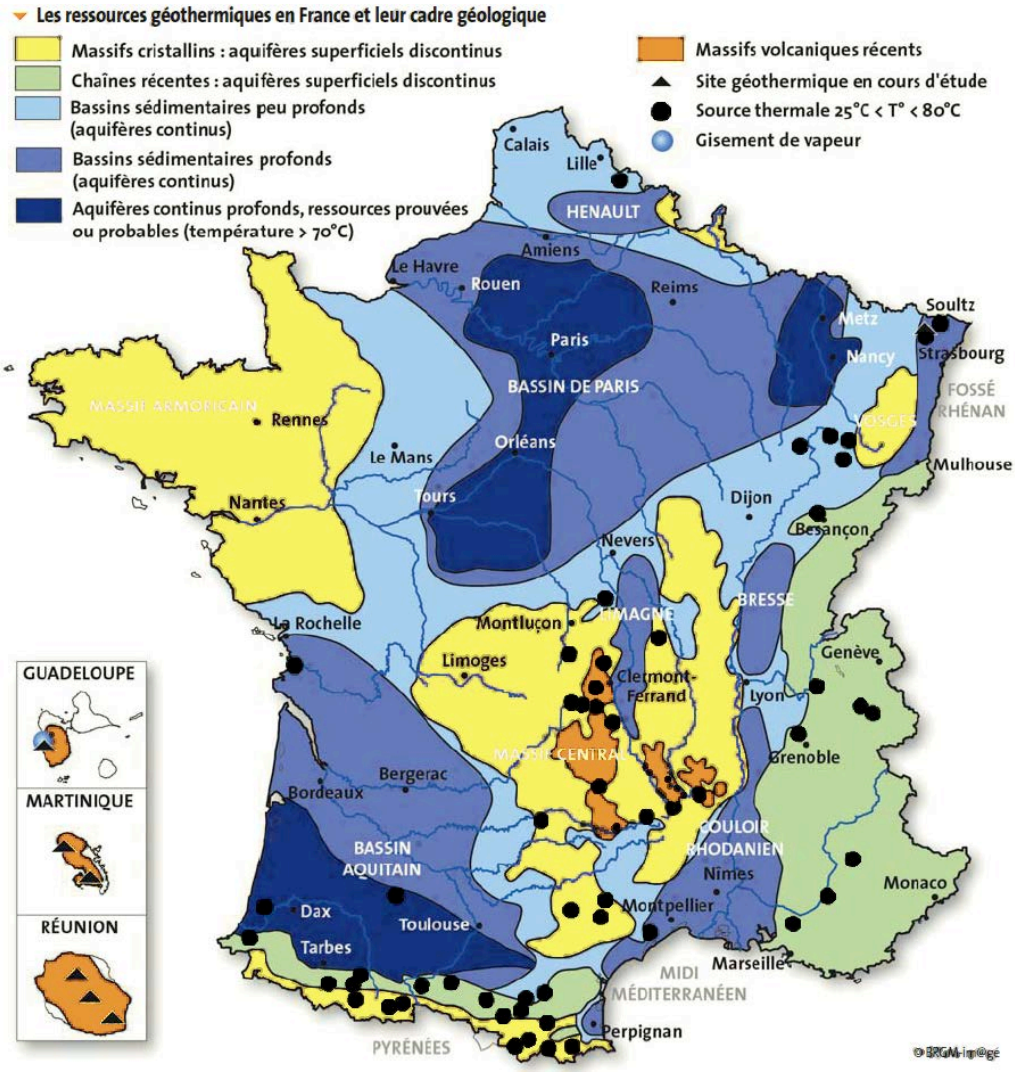


Figure 20 : Carte du potentiel énergétique en géothermie profonde du BRGM (Castello, 2004)

Parmi les études traitant du lien entre morphologie urbaine et potentiel géothermique on peut citer celle de Maïzia qui est un travail de référence sur le sujet (Maïzia, 2007b). Ce chercheur a étudié comment les PAC (dont les PAC géothermiques) sont susceptibles de se développer en France dans une démarche prospective. D'après lui, l'implantation des PAC est sujette à trois critères : « le type de logement (dans le sens « individuel » ou « collectif »), la morphologie urbaine (logement contigu ou non) et la présence d'aquifère dans leur implantation ». Ainsi des scénarios d'implantation sont définis (voir Tableau 4). Dans les tissus urbains denses (maisons ou immeubles contigus), des dispositifs à capteurs verticaux sont prévus pour compenser le manque d'espace au sol. Par ailleurs, dans le cas des logements déjà équipés d'un chauffage électrique (c'est à dire dépourvus d'équipement de chauffage avec système de transport de fluide) le chercheur estime que la lourdeur des travaux décourage la mise en place d'une PAC géothermique.

Tableau 4 : Scénario technologique d'implantation de PAC pour des maisons individuelles (MI) et des immeubles collectifs (IC) (Maïzia, 2007b)

Type de logement	Type de Tissu	Type de PAC	Disposition des capteurs	COP complet adopté
MI (électrique)	Continu	Air	-	2
MI (autres)	Continu	Sol ou nappe	verticale	2,7
MI (électrique)	Discontinu	Air	-	2
MI (autres)	Discontinu	Sol	horizontale	2,7
IC (électrique)	Continu	Air	-	2
IC (CCC)*	Continu	Sol ou nappe	verticale	2,7
IC (électrique)	Discontinu	Air	-	1,5
IC (CCC)*	Discontinu	Sol	horizontale	2,2 (1)
IC (autres)	Discontinu ou discontinu	-	-	-

(*) CCC : chauffage central collectif

En utilisant ces scénarios, Maïzia estime un potentiel d'amélioration des consommations énergétique du parc de bâtiments existant de -75% pour les maisons individuelles et -30% pour les immeubles collectifs.

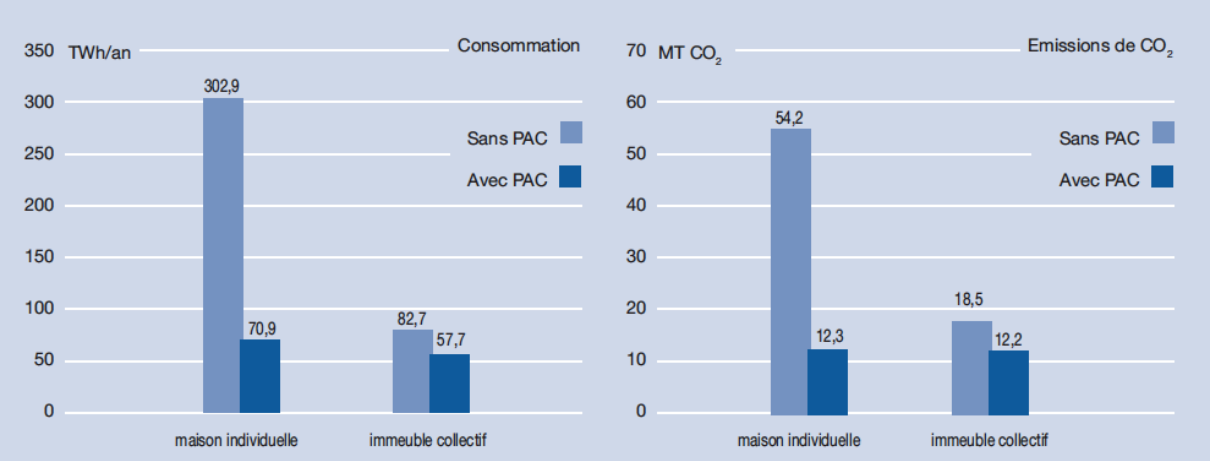


Figure 21 : Consommations et émissions de CO_2 globales avec et sans PAC selon une simulation statique établie sur le parc de logements existant en 2000 (Maïzia, 2007b)

Une nouvelle fois, on peut conclure que la densité bâtie influe défavorablement le potentiel de production d'énergie renouvelable géothermique.

1.4. La ville distributrice d'énergie

Le changement de paradigme consistant à considérer la ville comme une productrice potentielle d'énergie nécessite de questionner les modes de distribution de cette énergie. Or, dans le contexte français actuel, la distribution de l'énergie est essentiellement centralisée, c'est à dire gérée à l'échelle nationale et distribuée par un réseau recouvrant l'ensemble du territoire. Cependant, depuis quelques années, le modèle du réseau technique centralisé tend à être remis en question dans une optique de développement urbain durable.

1.4.1. Les limites d'un réseau centralisé

Plusieurs facteurs contribuent aujourd'hui à remettre en question le réseau centralisé de distribution de l'énergie tel qu'il existe. En premier lieu, poursuivant la tendance actuelle, la part d'électricité dans les consommations énergétiques françaises devrait continuer d'augmenter, mais devrait également sensiblement évoluer. En effet, le vecteur électricité permet de mobiliser une grande partie des énergies renouvelables qui pourraient se développer dans le futur (hydraulique, éolien, solaire photovoltaïque). Or, la production de ces énergies renouvelables revêt un caractère intermittent qui nécessite une mutation des réseaux électriques tels qu'ils existent (A. Merlin, 2010).

D'autre part, la production énergétique sera très certainement bouleversée par le changement climatique. Tout d'abord, la consommation de climatisation et le pic de consommation électrique estivale associé devraient très largement augmenter (Salagnac, 2007a). Un réchauffement climatique aurait également tendance à réduire l'efficacité de différents moyens de production énergétique tant nucléaire (augmentation des températures de l'eau de refroidissement) que renouvelables (diminution des débits pour la production hydroélectrique par exemple) (Salagnac, 2007a). Le changement climatique sera donc potentiellement susceptible d'accentuer le caractère intermittent de la production énergétique française.

Les pertes en lignes constituent une autre limite technique du réseau centralisé (une partie de la puissance électrique se transforme en chaleur par effet Joule) (Percebois, 2004). En France, l'ADEME considère un facteur de 2,58 entre l'énergie primaire et l'énergie finale pour prendre en compte les pertes en lignes et le reste de l'énergie nécessaire à la production de l'électricité (ADEME, 2013).

D'après Coutard et Rutherford, la remise en cause du réseau centralisé correspond également à l'émergence de nouveaux fournisseurs d'énergie sur le marché français « qui

promeuvent la dé-intégration (*unbundling*) de ces grands réseaux » (Coutard & Rutherford, 2009).

Les réseaux centralisés ont également pour inconvénient une conscience limitée, de la part des usagers, de l'impact de leur consommation. Les ressources énergétiques représentent un concept immatériel et lointain et l'immédiateté du service en gomme la fragilité (Coutard & Rutherford, 2009; Souami, 2009). Le réseau centralisé est également critiqué sur le plan de la justice environnementale : les consommateurs ne subissent pas directement les conséquences environnementales de la production de l'énergie (pollution des centrales thermiques, risques liées aux centrales nucléaires, etc.).

1.4.2. Des alternatives à l'échelle urbaine

Bien qu'un consensus existe sur la nécessité de faire évoluer le réseau énergétique français, les solutions proposées sont variées.

D'après Merlin, ancien président du Conseil International des Grands Réseaux Électriques, la solution à ces problématiques se trouve dans le développement de grands réseaux d'interconnexion à l'échelle continentale, voire intercontinentale, qui permettrait de se détacher des contraintes de production intermittentes. « Un tel renforcement des interconnexions est indispensable pour d'une part permettre d'équilibrer à tout moment l'offre et la demande d'électricité en présence d'une part de plus en plus significative de production éolienne débitant sur le réseau, laquelle nécessite du fait de son caractère intermittent d'être secourue à tout moment par d'autres moyens de production, en cas de vent trop faible ou trop fort » (A. Merlin, 2010).

A l'inverse, les partisans des micro-réseaux préconisent la décentralisation énergétique. L'énergie décentralisée désigne la génération d'électricité ou de chaleur à proximité de leur lieu de consommation. Elle peut être fossile (pile à combustion, moteur à cogénération, etc.) ou renouvelable (solaire, éolien, etc.) et peut exister à différentes échelles : de l'équipement pour la maison individuelle à l'usine alimentant une portion de ville. Les micro-réseaux ont alors pour fonction de relier cette production d'énergie décentralisée à des consommateurs locaux.

Un des moteurs de cette technologie est idéologique. A l'échelle d'un quartier ou d'un morceau de ville, on va rechercher l'autosuffisance et au travers de cela, la limitation de l'impact de quartier sur l'environnement (Souami, 2009). Une prise de conscience collective de l'impact environnemental des consommations énergétiques est plus aisée dans ce type de situation (Coutard & Rutherford, 2009; Souami, 2009). Par ailleurs, le problème des pertes en lignes est limité par les micro-réseaux.

En revanche, pour qu'un tel système soit viable, il doit obligatoirement être associé à des dispositifs de stockage de l'énergie permettant de répondre à l'intermittence des différents modes de production et à l'intermittence des usages. Les moyens de stockage de l'énergie existant ou en développement sont nombreux (accumulateurs électrochimiques, systèmes hydrauliques, système inertiels, stockages chimiques, etc.) mais leur usage encore peu répandu (Multon & Ruer, 2003).

Les micro-réseaux ne signifient pas la fin d'un réseau centralisé. D'après Coutard et Rutherford, on observe dans la pratique « la mise en œuvre de combinaisons diverses entre les différentes techniques au sein de systèmes composites » (Coutard & Rutherford, 2009).

De plus, tant les défenseurs des macro-réseaux que ceux des micro-réseaux s'accordent sur la nécessité de développer des réseaux intelligents (Coutard & Rutherford, 2009). Le terme réseau intelligent est la traduction de l'anglais « smart grid ». Il s'agit d'un réseau de distribution de l'énergie caractérisé par un flux bidirectionnel d'électricité et d'informations. Le réseau intelligent doit être capable de contrôler et commander les installations de production, de stockage et d'utilisation de l'énergie. Ainsi, il peut permettre de récupérer des informations sur l'usage que les particuliers, entreprises et administrations font de leurs équipements (chauffage, bureautique, etc.) et d'optimiser les systèmes de production et de stockage en conséquence. Utilisant les technologies des réseaux informatiques, le réseau intelligent gère des informations en temps réel pour permettre l'équilibre quasi-instantané de l'offre et la demande (U.S. Department of Energy, 2008).

En conclusion, les évolutions futures des réseaux de distribution de l'énergie requerront la prise en compte de la consommation et de la production de l'énergie à différentes échelles. Cette nouvelle problématique nécessite donc, comme celle évoquées précédemment, une multiplicité des disciplines et une multiplicité des échelles, du panneau solaire au territoire en passant par le quartier.

1.5. Le microclimat urbain

1.5.1. Un contexte de réchauffement climatique

Les projections climatiques du groupe intergouvernemental d'experts pour l'étude du climat (GIEC) font apparaître une augmentation possible de la température moyenne de l'atmosphère terrestre de 1,1 à 6,4 °C d'ici à la fin du siècle (GIEC et al., 2008).

Dans les climats tempérés, ce réchauffement sera très probablement accompagné de perturbations météorologiques importantes. En particulier, l'étude que Météo-France a mené sur la ville de Paris avec le modèle ARPEGE met en évidence une intensification des épisodes caniculaires d'ici à 2100, quel que soit le scénario du GIEC considéré (Kounkou-Arnaud, Lemonsu, & Desplat, 2011).

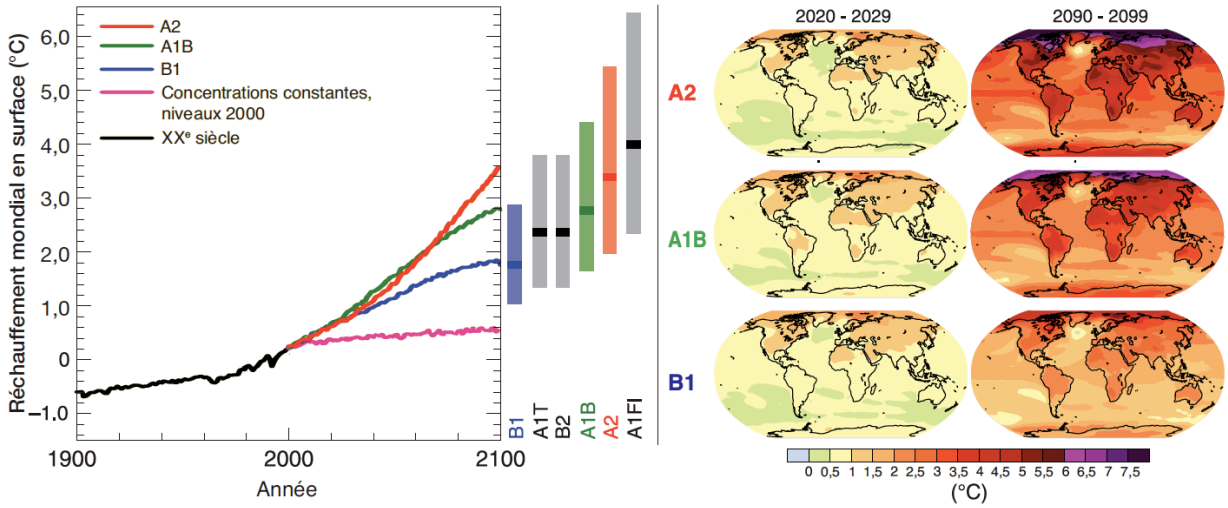


Figure 22 : Projections du GIEC relatives au réchauffement à la surface du globe selon plusieurs scénarios (GIEC et al., 2008).

1.5.2. L'ilot de chaleur urbain

Parallèlement à ces phénomènes, les villes connaissent un microclimat, connu sous le nom d'ilot de chaleur urbain, qui va accentuer le réchauffement climatique et aggraver les épisodes de canicules. En effet, en raison de leur morphologie, de leurs matériaux, de leurs activités, etc. les villes présentent souvent des températures moyennes plus élevées que les températures en périphérie ou à la campagne (voir Figure 23).

Ces écarts de température peuvent aller de 2˚C pour une ville de 1000 habitants à 12˚C pour une mégapole de plusieurs millions d'habitants (écarts maximum estivaux) (Oke, 1988). L'ilot de chaleur urbain est ainsi défini comme l'écart de température entre une ville et la

campagne environnante. On mesure essentiellement ces écarts la nuit, ce qui signifie que les tissus urbains emmagasinent de la chaleur durant la journée mais ne la libère que très peu durant la nuit contrairement aux zones rurales (Pigeon, Lemonsu, Masson, & Hidalgo, 2008).

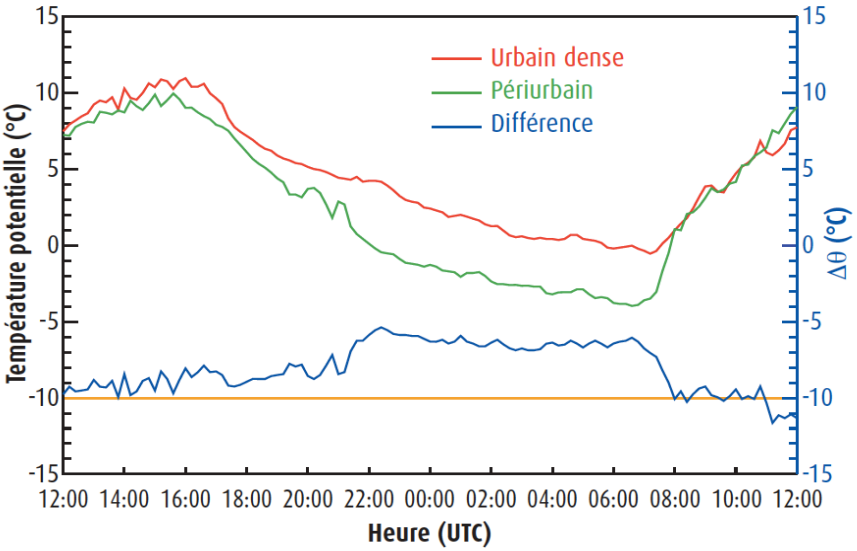


Figure 23 : Évolution de la température en deux points de Toulouse, le 25 février 2005 (Pigeon et al., 2008)

1.5.3. Causes du phénomène

La Figure 24 expose l'ensemble des facteurs qui influencent la formation et l'intensité de l'îlot de chaleur urbain. Certains, d'origine météorologique ou géographique ne peuvent pas être influencés par la planification urbaine. Il existe cependant une série de facteurs, dont font partie l'architecture et l'aménagement urbain, qui ont une influence sur l'intensité de l'ilot de chaleur urbain.

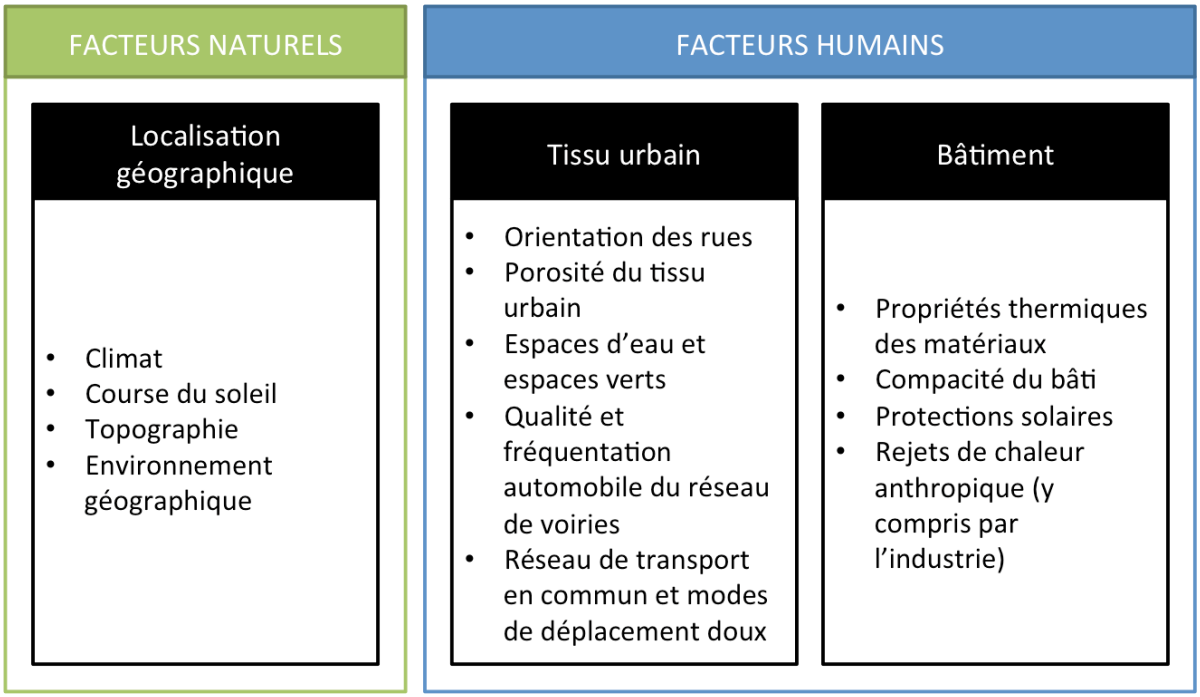


Figure 24 : Principaux facteurs et différentes échelles influençant l'intensité de l'îlot de chaleur urbain (illustration de l'auteur)

Modification du bilan radiatif de la ville (localisation géographique, orientation des rues et porosité du tissu urbain, propriétés thermiques des matériaux et compacité du bâti)

Le premier phénomène influençant le bilan radiatif est lié à la matérialité de la ville. De manière générale, les propriétés thermiques des matériaux leur permettent de stocker la chaleur durant la journée et de la restituer la nuit. Cette restitution nocturne est la principale cause de la différence de température entre la ville et la campagne la nuit. La capacité des matériaux urbains à capter la chaleur et à la restituer pendant la nuit est caractérisée par différentes grandeurs :

1. L'albédo [sans unité] correspond au rapport entre l'énergie solaire réfléchie par rapport à l'énergie solaire reçue par une surface. Il permet donc de quantifier la part de rayonnement absorbée et transformée en chaleur.
2. L'émissivité [sans unité] correspond au rapport entre le rayonnement infrarouge émis par une surface et le maximum théorique de rayonnement infrarouge par un corps noir à même température.
3. La capacité thermique [Joule/Kelvin] est la quantité de chaleur que peut emmagasiner un matériau par rapport à son volume. Elle est définie par la quantité de chaleur nécessaire pour élever d'un kelvin la température d'un mètre cube du matériau.

4. La conductivité thermique [Watt/Mètre/Kelvin] quantifie l'aptitude d'un corps à conduire de la chaleur.
5. La diffusivité thermique [Mètre carré/Seconde] caractérise la rapidité avec laquelle la chaleur est transférée à travers le matériau. Elle va dépendre de la capacité thermique et de la conductivité thermique d'un matériau. Plus la valeur de diffusivité thermique est faible, plus le front de chaleur mettra du temps à traverser l'épaisseur du matériau, et donc, plus le temps entre le moment où la chaleur est arrivée sur une face d'un mur et le moment où elle atteindra l'autre face sera important.
6. L'effusivité thermique [Joule/Kelvin/mètre carré/seconde] caractérise la rapidité avec laquelle la chaleur est absorbée dans le matériau. Plus l'effusivité est élevée, plus le matériau absorbe d'énergie sans se réchauffer notablement.
7. Les quatre dernières grandeurs permettent de caractériser l'inertie c'est à dire la capacité d'un matériau à accumuler la chaleur et à la restituer après un temps.

Pour résumer, deux caractéristiques thermiques des matériaux sont à retenir pour leur influence sur l'ilot de chaleur urbain : l'albédo et l'inertie. Tout d'abord, l'albédo des matériaux urbains est globalement plus faible que celui des matériaux que l'on trouve à la campagne. Ces matériaux « montent » donc en température de manière plus importante, ce qui contribue à l'ilot de chaleur urbain (Prado & Ferreira, 2005). De plus, l'inertie des matériaux urbains est plus élevée, ils absorbent donc la chaleur pour la restituer en période nocturne, empêchant le rafraichissement de la ville (Liébard & De Herde, 2005).

Le deuxième paramètre influant le bilan radiatif concerne les ombres que font les bâtiments sur les espaces extérieurs et qui limitent la montée en température des matériaux. Ces ombres seront d'autant plus importantes que le prospect du tissu urbain est élevé (Adolphe et al., 2002). L'orientation des rues aura également une importance particulière.

Le troisième facteur, également lié à la géométrie urbaine, concerne le piégeage radiatif (voir Figure 25). Ce phénomène désigne de fait que dans une forme urbaine à fort prospect, les rayons solaires vont subir de multiples réflexions et vont réchauffer les surfaces qui composent la rue avant de ressortir partiellement vers l'atmosphère. La température à l'intérieur de la rue canyon* s'en trouvera donc augmentée. Les rayons infrarouges émanent des matériaux urbains chauffés sont piégés de la même manière (Colombert, 2008b).

* Voir glossaire

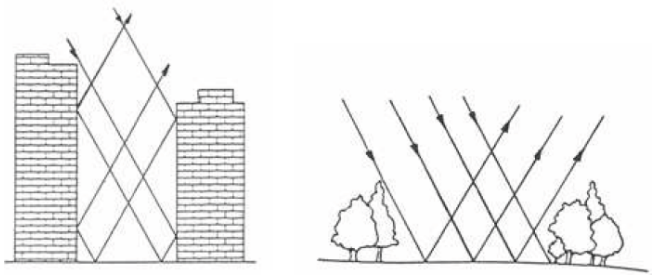


Figure 25 : Illustration du piégeage radiatif (Griffiths, 1976)

Modification de l'écoulement de l'air (localisation géographique, orientation des rues et porosité du tissu urbain)

Parmi les facteurs liés au tissu urbain, on peut citer l'orientation des rues et des ilots urbains par rapport aux vents dominants qui vont influencer la vitesse et la turbulence du vent (Sacre, 1983). Nakamura et Oke ont également montré qu'il existe un lien entre la vitesse du vent à l'intérieur et au-dessus d'une rue canyon (Nakamura & Oke, 1988) : le vent à l'intérieur de la rue est ralenti, sa direction est modifiée et des flux turbulents sont générés. Ce lien est largement influencé par l'orientation de la rue par rapport au vent et par le prospect de la rue. Dans le cas d'un tissu traditionnel dense aux rues sinueuses, les vents seront donc ralentis et la chaleur de la ville ne sera pas aisément dispersée.

Modification de l'évapotranspiration (espaces d'eau et espaces verts)

La modification de l'évapotranspiration* en milieu urbain est liée d'une part à une diminution du végétal par rapport aux milieux ruraux et d'autre part à une imperméabilisation du sol.

* Voir glossaire

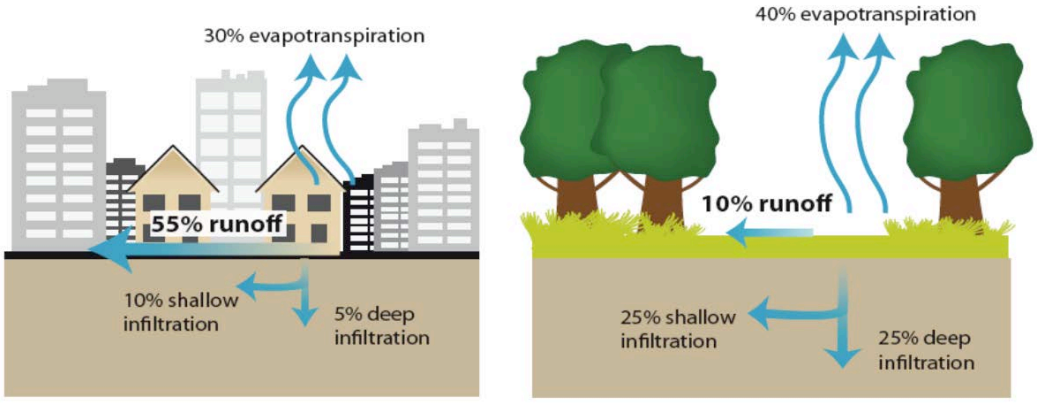


Figure 26 : Modification de l'évapotranspiration en milieu urbain (United States Environmental Protection Agency, 2008)

Les végétaux sont en effet capables de puiser l'eau du sol pour la restituer sous forme de vapeur d'eau dans l'atmosphère (transpiration). Ainsi, ils contribuent à l'humidité de l'air dans le milieu (A. Musy, 2005). En milieu urbain, moins d'espaces sont laissés au végétal, ce qui a pour conséquence de réduire l'humidité de l'air. Notons cependant que cette évapotranspiration est essentiellement liée à l'irrigation des végétaux. Des arbres mal irrigués (stress hydrique) auront même tendance à limiter le rafraichissement de la ville en piégeant le rayonnement solaire infrarouge (Gill, Handley, Ennos, & Pauleit, 2007).

Cette réduction de l'humidité de l'air est accentuée par l'imperméabilisation de la ville. En effet, en milieu urbain, la pluie ruisselle sur les toitures et les voiries étanches pour être très rapidement évacuée vers les réseaux d'eaux pluviales. Le sol contient donc peu d'eau ce qui réduit l'évaporation (United States Environmental Protection Agency, 2008).

Or cette diminution de l'humidité s'accompagne d'une augmentation des températures. En effet, l'évaporation de l'eau s'accompagne d'une absorption de chaleur. Ainsi, lors d'une averse estivale fournissant cinq millimètres d'eau par mètre carré, huit fois moins d'eau s'évaporent en milieu urbain qu'en milieu rural dans les vingt-quatre heures suivantes. La différence de quantité de chaleur empruntée à l'environnement correspond à 2,5 kWh/m^2 en vingt-quatre heures, soit un peu plus du double de la chaleur résultant des activités humaines en été (Dettwiller, 1978).

Modification des émissions de chaleur anthropique (réseaux de transports, équipements du bâtiment et industries)

En milieu urbain, où se concentrent les activités humaines, on note, de fait, une augmentation des rejets de chaleur anthropique liés au chauffage, à la climatisation, aux transports et aux activités industrielles.

Ces flux de chaleur anthropique varient d'une ville à l'autre : Oke a pu mettre en exergue des valeurs annuelles allant de 3 W/m^2 à 117 W/m^2 (Oke, 1987). Si la quantité de ces rejets dépend du climat (Montréal possède une des plus fortes quantité de rejets anthropiques), elle dépend également beaucoup de la densité bâtie et de population (Colombert, 2008a; Oke, 1987; Ringenbach, 2004).

En conclusion, et comme le montrent de nombreuses études, les centres villes denses - qui concentrent de grandes quantités de bâtiments, de matériaux et d'activités et qui laissent moins d'espaces à la végétation et aux plans d'eau - sont plus touchés par l'effet d'ilot de chaleur urbain (Pigeon et al., 2008).

1.5.4. Impacts de l'ilot de chaleur urbain

Les conséquences de l'ilot de chaleur urbain restent difficiles à prévoir, et très variables selon les climats. A Paris par exemple, les consommations de climatisation augmentent en raison de cette montée en température mais les consommations de chauffage diminuent dans des proportions généralement plus importantes (Kounkou-Arnaud et al., 2011). D'un point de vue énergétique, il est donc difficile de trancher entre réduction des consommations de chauffage et augmentation des consommations de climatisation, en particulier dans un contexte de changement climatique.

Parmi les conséquences de l'effet d'ilot de chaleur urbain on peut également citer la réduction de l'efficacité des modes de rafraichissement passifs, la pollution atmosphérique, l'augmentation de l'inconfort, et les risques importants pour la santé humaine et la biodiversité (Colombert, 2008b).

En conclusion, on peut dire que la densité bâtie a tendance à accentuer l'effet d'ilot de chaleur urbain. Même s'il n'est pas certain que cela soit défavorable aux consommations globales des bâtiments, l'ilot de chaleur urbain entraine beaucoup d'inconvénients d'ordre environnementaux. La prise en compte de ces connaissances nouvelles permet de remettre en question l'intérêt des densités urbaines.

1.6. Données et connaissances convoquées dans l'étude du triptyque ville, énergie, climat

Comme nous venons de le voir, l'étude de l'énergétique urbaine nécessite de prendre en compte de nombreuses disciplines. L'objectif de ce chapitre est d'illustrer la diversité des données et des échelles qui résulte de ce croisement thématique.

Pour chaque discipline, nous allons présenter les principales données ou connaissances nécessaires ainsi que les échelles spatiales et temporelles impliquées. Nous allons également illustrer chaque type d'étude avec un exemple issu de la recherche ou de la pratique opérationnelle de la construction.

1.6.1. Thermique du bâtiment

L'étude du comportement thermique des bâtiments est désormais tout à fait fréquente tant dans la recherche que dans la pratique opérationnelle. En particulier, la règlementation thermique a rendu obligatoire les simulations thermiques dynamiques pour tous les bâtiments (tertiaires ou d'habitations) neufs ainsi que pour une partie des opérations de rénovation.

Sans rentrer dans le détail des diverses études thermiques existantes (statiques, dynamiques, règlementaires, diagnostics simplifiés, etc.) nous pouvons résumer les principales données nécessaires dans ce type de travaux (voir Tableau 5).

Tableau 5 : Données nécessaires pour la thermique du bâtiment

Données	Échelle spatiale				Échelle temporelle	Résolution temporelle
	Région	Ville	Quartier	Bâtiment		
Géométrie précise du bâtiment étudié				X	Année	Inférieur à l'heure
Géométrie des masques solaires			X			
Caractéristiques thermiques des matériaux du bâtiment				X		
Caractéristiques radiatives des alentours du bâtiment			X			
Usage du bâtiment				X		
Équipements du bâtiment				X		
Sources d'énergies renouvelables à disposition			X			
Réglementation locale et politique de la collectivité		X				
Données climatiques actuelles	X					

A titre d'exemple, on peut citer la simulation thermique dynamique réalisée par Leroy pour la rénovation énergétique d'un bâtiment appartenant à la ligue de protection des oiseaux (Leroy, 2009). Il s'agit d'une étude très représentative des travaux des bureaux d'études thermiques. En se basant sur les données climatiques du site, la géométrie du bâtiment et de ses masques solaires, la composition de l'enveloppe du bâtiment ainsi que sur des scénarios d'usage du bâtiment (occupation, usage d'équipements bureautiques, utilisation des occultations, …) le bureau d'étude a simulé le comportement énergétique du bâtiment à l'aide du logiciel PLEIADE COMFIE (Salomon, Mikolasek, & Peuportier, 2005). Ainsi, les besoins de chauffage ont été évalués. La simulation dynamique quart d'heure par quart d'heure sur une année complète a également permis d'observer les variations de température dans les différentes pièces du bâtiments (définies comme des zones thermiques indépendantes) et d'évaluer le confort thermique en été en l'absence de climatisation. Finalement, des solutions constructives satisfaisantes d'un point de vue énergétique ont été retenues. Le choix d'un système de chauffage a également permis d'évaluer les consommations annuelles de chauffage.

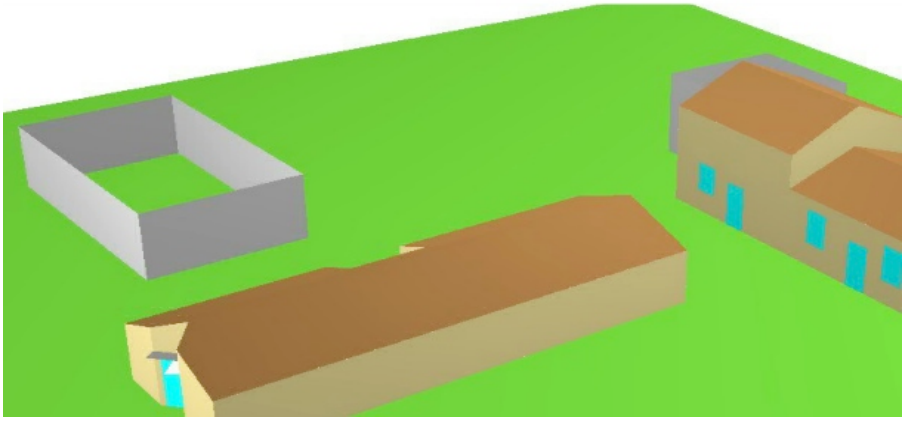


Figure 27 : Modélisation d'un bâtiment et de ses abords avec le logiciel PLEIADE COMFIE (Leroy, 2009)

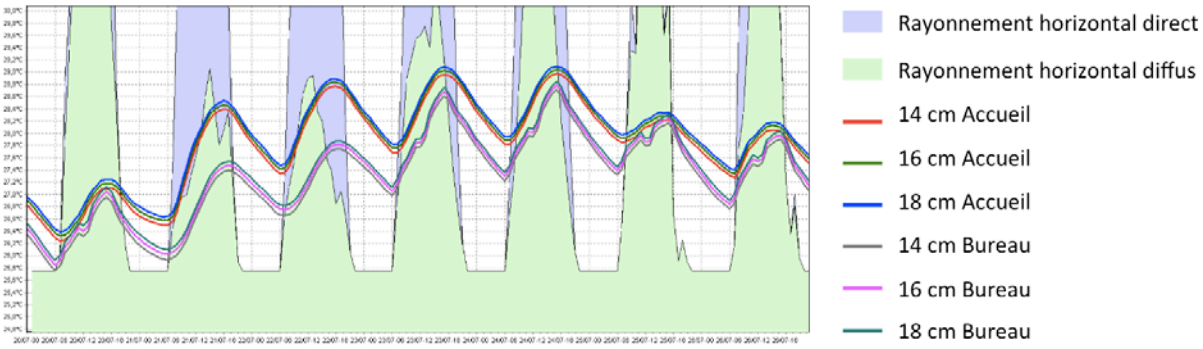


Figure 28 : Évolution des températures dans deux zones thermiques durant la semaine la plus chaude de l'année et pour trois niveaux d'isolation des murs (Leroy, 2009)

Tableau 6 : Résultats chiffrés de la modélisation avec PLEIADE COMFIE (Leroy, 2009)

Epaisseur isolant mur >		14		16		18	
Epaisseur isolant toiture >		24	30	24	30	24	30
Total	Besoins chauffage (kWh)	1606	1542	1547	1482	1498	1433
	Puissance de chauffe (W)	5366	5230	5276	5142	5192	5057
Zone Chambre Ouest	T°max (°C)	29	28,9	29	29	29,1	29
	T°min (°C)	10,9	11,1	11	11,2	11,1	11,3
	Moyenne surchauffe max (1/10°C)	12,8	12,3	12,6	12,1	13,1	12,8
	Taux inconfort (%)	8,9	8,9	9,4	9,4	9,8	9,7
	Amplification température ext (%)	17,9	17,4	17,8	17,2	17,7	17,2

1.6.2. Architecture bioclimatique

Il serait très difficile de définir l'ensemble des données nécessaires à l'architecte pour penser et construire son projet. La définition même du travail de l'architecte reste une question complexe et embrasse un très large spectre de disciplines. Nous allons cependant tenté de présenter ici les données nécessaires à la conception bioclimatique d'un bâtiment. De nombreux ouvrages traitent de la question de l'architecture bioclimatique et constituent une base pour la définition des données et connaissances nécessaires (Banham, 1984; Olgyay, 1973; Steele, 2005; Wines, 2008).

Tableau 7 : Données nécessaires pour l'architecture bioclimatique

Données	Échelle spatiale				Échelle temporelle	Résolution temporelle
	Région	Ville	Quartier	Bâtiment		
Topographie du site			X		Durée de vie du bâtiment (> 50 ans)	Heure (course du soleil) Saison
Paysage environnant et bâtiments voisins	X	X	X			
Caractéristique de la parcelle				X		
Masques solaires			X			
Matériaux locaux à disposition	X					
Caractéristiques de la faune et de la flore locale	X	X	X			
Réseaux de transports et flux piétonniers		X	X			
Usage du bâtiment Programme				X		
Sources d'énergies renouvelables à disposition			X			
Données climatiques (en particulier la course du soleil et les vents dominants)	X	X	X			
Réglementation locale et politique de la collectivité		X				

Afin d'illustrer la conception architecturale bioclimatique, on peut citer l'exemple de la crèche Hérold à Paris (Cabinet de conseil Utopies, 2007). Ce bâtiment a été choisi en 2002 comme site d'expérimentation des chantiers HQE (Haute Qualité Environnementale) pour la petite enfance. Le travail des architectes de l'agence Terreneuve s'est donc largement appuyé sur les principes de l'architecture bioclimatique.

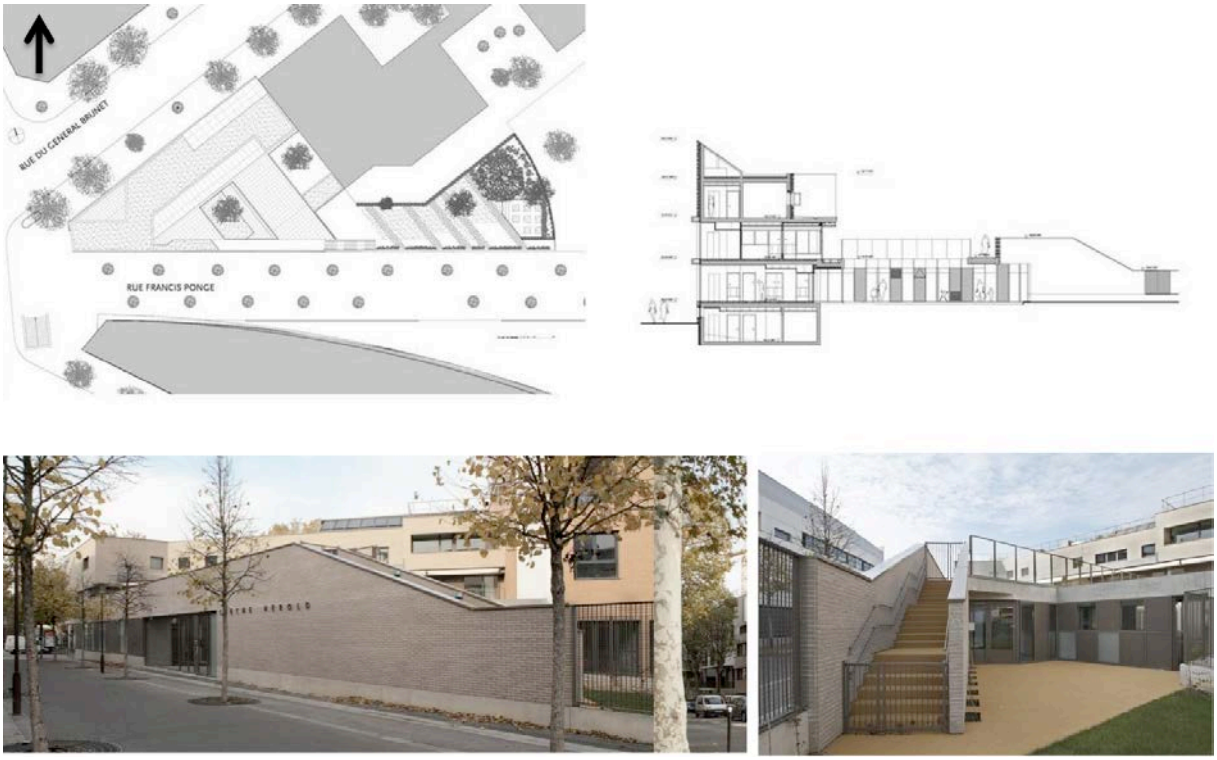


Figure 29 : Illustration du projet de la crèche Hérold (Terreneuve Achitectes, 2010)

Le projet vient s'intégrer dans un contexte urbain, il est donc très contraint. Les flux de voitures sont pris en compte et la parcelle est aménagée de manière à ce que l'espace de jeu des enfants soit protégé des nuisances liées à la circulation (Cabinet de conseil Utopies, 2007).

Cette cours intérieure permet de créer de larges baies protégées du bruit et orientées au sud pour capter le rayonnement solaire. En été, le rayonnement est limité par des protections solaires horizontales amovibles (voir Figure 31). Les vitrages en premier et en second jour permettent de favoriser l'éclairage naturel (voir Figure 30). Des grilles de ventilations sont intégrées aux baies de manière à permettre une ventilation naturelle (Cabinet de conseil Utopies, 2007).

Figure 30 : Vitrage en premier et second jour pour favoriser l'éclairage naturel (Cabinet de conseil Utopies, 2007)

Figure 31 : Protections solaires (Cabinet de conseil Utopies, 2007)

200 mètres carrés de terrasses végétalisées sont mis en place et permettent de prolonger les espaces verts de la parcelle et d'améliorer la vue des riverains. La végétation sur la parcelle, les toits et une partie des façades permet de limiter localement l'effet d'ilot de chaleur urbain (Cabinet de conseil Utopies, 2007).

Un soin particulier est apporté aux équipements de chauffage, de production d'énergie solaire et à l'isolation de l'enveloppe de manière à limiter l'impact énergétique et microclimatique du projet. De même, la crèche exploite un réseau de chaleur urbain existant alimenté par des combustibles fossiles en cogénération ou seuls ainsi que par la combustion de déchets ménagers non recyclables (Cabinet de conseil Utopies, 2007).

1.6.3. Approvisionnement et distribution énergétique

Les projets d'aménagement urbain dits « durables » ne peuvent ignorer la question de la production et de la distribution de l'énergie. Les données nécessaires pour les bureaux d'études sont alors nombreuses (voir Tableau 8).

Tableau 8 : Données nécessaires pour l'approvisionnement et la distribution énergétique

Données	Échelle spatiale				Échelle temporelle	Résolution temporelle
	Région	Ville	Quartier	Bâtiment		
Estimation des consommations énergétiques de la zone étudiée	X	X	X		Durée de vie des bâtiments concernés et des installations (> 50 ans)	Inférieur à l'heure (consommation instantanée) Saison (profil de consommation hivernal, estival et de mi-saison)
Répartition des usages des bâtiments : logements, bureaux, équipements publics, …		X	X			
Données climatiques actuelles et futures	X	X				
Réglementation locale et politique de la collectivité	X	X				

Pour illustrer le travail qui peut être fait sur les énergies décentralisées, on peut citer le célèbre éco-quartier BEDZED (Beddington Zero Energy Development). Ce projet emblématique avait pour objectif de réconcilier densité urbaine et qualité de vie tout en ne consommant aucune énergie fossile. Il était donc prévu la mise en place de panneaux solaires photovoltaïques et d'une centrale de cogénération à biomasse (Twinn, 2003).

Afin d'étudier l'approvisionnement en énergie renouvelable de ce quartier, les concepteurs du logiciel SUNTOOL ont réalisé une simulation du quartiers BEDZED à l'aide de leur outil (Stankovic, 2006).

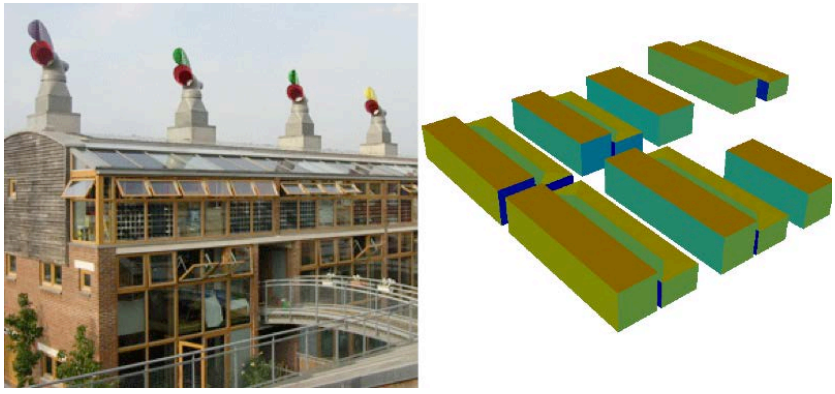


Figure 32 : Modélisation de BEDZED avec le logiciel SUNTOOL (Stankovic, 2006)

Cela leur a permis dans un premier temps d'évaluer le profil des consommations des logements, bureaux et commerces du quartier (périodes de consommations, besoins de chaleur ou d'électricité, etc.) comme on peut le voir sur la Figure 33 et la Figure 34.

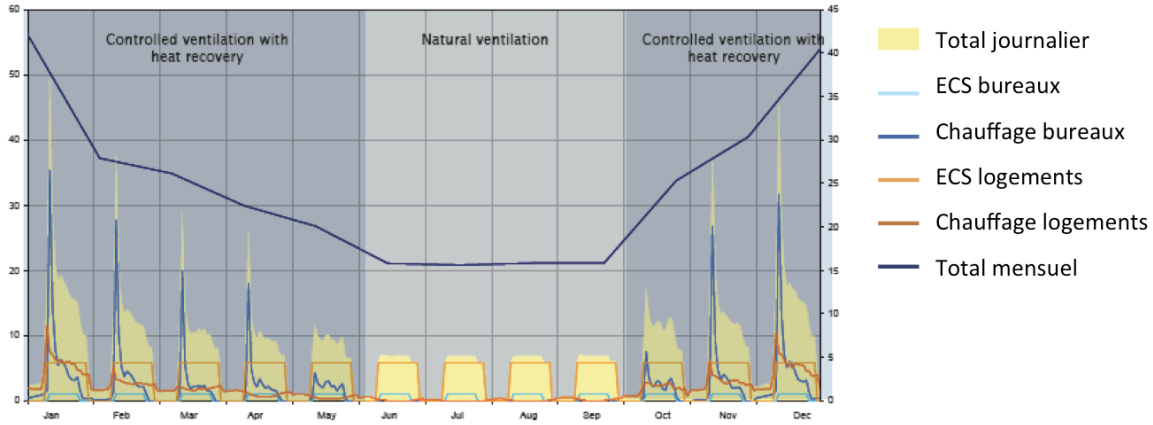


Figure 33 : Besoins de chaleur pour BEDZED pour un jour représentatif de chaque mois (kWh/m2/an) (Stankovic, 2006)

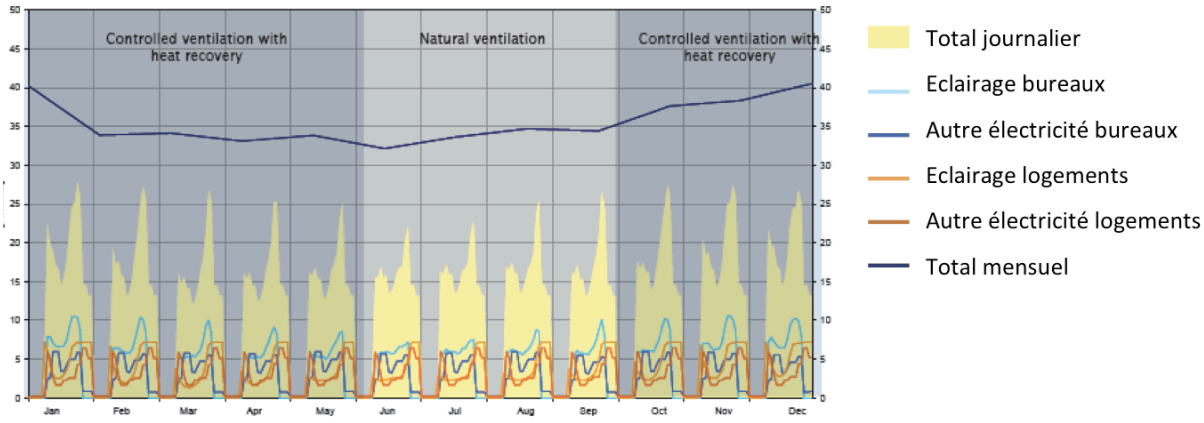


Figure 34 : Besoins d'électricité pour BEDZED pour un jour représentatif de chaque mois (kWh/m2/an) (Stankovic, 2006)

L'objectif était de vérifier l'adéquation de cette demande énergétique avec le système de cogénération biomasse et les panneaux solaires photovoltaïques prévus. Il s'est avéré que les besoins en eau chaude sanitaire étaient relativement constants au cours de l'année. Il aurait donc été possible de dimensionner l'usine de cogénération sur cette demande de base. Cependant, une partie des besoins énergétiques aurait dû être assurée par une source d'énergie complémentaire (voir Figure 35). Il a donc été fait le choix de dimensionner l'usine par rapport à la totalité des besoins, le surplus de chaleur produit devant être utilisé pour assécher la biomasse alimentant l'usine de cogénération. Bien que des problèmes

techniques aient empêché l'usine de fonctionner comme prévu, cette solution aurait pu permettre de couvrir la quasi-totalité des besoins énergétique par des sources renouvelables (voir Figure 36) (Chance, 2009; Stankovic, 2006).

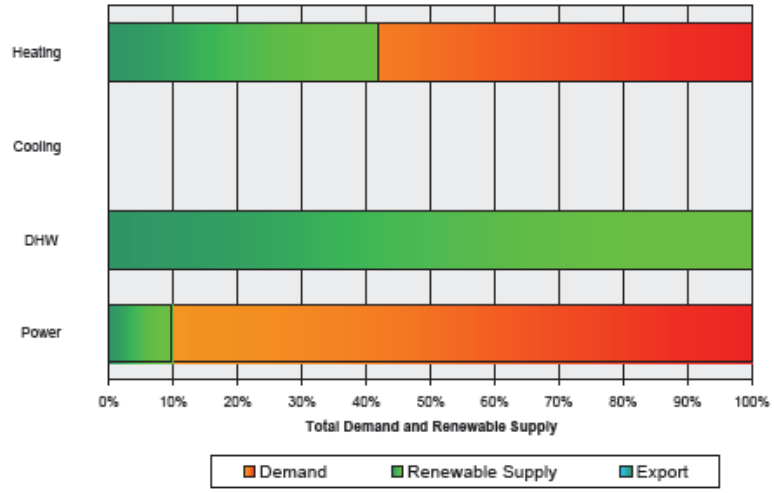


Figure 35 : Taux de couverture des besoins par des sources renouvelables – Dimensionnement de l'usine de cogénération sur les besoins d'eau chaude sanitaire (Stankovic, 2006)

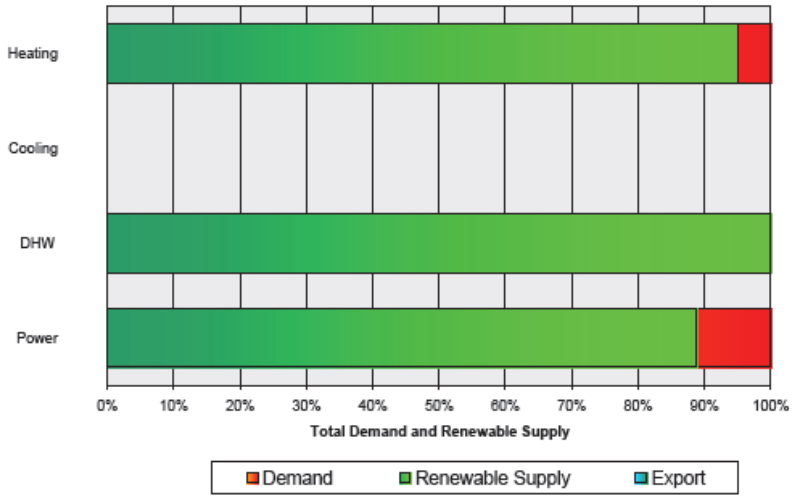


Figure 36 : Taux de couverture des besoins par des sources renouvelables – Dimensionnement de l'usine de cogénération sur les besoins d'électricité (Stankovic, 2006)

1.6.4. Étude du microclimat urbain

Les études du microclimat urbain, qu'il s'agisse de données liées à un projet de construction ou à un projet de recherche, concernent souvent des échelles plus vastes que ce que nous venons de voir.

Tableau 9 : Données nécessaires pour le microclimat urbain

Données	Échelle spatiale				Échelle temporelle	Résolution temporelle
	Région	Ville	Quartier	Bâtiment		
Climat régional actuel et prospectif	X				100 ans (changement climatique)	Inférieur à l'heure
Mesures ou images thermographiques du microclimat actuel			X			
Usages du sol (urbain dense, urbain diffus, etc. , cultures maraichère, culture céréalières, foret, végétation urbaine, etc.) actuels et prospectifs		X				
Géographie et topographie	X	X	X			
Géométrie simplifiée des bâtiments			X			
Caractéristiques thermiques des matériaux urbains			X			
Sources de chaleurs anthropiques (industries, trafic routier, etc.)		X	X			

Afin d'illustrer les données utilisées pour des études microclimatiques, nous avons choisi de présenter le travail de recherche de Wong sur l'université de Singapour (Wong et al., 2007). Les conditions climatiques extrêmes de cette ville ont poussé le chercheur à s'interroger sur les moyens d'améliorer le confort extérieur. Ainsi, en se basant sur des simulations à l'aide du logiciel ENVI-MET (Bruse, 1999), quatre scénarios d'aménagement ont été testés (voir Figure 37). Comme on pouvait s'y attendre, le scénario où la densité bâtie est la plus faible et où la plus grande surface de végétation est implantée est celui où les températures sont

les plus basses et où l'effet d'ilot de chaleur urbain est le plus faible (voir Figure 38). D'autres études permettent de mettre en avant l'impact de la morphologie urbaine et / ou de la matérialité des bâtiments et des sols.

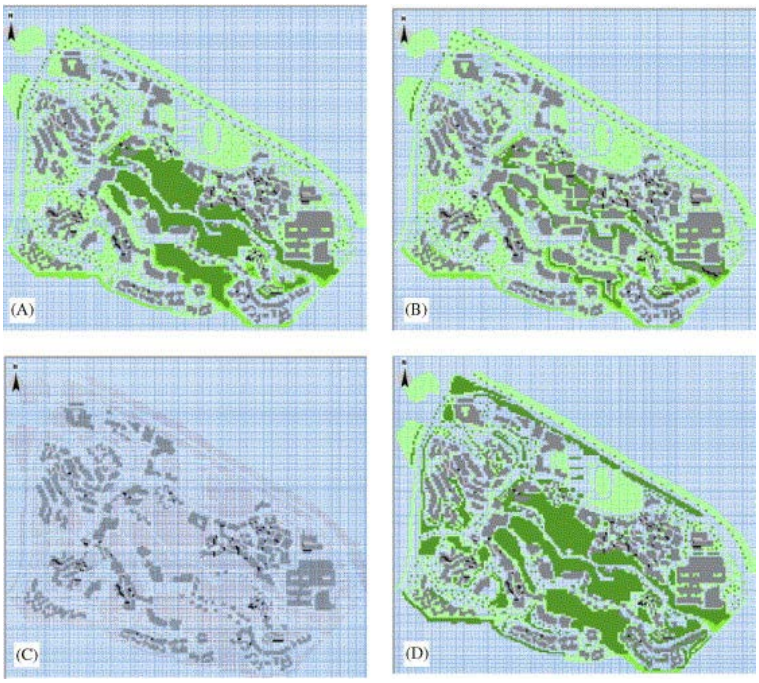


Figure 37 : Quatre cas d'aménagement (A) situation actuelle (B) la forêt est remplacée par des bâtiments (C) aucune végétation (D) végétalisation de tous les espaces libres

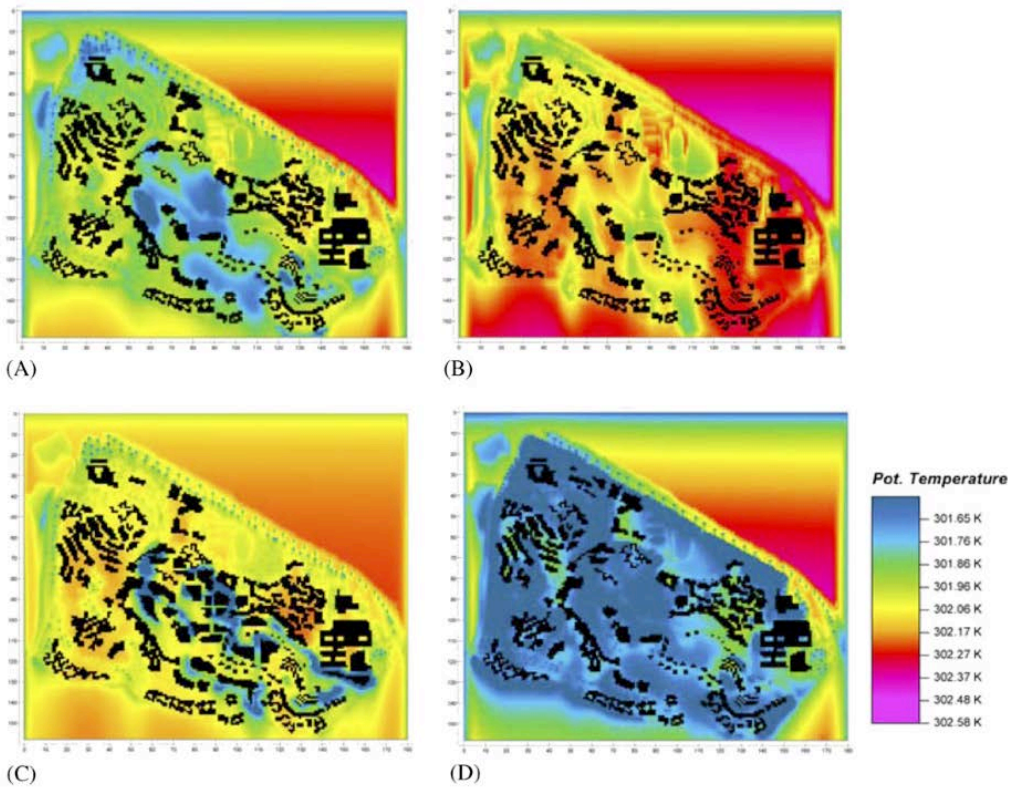


Figure 38 : Températures nocturnes simulées par ENVI-MET pour les quatre cas d'aménagement (A) situation actuelle (B) aucune végétation (C) la foret est remplacée par des bâtiments (D) végétalisation de tous les espaces libres

1.6.5. Étude des réseaux de transports

L'étude des réseaux de transport est une discipline complexe qui nécessite souvent le recours à des modèles numériques de flux mais aussi à des modèles prospectifs.

Tableau 10 : Données nécessaires pour les réseaux de transports

Données	Échelle spatiale				Échelle temporelle	Résolution temporelle
	Région	Ville	Quartier	Bâtiment		
Répartition des densités de population et d'emplois actuelles et prospectives	X	X	X		Dizaines d'années	Heures (détermination des heures de pointes) Journées (déplacements pendulaires domicile travail) Semaines - Années (déplacement domicile-travail ou déplacement longue distance)
Classes socio-professionnelles des ménages	X	X	X			
Déplacements des individus actuels et prospectifs (distances, destinations, durées, modes)	X	X	X			
Prix du carburant et des transports actuels et prospectifs	X	X				
Structure des réseaux de déplacements existants	X	X	X			

Les types d'études portant sur les transports sont aussi nombreux que les objectifs qui les motivent : étude de faisabilité d'un nouvel équipement (ligne de tramway, sortie d'autoroute, etc.), évaluation des impacts environnementaux liés aux transports, études prospectives pour anticiper l'expansion urbaine, etc.

Nous avons choisi de présenter un travail de recherche mené par Korsu, Massot, Orfeuil et Proulhac sur la ville de Paris (Korsu, Massot, Orfeuil, & Proulhac, 2012). L'objectif de cette étude théorique est d'évaluer ce que serait le territoire francilien si l'on se donnait pour contrainte que chacun réside à moins de 30 minutes de son travail.

A partir de la localisation des ménages, de leur catégorie socio-professionnelle et de la distance à leur lieu de travail (données issues de l'enquête globale de transport de 2001 et du recensement de 1999 de l'INSEE) les auteurs ont déterminé quels ménages pourraient déménager et où ils pourraient aller (pour être à moins de 30 minutes de l'emploi d'au moins un membre de la famille et dans un logement aussi proche que possible de leurs

aspirations et possibilités). Les auteurs concluent que 27% des ménages d'actifs devraient être « réaffectés ».

D'après cette étude, la principale raison de l'éloignement des ménages de leur lieu de travail est la concentration de l'emploi qui limite les possibilités de logement. Par ailleurs « les ménages aux revenus les plus élevés choisissent leur résidence en fonction des aménités, dont celles du niveau social du voisinage. Ce faisant, ils bloquent par les prix et les quantités restant disponibles l'accès des catégories plus modestes plus orientées vers la proximité à l'emploi, et les conduisent à des choix éloignés » (Korsu et al., 2012).

Les auteurs estiment cependant que la structure de la ville ne serait pas bouleversée par ces relocalisations. En effet, seul les arrondissements centraux de Paris ne comportent pas suffisamment de logement pour supporter les relocalisations prévues par l'étude. La ville « idéale » de Korsu pourrait devenir réalité grâce à des développements urbains de logements et de bureaux ciblés et coordonnés.

Dans cette ville théorique, la circulation automobile pour l'ensemble des déplacements liés au travail serait réduite de 10% pour l'automobile et de 47% pour les transports publics (soit une réduction de 7% pour l'automobile et 40% pour les transports publics pour l'ensemble des déplacements).

1.6.6. Urbanisme et énergétique urbaine

Les urbanistes doivent prendre en considération l'ensemble des données citées précédemment afin d'intégrer la question de l'énergétique urbaine dans leurs projets (voir Tableau 11). Cependant, il est important de noter qu'une partie de ces informations doivent être retranscrites de manière plus synthétique que lorsqu'elles sont utilisées par des bureaux d'étude spécialisés. On peut citer le travail de Potvin qui préconise l'utilisation de cartes simplifiées pour transmettre des données d'ensoleillement et d'exposition au vent aux concepteurs (qu'ils soient architectes ou urbanistes) (Potvin, Demers, DuMontier, & Giguère-Duval, 2012). Sur le cas d'étude de la colline du parlement de Québec, les expositions saisonnières à l'ensoleillement et au vent ont été déterminées à l'aide des logiciels ECOTECT (Marsh, 1996) et IES-VE (IES, 2013). Les résultats en termes de niveaux de confort ont été traduits dans des cartes simplifiées où des niveaux de gris traduisent la nécessité de mesures d'adaptation* (protections solaires ou dispositifs brise-vent par exemple) (voir Figure 39).

* Voir glossaire

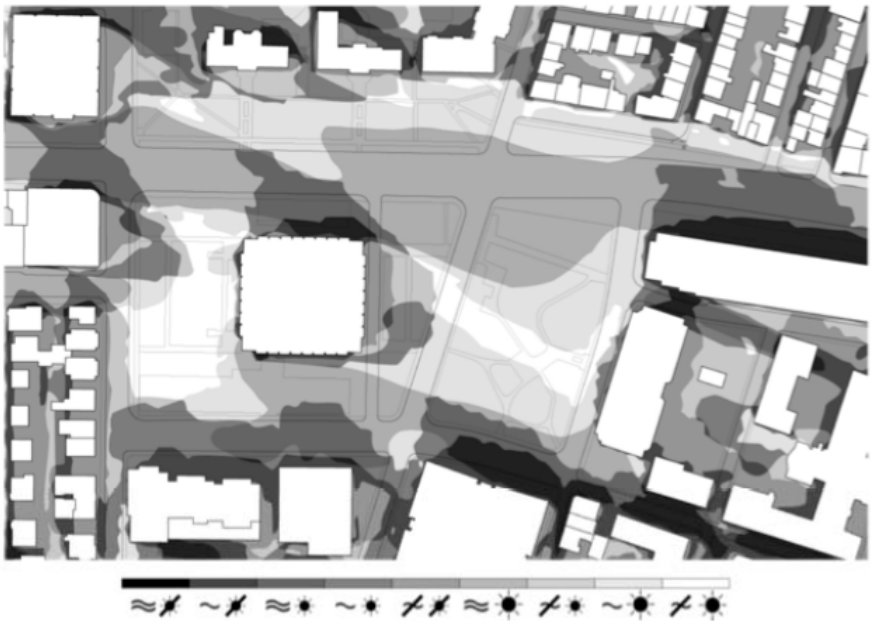


Figure 39 : Carte synthétique des contraintes climatiques en automne (Potvin, Demers, DuMontier, & Giguère-Duval, 2012)

De même, les décideurs publics doivent faire la synthèse des informations, connaissances et résultats transmis par les différents experts cités précédemment. Cette synthèse complexe nécessite parfois le recours à des outils d'aide à la décision que nous présenterons dans la troisième partie de ce mémoire.

Tableau 11 : Données nécessaires pour les urbanistes

Données	Échelle spatiale				Échelle temporelle	Résolution temporelle
	Région	Ville	Quartier	Bâtiment		
Usage des bâtiments ou espaces publics à planifier			X	X	De l'année au siècle	De l'heure à la saison
Données climatiques actuelles et futures	X					
Paysage et topographie du site	X	X	X			
Formes architecturales des bâtiments et type de quartiers aux alentours			X			
Masques solaires			X			
Répartition des usages des bâtiments et espaces publics		X	X			
Faune et flore locale	X	X	X			
Réseaux, flux et modes de déplacements		X	X			
Caractéristiques thermiques des matériaux des bâtiments et des espaces publics			X	X		
Matériaux locaux à disposition	X					
Estimation des consommations énergétiques de la zone étudiée	X	X	X			
Équipements techniques des bâtiments existant				X		
Sources d'énergie renouvelable à disposition			X			
Données climatiques actuelles et futures	X					
Sources de chaleurs anthropiques (industries, trafic routier, etc.)		X	X			
Réglementation locale et politique de la collectivité		X				
Classes socio-professionnelles des ménages	X	X	X			
Prix du carburant et des transports actuels et prospectifs	X	X				

Afin d'illustrer comment les problématiques d'énergétique urbaine peuvent être prises en compte dans un projet d'aménagement urbain, nous avons choisi de présenter le travail du cabinet Architecture & Paysage sur la réhabilitation du centre ancien de la ville de Foix (Assassin, 2013). Pour ce projet, les urbanistes n'ont pas réalisé d'études complexes de microclimat ou de thermique mais ont cependant tenté d'aborder la problématique de l'énergétique urbaine dans sa globalité.

Le quartier concerné est celui de la place de l'horloge en centre-ville de Foix. Bien que bénéficiant d'une localisation stratégique en cœur de ville, les bâtiments et les espaces publics qui s'y trouvent sont relativement dégradés. Par conséquent, ce quartier est déserté par les piétons et la voiture y est reine. L'objectif des urbanistes était d'améliorer l'image et le confort du quartier tout en prenant en compte des contraintes environnementales comme l'atténuation de l'effet d'ilot de chaleur urbain, la limitation des déplacements en voiture et la biodiversité.

Tout d'abord, dé-densifier le centre-ville par la destruction de deux immeubles insalubres permet de libérer des espaces pour créer des circulations piétonnes agréables et séparées de la circulation automobile, elle-même limitée à une vitesse de 30 kilomètres par heure. Le nombre de stationnements automobiles est réduit de 59 à 30 places.

Cette dé-densification permet aussi de créer des espaces plus lumineux et agréables en hivers et à la mi-saison comme on peut le voir sur l'étude d'ensoleillement réalisée par les urbanistes (voir Figure 40).

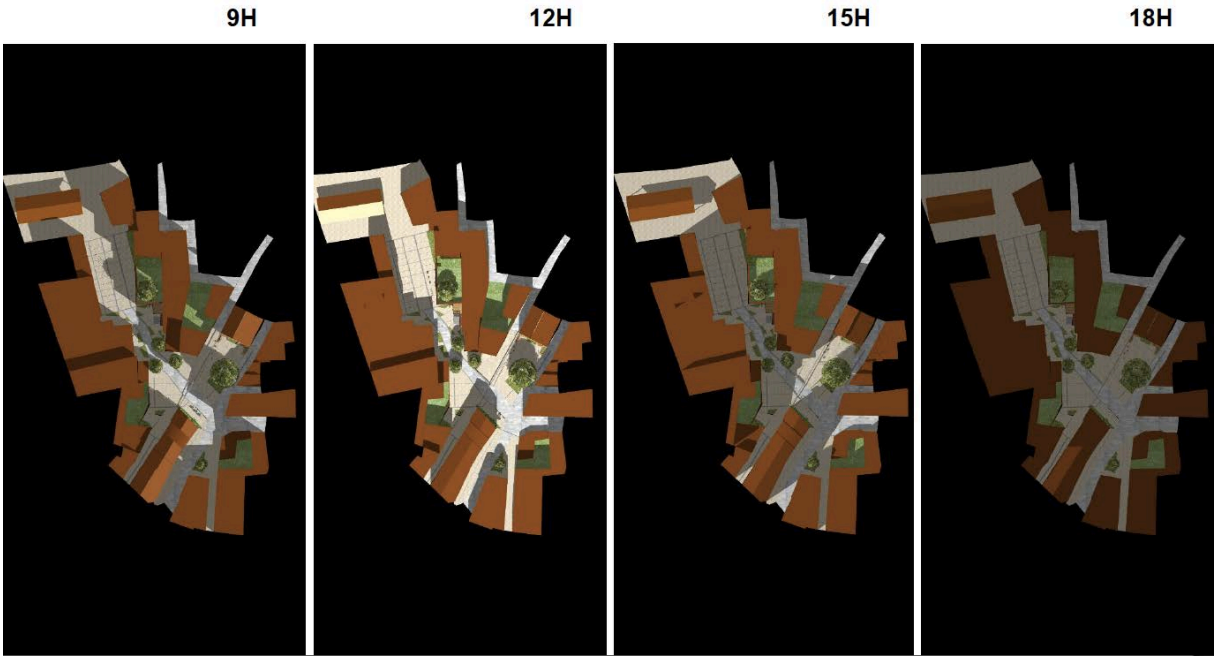


Figure 40 : Ensoleillement du centre ancien de Foix le 20 mars (Assassin, 2013)

Par ailleurs, concernant la question du microclimat urbain et de la biodiversité, les concepteurs mettent le végétal au centre du projet. Le parti est de s'inspirer de l'histoire de ce lieu dans lequel, au dix-neuvième siècle, on trouvait beaucoup de jardins. En effet, dans ces quartiers traditionnels denses, la chaleur estivale est difficilement dissipée et les jardins permettaient, à l'époque, de rafraichir les rues. Ainsi, les façades aveugles sont traitées avec des façades végétalisées qui doivent permettre de réduire localement la température de l'air en été. Huit arbres sont plantés ainsi qu'une grande variété de plantes odorantes et vivaces. Des revêtements de sol végétalisés pavent une partie de l'espace public et permettent la présence d'eau en ville.

Figure 41 : Plan d'aménagement du centre ancien de Foix (Assassin, 2013)

Simultanément, une aide à la réfection des façades a été proposée aux habitants du secteur et devrait permettre de financer 30 à 50 % de la pose d'isolation par l'extérieur et du remplacement de vitrage ancien par du double ou du triple vitrage.

Figure 42 : Vue de l'aménagement du centre ancien de Foix (Assassin, 2013)

2. Énergétique et morphologies urbaines : les densités de la ville

2.1. Densités

2.1.1. Définitions d'un indicateur controversé

La « densité » ne désigne qu'un rapport entre un indicateur statistique et une surface. Une infinité de variations est donc possible entre cet indicateur statistique (nombre de ménages, nombre d'actifs, nombre de logement, nombre de mètres carrés bâtis, nombre d'arbres, etc.) et cette surface (surface d'un pays, d'une ville, d'un quartier, d'un ilot urbain*, d'un jardin, de l'emprise au sol d'un bâtiment, etc.).

En urbanisme cependant, un nombre limité de densités est fréquemment utilisé, que l'on va désigner par densités urbaines. Il y a tout d'abord la densité de population, celle-ci désigne usuellement un nombre d'habitants par unité de surface au sol (généralement un quartier, une ville ou au-delà). Cela présente cependant l'inconvénient de ne pas rendre compte des portions de villes occupées par des bâtiments autres que résidentiels. Il arrive donc que l'on complète la densité de population avec la densité d'emplois ou d'entreprises. On peut alors calculer la densité d'activité humaine qui correspond à la somme de la densité de population et de la densité d'emploi (Moulinié & Naudin-Adam, 2005b).

Une grande partie de la littérature est également consacrée à la densité bâtie ou densité construite. Celle-ci désigne un rapport sans dimension entre une surface de plancher construite et une surface au sol. D'après une série de rapports de l'Institut d'Aménagement et d'Urbanisme d'Ile-de-France, ce qu'exprime cette densité et très largement dépendant de l'échelle considérée (Moulinié & Naudin-Adam, 2005b; Salat, 2011a) :

- A L'échelle du quartier, la densité permet de mesurer la relation entre espace privé et espace public. On parle alors de densité bâtie brute (voir Figure 43).
- A l'échelle de l'ilot, le périmètre est limité par l'espace public, la densité caractérise donc plus la morphologie urbaine. On parle alors de densité bâtie nette (voir Figure 43).
- A l'échelle de la parcelle, on parle de coefficient d'occupation du sol (COS*). Cet indicateur est celui des règlements d'urbanismes. Il est notamment utilisé dans les plans locaux d'urbanisme pour définir un «droit à bâtir» maximal sur une parcelle.

* Voir glossaire

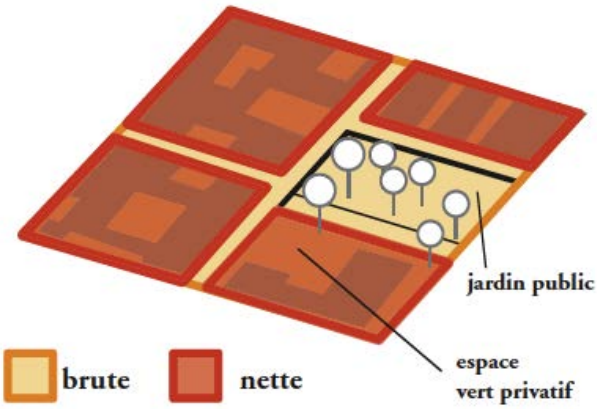


Figure 43 : Assiette de calcul des densités brute et nette (Moulinié & Naudin-Adam, 2005b)

Cette distinction entre densité brute et nette est également valable pour les densités de population et d'emploi. La densité de population nette ne prend en compte que les surfaces des parcelles réellement occupées par des logements. Elle concerne donc des échelles d'aménagement proches de celle de l'ilot. La densité de population brute prend en compte l'ensemble du territoire considéré sans exclusion. Elle permet une analyse plus globale d'un territoire.

Cependant, les densités que nous venons de définir ne sont pas suffisantes pour décrire un tissu urbain. En effet, il est possible de rencontrer des formes urbaines très différentes avec des densités bâties ou de population identiques (voir Figure 44).

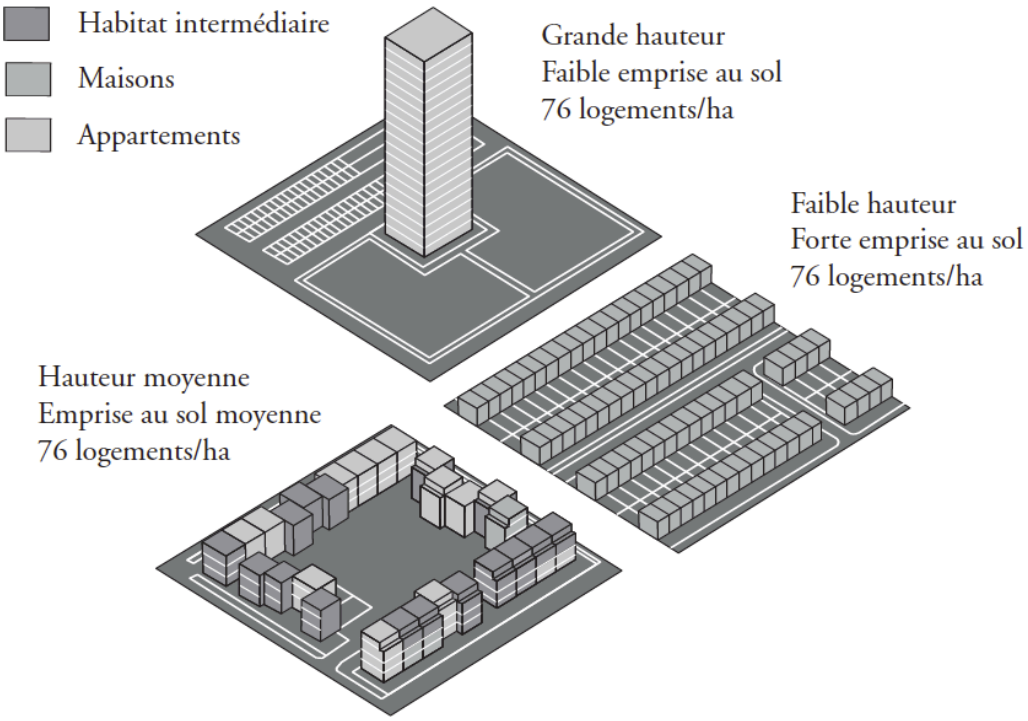


Figure 44 : Trois formes urbaines différentes avec des densités de population identiques (Moulinié & Naudin-Adam, 2005b)

Il est donc nécessaire d'ajouter au moins un indicateur de densité : le coefficient d'emprise au sol (CES). Celui-ci se définit comme le rapport entre l'emprise au sol des bâtiments et une unité de surface au sol. Comme pour les mesures de densité, le CES n'exprime pas la même chose selon l'échelle considérée.

Bien évidemment, la combinaison de la densité bâtie et du coefficient d'emprise au sol pour une surface de référence permet d'estimer le nombre de niveaux d'un bâtiment (et éventuellement sa hauteur si on connaît la hauteur entre étages). C'est donc une description plus fine de la forme urbaine que la densité bâtie seule.

Nous verrons dans la deuxième partie de ce mémoire qu'il existe d'autres indicateurs morphologiques permettant de caractériser encore plus finement la forme urbaine. Parmi ces indicateurs, nous avons déjà cité la compacité qui joue un rôle essentiel dans l'énergétique urbaine. Cependant, d'après Maïzia la densité bâtie reste l'indicateur essentiel. D'après lui « la densité, lorsqu'elle est élevée, garantit un niveau de compacité et par induction permet de réduire significativement les consommations des villes » (Maïzia, 2010).

2.1.2. Évolutions des densités

Bien que cela ait été fait dans certains travaux de recherche éminemment célèbres (Newman & Kenworthy, 1989), il est difficile de résumer une ville à sa densité bâtie ou de population globale.

En effet, la structure de la ville et la manière dont les densités s'y répartissent vont également avoir un impact sur l'énergétique urbaine (voir par exemple le chapitre 1.2.3 et les transports dans les villes multipolaires). Cette structure urbaine s'explique principalement par l'histoire de la ville considérée.

D'après Salat, la majorité des villes du monde partagent une caractéristique commune qui est un centre ancien dense. Ce centre s'est constitué et densifié au fil du temps ; par conséquent, il est souvent adapté au climat et aux usages locaux (Salat, 2011a). En effet, il est le résultat d'une architecture vernaculaire, l'aboutissement des expérimentations d'une population au fil des générations (Fathy, 1986). Notons que dans la perspective d'un changement climatique beaucoup plus rapide que les évolutions précédentes du climat terrestre, ces centres anciens ne seront plus forcément adaptés à leurs environnements climatiques.

Une partie de ces centres anciens, principalement en Europe, ont évolués aux dix-huitième et dix-neuvième siècles. Ainsi, sous l'influence de préoccupations hygiénistes, fonctionnalistes, politiques, esthétiques et de règles d'urbanismes plus strictes, sont apparus des tissus urbains comme l'haussmannien (Salat, 2011a; Sandrini, 2005). Ces tissus, bien que plus réguliers (alignement sur rue) restent très denses et particulièrement adaptés au contexte climatique local.

Après deux guerres mondiales, la France comme d'autres pays européens souffre d'une crise du logement. L'économie se remet peu à peu de la guerre et l'industrialisation du secteur de la construction permet de produire de l'habitat en masse. Par ailleurs, le courant moderniste préconise la libération des sols. Tous ces facteurs combinés mènent à l'émergence des grands ensembles : des tours ou des barres d'immeuble d'habitation destinées à accueillir en périphérie une grande quantité de population. Ces formes urbaines souvent peu denses sont très peu connectées au reste de la ville et soulèvent aujourd'hui des problèmes sociaux importants, notamment suite à un phénomène de paupérisation[*]. Elles sont également très critiquées au regard de leur piètres performances énergétiques, principalement dues au manque d'isolation (Arantes, Rollet, Baverel, & Quenard, 2010; Salat, 2011a).

[*] Voir glossaire

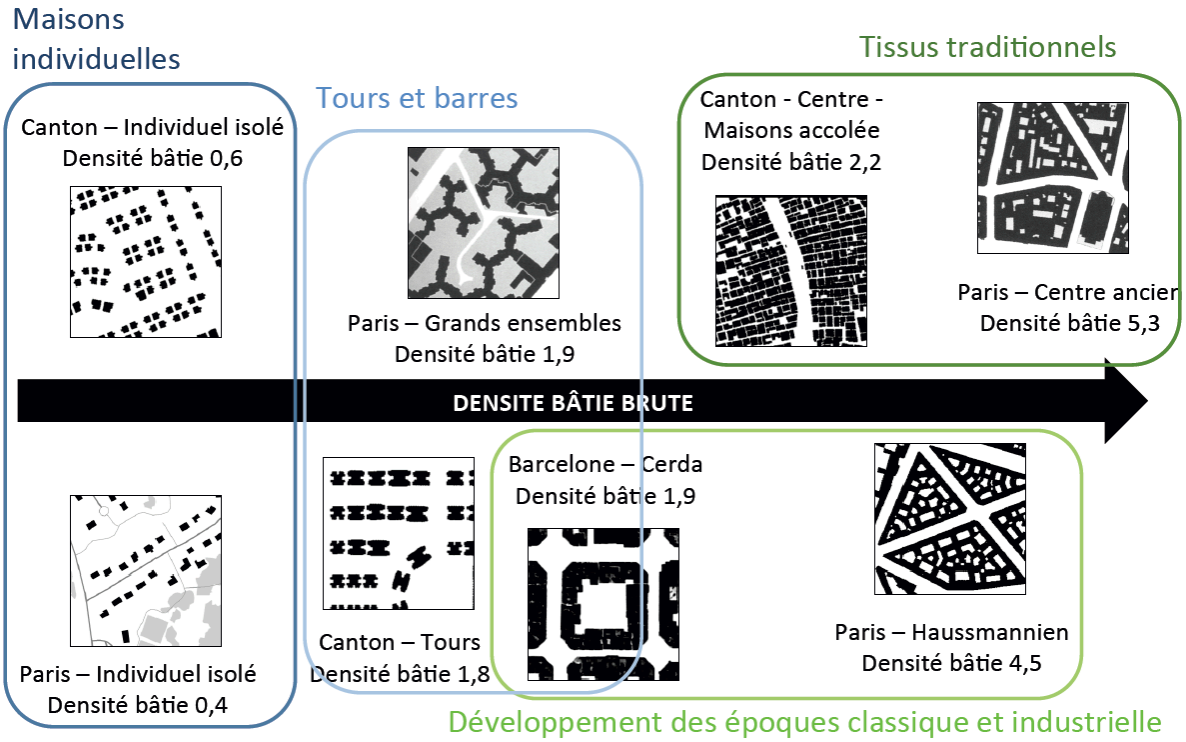


Figure 45 : Formes urbaines et densités (illustration de l'auteur)

Depuis les dernières décennies, les plus grandes villes à travers le monde sont également touchées par le phénomène de métropolisation* et de périurbanisation*. Il s'agit avant tout d'une croissance de population organisée autour des villes en formes urbaines peu denses (petit collectif ou maisons individuelles) (Ascher, 2010). La métropole se distingue de la ville classique par le fait que la limite entre urbain et rural y est moins présente. Il se forme ainsi de vastes espaces urbanisés mais discontinus, intégrant dans un même ensemble de la ville dense, du bourg, du néo-rural, etc. (Ascher, 2010; Laigle et al., 2012). D'une métropole à l'autre, cette périurbanisation n'a pas la même structure. Elle peut se faire de manière diffuse ou structurée en pôles (polycentrisme) ou le long des axes de transports (structure en doigt de gant). La structure que pourra prendre une métropole aura un impact sur l'énergétique urbaine en particulier sur l'ilot de chaleur urbain et sur les consommations énergétiques liées aux transports.

En ce qui concerne le bâti et sa densité, on a assisté au fil du temps à une diminution des densités construites (voir Figure 45). Il est donc légitime de se demander si la tendance peut être inversée aujourd'hui pour des préoccupations d'énergétique urbaine. Salat fait également remarquer que les tissus urbains ont perdu de leur complexité au fil du temps

* Voir glossaire

(voir Figure 46). D'après le chercheur, cette simplification morphologique s'accompagne d'une détérioration des performances énergétiques de la ville (Salat, 2011a).

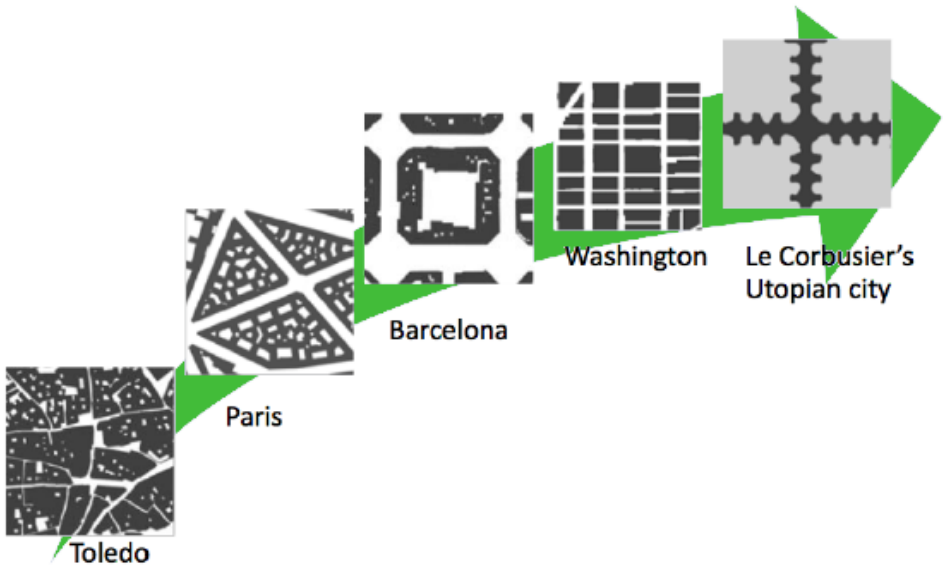


Figure 46 : Simplification des formes urbaines au cours du temps (Salat, 2011b)

2.1.3. La densité perçue

Bien que d'un point de vue énergétique la densité construite soit le plus souvent recommandée, les souhaits des français pour leur logement s'orientent vers des solutions d'habitat plutôt diffus. D'après un sondage réalisé en 2007 par TNS Sofres pour l'Observatoire de la Ville, près de neuf français sur dix sont séduits par l'habitat individuel (TNS Sofres, 2007). Cette enquête a été menée par entretiens en face à face auprès d'un échantillon de 1000 personnes, constitué selon la méthode des quotas (stratification selon le sexe, l'âge, la profession du chef de ménage, la région et la taille d'agglomération).

Les attentes des français sont doubles et peuvent sembler paradoxales :

- qualités d'espace, de lumière, accès à la nature (traits associés à la maison individuelle), avec en particulier le souhait d'espaces verts à moins d'un kilomètre de chez eux.
- services urbains, de proximité et de mouvement (caractéristiques du tissu urbain dense), avec en particulier le souhait des services essentiels à moins d'un kilomètre de chez eux.

Toujours d'après ce même sondage, 65% des français perçoivent la densité comme quelque chose de négatif. Cependant, il est nécessaire de rappeler que la densité perçue est

différente de la densité réelle. La densité perçue intègre des critères qualitatifs, notamment la présence d'espaces verts et la forme urbaine (Fouchier, 1997; Observatoire de la ville, 2007).

C'est surtout les grands ensembles qui souffrent d'un déficit d'image. Pourtant, leur densité est généralement beaucoup plus faible que celle des quartiers anciens car c'est précisément des qualités d'éclairement et de ventilation que visait l'urbanisme moderne. D'après Charmes « une première étape pour appréhender la perception de la densité est de distinguer la densité choisie et la densité subie. Les grands ensembles sont rejetés parce qu'ils sont largement imposés à des populations qui ne désirent pas y vivre. C'est une différence essentielle avec l'habitat individuel » (Charmes, 2010).

Pour mieux comprendre les perceptions des densités il est intéressant d'observer les résultats d'une enquête de l'APUR, réalisée en 2003 sur quatre quartiers de la capitale (Milliex, 2003). L'étude fait apparaitre que les quartiers traditionnels (Rochechouart et La Roquette), malgré une densité bâtie plus élevée, sont plus appréciés et perçus comme moins denses que les quartiers aux constructions plus récentes (Falguière et Jeanne d'Arc). L'auteur retient deux explications à ce phénomène. D'une part, l'animation des quartiers traditionnels est ressentie comme un élément positif par opposition au manque de commerces de proximité perçu dans les quartiers plus récents. D'autre part, les formes urbaines jouent un rôle primordial dans la perception de la densité : les immeubles modernes de type « immeubles discontinus » provoquent des effets de surestimation de la densité. A l'inverse, le tissu continu et resserré des quartiers anciens et la hauteur régulière et modérée des bâtiments haussmanniens sont appréciés par les habitants et perçus comme « à échelle humaine ».

2.2. Le paradoxe énergétique urbain

2.2.1. Problématique

Le paradoxe énergétique est une terminologie proposée par Quenard et Arantes (Arantes, Baverel, Rollet, & Quenard, 2011) et qui désigne le fait que, si une forme bâtie compacte permet de réduire les consommations énergétiques, elle génère également des contraintes en termes d'apports solaires. Également désigné sous le terme « paradoxe des surfaces » ce concept met en avant les objectifs contradictoires suivant :

- la nécessité de réduire la surface d'enveloppe afin de limiter les déperditions,
- la nécessité d'augmenter cette même surface pour maximiser les apports passifs (gains solaire par les baies, ventilation naturelle, dispositifs de captation d'énergie renouvelables en façade, dispositif de captation des eaux de pluies, …).

De manière plus large, on peut étendre ce concept à l'ensemble des problématiques énergétiques en ville. Depuis des décennies, la ville dense est mise en avant comme un modèle de ville énergétiquement vertueuse car, comme on l'a vu dans les chapitres précédents, elle permet de limiter les surfaces bâties déperditives et elle contribue à limiter les déplacements tant en nombre qu'en distance. Cependant, un bâti compact agencé dans une ville dense aura tendance à réduire les apports énergétiques gratuits (ventilation et éclairage naturels), à limiter l'utilisation de systèmes de production d'énergie renouvelable et à accentuer l'effet d'ilot de chaleur urbain. Le paradoxe énergétique urbain revient donc à interroger la densité construite de la ville au regard de problématiques énergétiques.

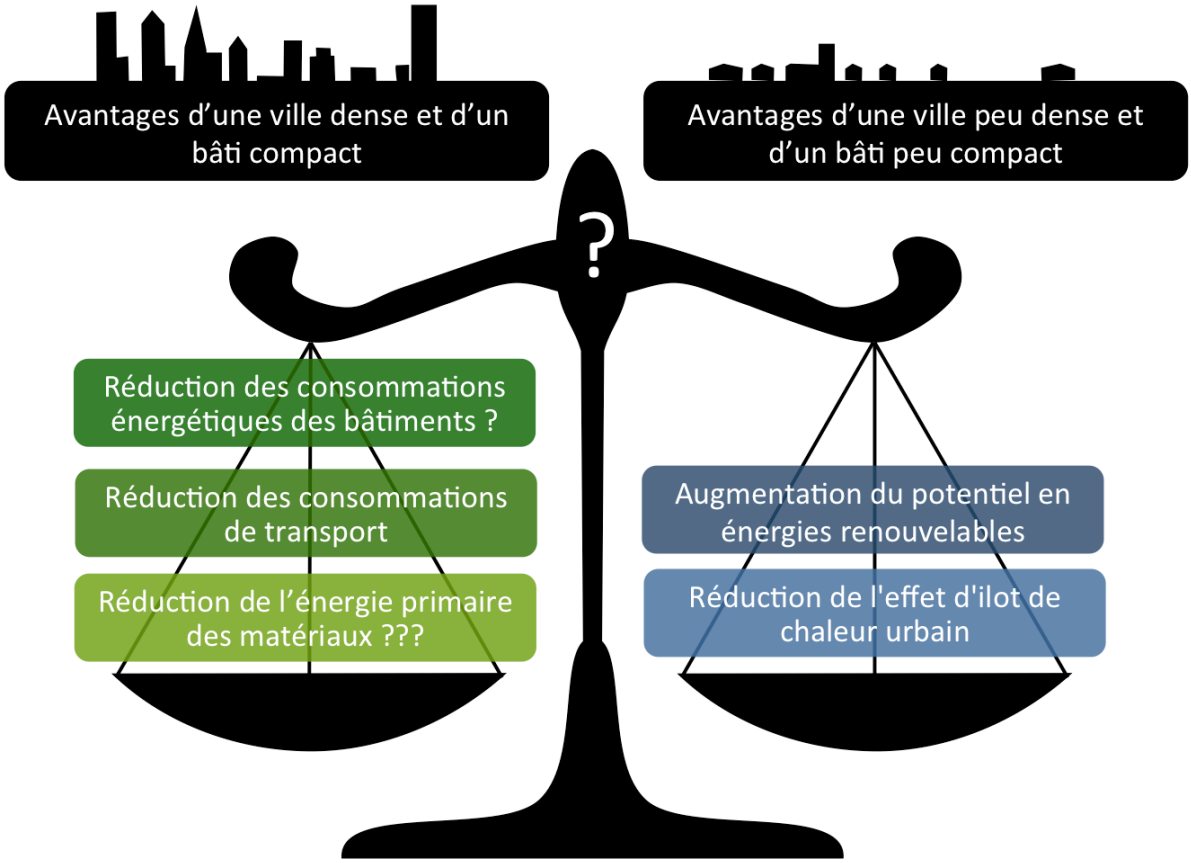


Figure 47 : Le paradoxe énergétique urbain et la densité de la ville – Représentation simplifiée (illustration de l'auteur)

Le Tableau 12 résume les problématiques énergétiques abordées dans les paragraphes précédents. Les cases colorées indiquent si, au vu des différents arguments, nous retenons plutôt les avantages de la forte densité ou de la faible densité.

Tableau 12 : Le paradoxe énergétique urbain – Tableau de synthèse

	Avantages d'une forte densité bâtie / Inconvénients d'une faible densité bâtie	Avantages d'une faible densité bâtie / Inconvénients d'une forte densité bâtie
Consommation de chauffage	- Le bâti compact et contigu que l'on rencontre dans les centres villes denses permet de réduire les surfaces déperditives.	- Dans une ville peu dense il y a peu d'ombres portées entre bâtiments qui réduiraient les apports solaires passifs. - Le bâti peu compact que l'on rencontre dans les villes peu denses permet d'augmenter les surfaces d'enveloppe captatrices d'apports solaires.
Consommation de climatisation	- Le bâti compact et contigu que l'on rencontre dans les centres villes denses permet de réduire les surfaces déperditives. - Les ombres portées que se font les bâtiments les uns sur les autres réduisent les apports solaires passifs.	- La réduction de l'ilot de chaleur urbain permet de réduire les besoins de climatisation. - L'espacement entre les bâtiments permet la circulation du vent et la mise en place de protections solaires donc favorise le rafraichissement naturel.
Consommation d'éclairage diurne et de ventilation		- Dans une ville peu dense il y a peu d'ombres portées entre bâtiments qui réduiraient les apports lumineux. - L'espacement entre les bâtiments permet la circulation du vent et favorise la ventilation naturelle. - Le bâti peu compact que l'on rencontre dans les villes peu denses permet d'augmenter les surfaces d'enveloppe et ainsi d'augmenter potentiellement le nombre de baies. Celles-ci faciliteront l'éclairage et la ventilation naturelle.
Consommations liées aux transports	- La ville dense permet de réduire le nombre et la distance des déplacements (moins d'étalement urbain, plus d'aménités, un réseau de transports en commun et de transports doux plus facile à mettre en place).	- Une ville laissant plus de place aux jardins privatifs et aux parcs pourrait permettre de réduire les déplacements longues distances.
Énergie primaire totale des matériaux	- Le bâti compact et contigu que l'on rencontre dans les centres villes denses permet de réduire la surface d'enveloppe et donc la quantité de matériaux. - Les formes urbaines denses limitent les réseaux (en particulier les réseaux routiers).	- Une ville peu dense implique des modes constructifs à faible intensité énergétique car il y a moins de contraintes structurelles.

<table>
<tr><th></th><th>Avantages d'une
forte densité bâtie
/
Inconvénients d'une
faible densité bâtie</th><th>Avantages d'une
faible densité bâtie
/
Inconvénients d'une
forte densité bâtie</th></tr>
<tr><td>Production d'énergies renouvelables en ville</td><td></td><td>- Dans une ville peu dense il y a peu d'ombres portées entre bâtiments qui réduiraient les apports solaires.
- L'espacement entre les bâtiments permet la circulation du vent et favorise l'éolien.
- Il y a plus d'espace libre pour l'implantation de géothermie ou de dispositifs de combustion de biomasse.</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Ilot de chaleur urbain</td><td colspan="2">- Une ville dense concentre des matériaux lourds, des activités dégageant de la chaleur anthropique, laisse peu de place au végétal et aux surfaces d'eau et freine les vents qui pourraient disperser la chaleur : elle accentue l'effet d'ilot de chaleur urbain. A l'inverse, une ville peu dense connaît un ilot de chaleur urbain moins intense mais plus étalé.</td></tr>
<tr><td>- Cela permettrait de réduire les consommations de chauffage en hiver dans certains contextes.</td><td>- Cela permet de réduire les consommations de climatisation.
- Les canicules étant moins accentuées par l'ilot de chaleur urbain, cela implique moins de risques sanitaires et environnementaux.</td></tr>
</table>

Les travaux de Martilli sont une bonne illustration du paradoxe énergétique urbain (Martilli, 2012). En se basant sur un modèle de canopée urbaine* couplé à un bilan énergétique du bâtiment, ce chercheur espagnol a simulé l'effet de variations de la densité d'habitants et de la fraction de végétation d'une ville sur les consommations de chauffage, de climatisation et sur l'effet d'ilot de chaleur urbain. Une des conclusions de Martilli est qu'on ne peut optimiser individuellement tous ces paramètres car ils sont inversement influencés par la densité.

On identifie bien ici la difficulté pour les collectivités de prendre des décisions quant aux questions de la densité urbaine et de l'énergie dans les villes. En effet, de nouvelles problématiques telles que l'intégration des énergies renouvelables et l'ilot de chaleur urbain viennent remettre en question des décennies de discours « pro-densité ». Par ailleurs, les décideurs ont à l'esprit d'autres contraintes culturelles, économiques, sociales et techniques.

* Voir glossaire

2.2.2. Les pistes de réflexion passées et actuelles

D'après le dictionnaire de l'urbanisme et de l'aménagement (P. Merlin & Choay, 1988), la recherche de densités optimales relève de l'idéologie. Cependant, de nombreux auteurs et praticiens ont tenté de définir une théorie de la densité. On peut bien sur citer le mouvement moderne et en particulier une de ses figures de proue, Le Corbusier. Sa volonté de concilier densités élevées et surfaces plantées le conduisit à préconiser une verticalisation et une fragmentation du bâti. Cela le mena à une proposition de « cité-jardin verticale » qu'il développa dans La cité radieuse.

Parmi les recherches universitaires menées sur le sujet durant les dernières décennies, on peut distinguer plusieurs types :

- des études paramétriques de villes ou de quartiers existants (Adolphe et al., 2002; Hui, 2001; Steemers, 2003),
- des études de formes urbaines archétypales (Martilli, 2012; Ratti, Raydan, & Steemers, 2003; The Martin Center for architectural and urban studies - Department of architecture - University of Cambridge, 1997),
- des études d'optimisation (Alexander, 2012; Arantes, Baverel, & Quenard, 2012; W. Wang, Zmeureanu, & Rivard, 2005).

Sans réaliser une revue de littérature exhaustive de ces études, nous allons en présenter certaines qui nous semblent représentatives de la question du paradoxe énergétique urbain.

Dès 1979, Steadman réalise l'une des premières analyses questionnant la densité au regard de problématiques énergétiques. D'après l'état de l'art réalisé par Vincent Augiseau pour le projet ANR « ASPECT » (ASPECT, 2012), Steadman aurait conclu « la très haute densité réduit la demande énergétique des transports mais accroît la demande énergétique d'éclairage et de rafraîchissement tout en exigeant des modes constructifs à plus forte intensité énergétique et en limitant les opportunités de recours à l'énergie solaire. A l'inverse, la faible densité fournit des opportunités de bâtiments à forte efficience énergétique fondée sur des gains solaires, mais au prix d'une forte demande énergétique de transport. » (Augiseau, 2012).

Hui a réalisé un travail similaire en établissant un inventaire des effets positifs et négatifs de la densité bâtie des villes sur les consommations énergétiques (voir Tableau 13). Sans trancher la question de l'intérêt de la densité bâtie, il souligne que dans une ville dense, la conception des bâtiments nécessite une attention particulière afin de garantir le confort des habitants ainsi que la limitation des consommations énergétiques et des pollutions générées par la ville (Hui, 2001).

Tableau 13 : Effet de la densité urbaine sur les besoins énergétiques de la ville (Hui, 2001)

Effects of urban density on city's energy demand

Positive effects	Negative effects
Transport — promote public transport and reduce the need for, and length of, trips by private cars *Infrastructure* — reduce street length needed to accommodate a given number of inhabitants — shorten the length of infrastructure facilities such as water supply and sewage lines, reducing the energy needed for pumping *Thermal performance* — multistory, multiunit buildings could reduce the overall area of the building's envelope and heat loss from the buildings — shading among buildings could reduce solar exposure of buildings during the summer period *Natural lighting* *Energy systems* — district cooling and heating system, which is usually more energy efficiency, is more feasible as density is higher *Ventilation* — a desirable air flow pattern around buildings may be obtained by proper arrangement of high-rise building blocks	*Transport* — congestion in urban areas reduces fuel efficiency of vehicles *Vertical transportation* — high-rise buildings involve lifts, thus increasing the need for electricity for the vertical transportation *Ventilation* — a concentration of high-rise and large buildings may impede the urban ventilation conditions *Urban heat island* — heat released and trapped in urban areas may increase the need for air conditioning — the potential for natural lighting is generally reduced in high-density areas, increasing the need for electric lighting and the load on air conditioning to remove the heat resulting from the electric lighting *Use of solar energy* — roof and exposed areas for collection of solar energy are limited

Cette étude, illustrée par le cas d'étude de Hongkong, trouve des échos dans d'autres villes du monde. Par exemple, Steemers a étudié les consommations énergétiques de chauffage, climatisation, éclairage et transport pour des bâtiments d'habitation et de bureau au Royaume-Uni (Steemers, 2003). Pour cela, il s'est notamment appuyé sur l'impact de l'angle d'obstruction (indicateur lié au prospect et exprimé en degrés) et son impact sur les consommations de chauffage, de climatisation et d'éclairage (voir Figure 48 pour les bâtiments de bureaux). Comme attendu, 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. En revanche, la consommation de climatisation diminue car les ombres portées protègent les façades. Steemers expose que les avantages et les inconvénients de la densité en regard de l'énergétique urbaine sont équilibrés. Il conclut en soulignant l'importance d'élargir le champ des connaissances pour trancher cette question pluridisciplinaire.

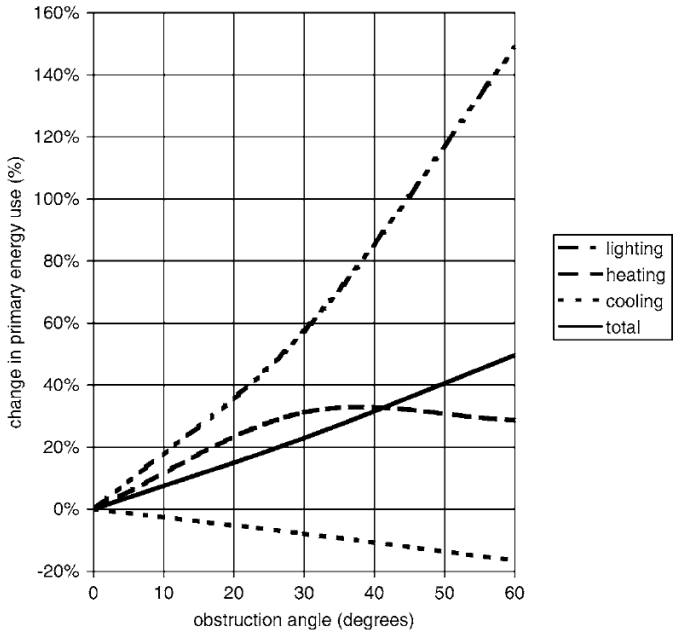


Figure 48 : Évolution des consommation d'éclairage, de chauffage et de climatisation en fonction de l'angle d'obstruction entre bâtiments de bureaux (Steemers, 2003)

Pour réaliser l'étude précédemment mentionnée, Martilli a comparé cinq villes théoriques pour lesquelles il a réalisé une série de simulations avec un modèle de canopée urbaine bidimensionnel. Dans ces simulations, Martilli n'a considéré qu'un seul jour d'été et a situé les cinq villes à une latitude de 45° Nord. Il a ainsi comparé cinq compositions urbaines simplifiées de dix millions d'habitants ayant des bâtiments de largeur constante (20 m) mais dont la hauteur et l'espacement varient de manière à modifier la densité bâtie et de population (voir Figure 49).

La Figure 50 présente les consommations de transport et de climatisation ainsi que le confort thermique dans ces cinq villes. Comme attendu, les consommations de transports diminuent lorsque la densité augmente car les distances à parcourir sont plus faibles. En revanche, la relation entre consommation de climatisation et densité n'est pas linéaire. D'après Martilli, pour de très faibles densités bâties, c'est la possibilité d'implanter des espaces verts qui permet de rafraichir l'air ambiant et de réduire les consommations de climatisation. En revanche, pour de très fortes densités bâties, les ombres que se font les bâtiments les uns sur les autres permettent de réduire les consommations de climatisation dans des proportions plus importantes. Pour finir, le critère de confort thermique est défini comme le nombre d'heures au-dessus de 30°C. L'inconfort thermique est clairement accentué dans les villes à forte densité de population. Une des conclusions de Martilli est qu'on ne peut optimiser individuellement tous ces paramètres car ils sont inversement influencés par la densité. Une ou plusieurs solutions optimales peuvent cependant être trouvées à condition d'établir des priorités entre les différents paramètres (consommations

énergétiques, émissions de gaz à effet de serre, …). Nous verrons dans la troisième partie de ce mémoire comment l'aide à la décision multicritère peut être un moyen de traiter cette question.

City size (km)	Population density (inhabitants /hectare)	Building height distribution	Street width (m)	Urban fraction
100	10	100% **5m**	140.	40%
40	62	100% **5m**	25.	70%
25	160	20% 5m 60% **10m** 20% 15m	30.	100%
20	250	20% 10m 60% **15m** 20% 20m	28.	100%
16	391	20% 15m 60% **20m** 20% 25m	21.	100%

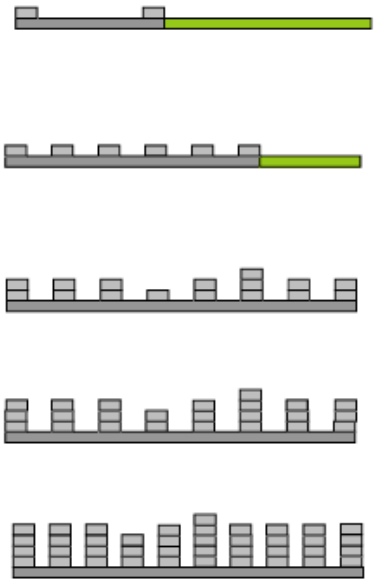


Figure 49 : Caractéristiques des cinq villes de l'étude (Martilli, 2012)

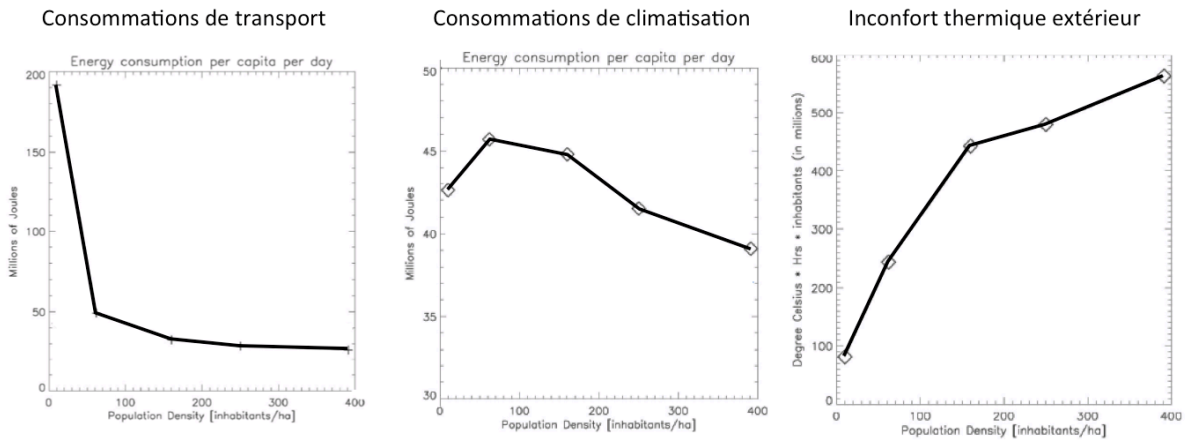


Figure 50 : Consommation de transport, de climatisation et indice de confort pour différentes densités de population (Martilli, 2012)

Sans nécessairement apporter de réponse à la question de la densité optimale, certaines études ont conduit à des préconisations d'aménagement urbain. On peut par exemple citer les travaux de Quenard qui ont mené à préconiser une nouvelle morphologie architecturale répondant au concept du Core-Skin-Shell (Arantes et al., 2010). Ce chercheur propose de dédoubler l'enveloppe des bâtiments afin de répondre à deux objectifs antinomiques. Une première fonction de protection est assurée par une enveloppe compacte, ou « skin », limitant les surfaces déperditives. Une deuxième fonction de captation de l'énergie solaire, de la ventilation, des eaux pluviales, etc. est assurée par une deuxième enveloppe nommée « shell », déployée par-dessus la première. Cette deuxième enveloppe plus vaste permet également une plus grande liberté architecturale. La stabilité et l'inertie du bâtiment sont assurées par le cœur du bâtiment, ou « core » : par exemple des murs intérieurs porteurs.

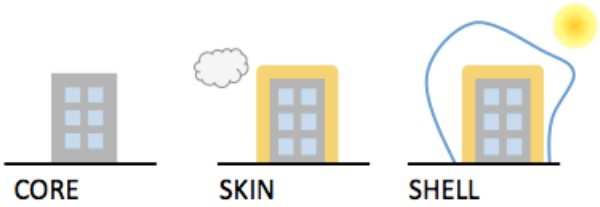


Figure 51 : Le concept Core-Skin-Shell (illustration de l'auteur d'après (Arantes et al., 2010))

Dans un registre tout à fait différent, les travaux de Ratti, Raydan et Steemers ont mis en avant les qualités énergétiques des morphologies traditionnelles à cour (Ratti et al., 2003). D'après ces chercheurs, cette typologie combine les avantages d'une forte densité avec des hauteurs réduites permettant de favoriser l'accès au soleil. La structure des cours permet d'augmenter la surface d'échange (pour maximiser les apports solaires et la ventilation naturelle) tout en permettant un microclimat et une qualité de vie à l'échelle des usagers. En été, les fenêtres peuvent s'ouvrir sur les rues étroites et abritées du soleil. En hiver, les fenêtres peuvent s'ouvrir sur la cour plus large et plus ensoleillée.

Cette étude a conduit Salat à suggérer un travail d'optimisation de ces morphologies (Salat, 2011a). D'après ce chercheur français, on peut trouver une analogie entre les formes urbaines traditionnelles à cour et les structures fractales (voir Figure 52 ci-après). Cette structure partiellement fractale de la ville traditionnelle lui permettrait d'évoluer dans le temps en multipliant sa surface d'enveloppe sans augmenter son emprise au sol. En se basant sur cette réflexion, Salat émet l'hypothèse qu'un certain degré de fractalité permettrait d'atteindre une densité optimale selon le contexte climatique.

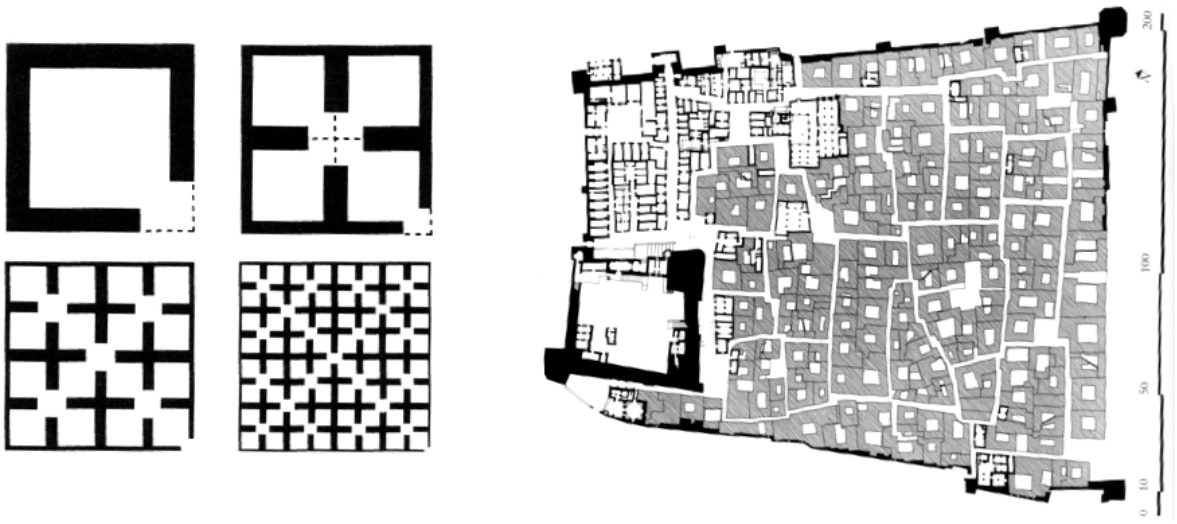


Figure 52 : Structures fractales idéalisées et structure fractale de la ville (Salat, 2011a)

2.2.3. Conclusion

Le paradoxe énergétique urbain est donc une problématique complexe à laquelle peu de chercheurs ont pu apporter de réponses concrètes. Cependant, les enjeux de cette question sont majeurs : faut-il chercher à densifier la ville ? Quelles limites de densités ne pas dépasser ? Quelles problématiques énergétiques auront le plus d'impact dans un futur au climat changeant ? … Il est primordial que la recherche apporte des réponses à ces questions et cela ne peut se faire qu'au travers d'études pluridisciplinaires adaptées à des contextes spécifiques (voir chapitre 1.6).

Répondre à la question du paradoxe énergétique urbain est d'autant plus urgent que cette problématique a des applications directes dans les politiques et les pratiques urbaines. Comme nous allons le voir dans le chapitre suivant il existe encore de nombreux obstacles à une prise en compte raisonnée de l'énergétique urbaine dans l'urbanisme.

2.3. Problématiques énergétiques dans les politiques et les pratiques urbaines

2.3.1. Contexte – Politiques énergétiques de l'échelle mondiale à l'échelle locale

Comme on a pu le voir précédemment, la ville a un réel impact sur l'énergie consommée, sur les émissions de GES, sur le changement climatique ainsi que, bien sûr, sur le microclimat urbain. Ainsi, en France comme ailleurs, différentes politiques ont eu pour objectif de réduire cet impact.

Les objectifs de Kyoto (moins 8 % d'émission de GES entre 1990 et 2012 en Europe) ont été traduits en France par une volonté de stabiliser les émissions de GES au niveau de celles de 1990. Pour ce faire, un plan d'actions national a été adopté en 2004 et révisé en 2006 (Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable, 2004, 2006). En France, le « Facteur 4 » qui consiste à diviser par quatre ses émissions de GES d'ici 2050 (sur la base de 1990) (ADEME, 2013) est issu de ces considérations.

Ces objectifs ambitieux sont en ligne avec les travaux du GIEC qui mettent en évidence les effets d'une augmentation des GES sur le climat (GIEC et al., 2008). L'accord de Copenhague de décembre 2006 a ainsi acté que « Pour atteindre l'objectif ultime de la Convention [convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques] consistant à stabiliser les concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère à un niveau qui empêche toute perturbation anthropique dangereuse du système climatique, nous entendons, compte tenu de l'opinion scientifique selon laquelle la hausse de la température mondiale devrait être limitée à 2°C, renforcer notre action concertée à long terme visant à combattre les changements climatiques, sur la base de l'équité et dans l'optique d'un développement durable. » (Nations Unies, 2009).

En France, les lois Grenelle 1 (promulguée en Août 2009) et Grenelle 2 (promulguée en Juillet 2010) ont défini des engagements environnementaux dont une partie est destinée à être mise en œuvre à l'échelle urbaine (Commissariat général au développement durable, 2012a). On peut en particulier citer les engagements suivants :

- Généralisation des constructions base consommation à l'horizon 2012 et des bâtiments à énergie positive à l'horizon 2020 ;
- Réduction des consommations énergétiques du parc de bâtiments existants de 38% d'ici 2020 par la mise en place d'un programme de rénovation énergétique ;
- Réduction des émissions de GES des véhicules particuliers ;
- Développement d'alternatives au véhicule particulier ;
- Déploiement d'une production énergétique décarbonée.

En 2011, à la suite des lois Grenelle, un Plan National d'Adaptation au Changement Climatique (PNACC) a été proposé par le Ministères du Développement Durable, des Transports et du Logement. L'objectif du PNACC est de présenter des mesures concrètes « pour préparer, pendant les cinq années à venir, de 2011 à 2015, la France à faire face et à tirer parti de nouvelles conditions climatiques » (Ministère du Développement durable et de l'Energie, 2011, 2013b). Ainsi, ce plan traduit un changement de philosophie de l'atténuation* vers l'adaptation. En termes d'énergétique urbaine on peut citer les mesures suivantes :

- Favoriser les équipements de refroidissement plus efficaces ou utilisant des sources d'énergies renouvelables ou de récupération ;
- Favoriser le végétal en ville ;
- Limiter l'effet d'îlot de chaleur ;
- Adapter les bâtiments avec pour objectif des exigences renforcées en termes de confort thermique estival.

La loi Grenelle tout comme le PNACC donnent une place centrale à l'échelle décisionnelle locale en décrivant les collectivités territoriales comme des acteurs essentiels de la définition et de la mise en œuvre des politiques de développement durable (engagement n°170 à 173 du Grenelle) (Grenelle 2, 2010). En effet, les collectivités territoriales peuvent agir au travers de leurs compétences directes (bâtiments, déchets, transports collectifs, distribution d'eau et d'énergie, …) et de leur responsabilité légale d'organisation et de planification (SCOT, PDU, PLU, …). En outre, elles sont à même de mobiliser les acteurs locaux et les citoyens.

Ainsi, il existe un certain nombre de dispositifs destinés à traduire à l'échelle locale les engagements nationaux. Parmi eux, les Plans Climat Énergie Territoriaux (PCET) ont été institués par le Plan Climat National et repris par les lois Grenelle 1 et 2. L'objectif d'un Plan Climat Énergie Territorial est (1) de limiter l'impact du territoire sur le climat en réduisant les GES (atténuation) et (2) de réduire la vulnérabilité du territoire au changement climatique (adaptation).

* Voir glossaire

2.3.2. Les freins à la prise en compte de l'énergétique urbaine

Un champ de connaissance en structuration

Les questions de l'atténuation et de l'adaptation des villes au changement climatique se posent avec ambivalence dans le champ de l'urbanisme et de l'aménagement (Molina, 2012). Cette ambivalence résulte de plusieurs paramètres.

D'une part, la climatologie urbaine et ses applications en énergétique urbaine sont un champ relativement récent et complexe. Si l'étude du climat trouve ses origines très tôt dans l'histoire des sciences, ce n'est qu'à partir des années 1930 que la climatologie urbaine va apparaître, pour se développer quelques dizaines d'années après avec la généralisation des outils informatiques de modélisation et de la télédétection (Colombert, Salagnac, Morand, & Diab, 2012). La conséquence est que cette discipline est accompagnée d'un certain nombre d'incertitudes :

- Incertitudes sur le changement climatique en lui-même et les impacts qu'il pourrait avoir. Par exemple, l'élévation de température prévue à l'échelle mondiale par les scientifiques du GIEC varie de + 1,1°C à +6,4°C selon le scénario (GIEC et al., 2008). A l'échelle d'une ville, cela peut influencer grandement les choix de conception urbaine.
- Incertitudes sur les effets du changement climatique sur la ville. Par exemple, comme on l'a vu précédemment, il n'est pas certain que le réchauffement climatique ne s'accompagne pas dans certains pays comme la France d'un gain important en terme de consommations de chauffage (Smith & Levermore, 2008).
- Incertitudes sur les dispositifs d'atténuation et d'adaptation. En particulier, le paradoxe énergétique urbain reste un phénomène complexe et il est difficile d'en tirer des conclusions concrètes en termes d'aménagement.

Ces incertitudes sont un frein à la transmission des savoirs et savoirs-faire vers la sphère des décideurs et des praticiens. Ainsi, la climatologie urbaine et le rôle qu'elle peut jouer sur les consommations d'énergie à l'échelle de la ville demeurent peu connus des praticiens et de fait, peu pris en compte dans leurs décisions. Dans le cadre de cette thèse, nous avons réalisé un sondage auprès des adhérents de l'APUMP (Association des Professionnels de l'Urbanisme de Midi-Pyrénées) (voir annexe 1 pour plus de détails). Parmi les préoccupations environnementales auxquelles sont soumis ces professionnels de l'urbanisme, la question du microclimat urbain est la dernière traitée (voir Figure 53). Dans le cas où une thématique est peu ou pas traitée, nous avons demandé aux sondés quelles en étaient les raisons (voir Figure 54). C'est bien un manque de connaissances qui apparaît

comme la première explication (pour 32 % des personnes interrogées). Le manque de qualification apparaît comme la troisième raison (pour 20 % des sondés).

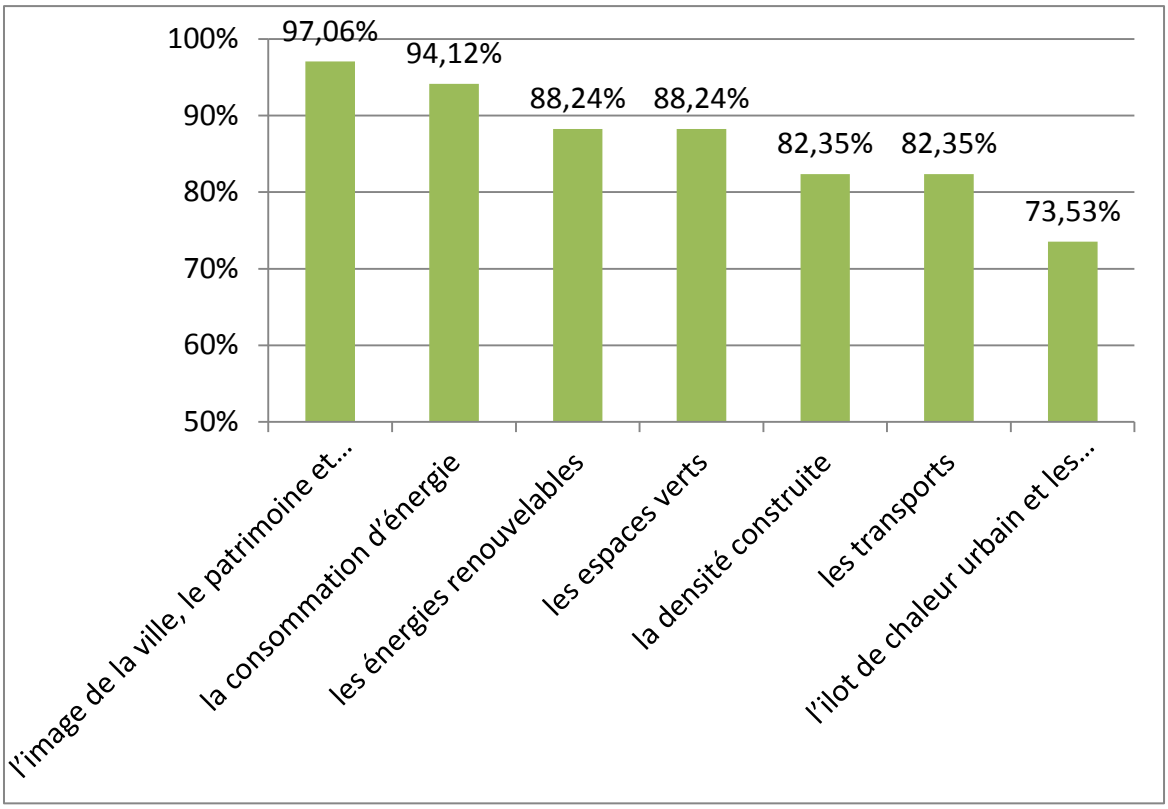


Figure 53 : Sondage APUMP – Parmi les thématiques environnementales suivantes, quelles sont celles auxquelles vous êtes sensibles ?

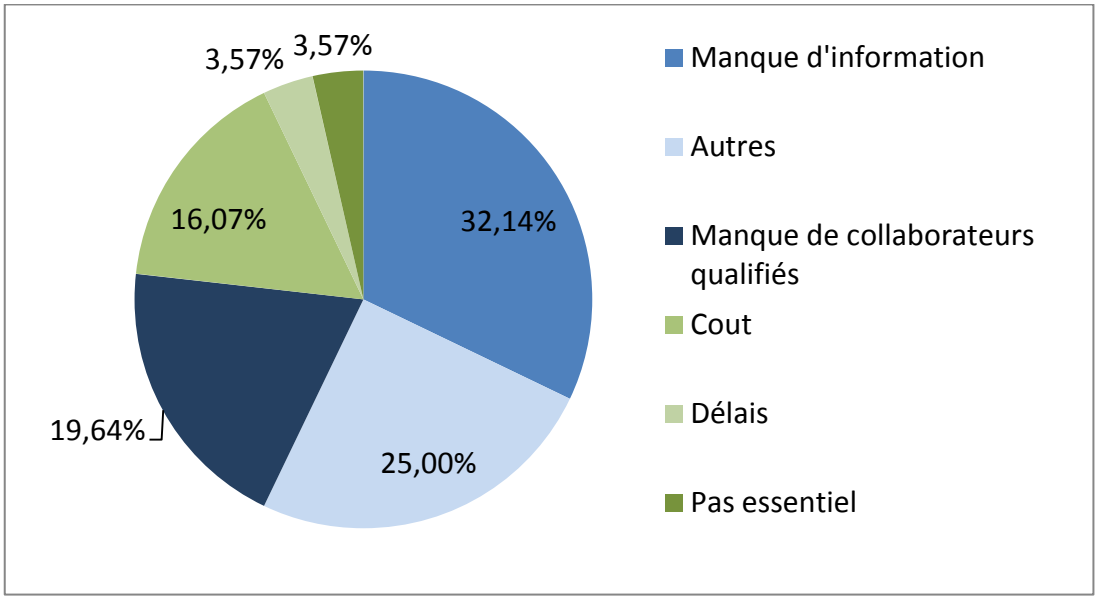


Figure 54 : Sondage APUMP – Dans le cas où ces thématiques ne sont pas prises en compte dans votre pratique professionnelle, quelles en sont les raisons ?

La climatologie urbaine et ses applications en énergétique urbaine sont donc un champ encore en structuration et cette structuration prend du temps. Malgré cela, il est demandé aux acteurs de l'urbanisme d'agir dans l'urgence pour atteindre des objectifs précis tels qu'évoqués dans le chapitre précédent.

Parmi les freins à la prise en compte du changement climatique dans les politiques urbaines, il faut rajouter le pessimisme qui est perçu dès que l'on parle d'adaptation au changement climatique (Colombert, 2012). En effet, contrairement à l'atténuation qui peut être valorisée d'un point de vue politique, l'adaptation planifiée est perçue par une partie des décideurs comme un renoncement, engendrant des actions coûteuses aux bénéfices potentiels incertains.

Des outils règlementaires imparfaits

A l'heure actuelle, les problématiques énergétiques sont essentiellement prises en compte dans la réglementation française à l'échelle du bâtiment (en particulier au travers de la réglementation thermique RT2012) et très peu à l'échelle urbaine.

Les dispositifs règlementaires encadrant l'aménagement du territoire se basent principalement sur deux outils de planification : les Schémas de Cohérence Territoriales (SCoT) et les Plans Locaux d'Urbanisme (PLU).

Le SCoT est un document de planification visant à définir une politique à l'échelle d'un territoire (communes et établissements publics de coopération intercommunale). Cet objectif lui permet de définir des stratégies environnementales, notamment au travers du diagnostic territorial. Cependant, le SCoT n'est pas opposable aux tiers ce qui réduit son efficacité.

Le PLU en revanche est un document d'urbanisme règlementaire qui s'applique à toutes les nouvelles constructions, aux travaux de rénovation et aux démolitions. Il est donc plus susceptible de donner lieu à des prescriptions quant à la prise en compte de problématiques environnementales urbaines. De plus, le PLU doit être en cohérence avec le SCoT et donc traduire les politiques environnementales. D'après Colombert, le PLU est un bon outil pour modifier la forme urbaine (Colombert, 2008a). Cependant, son impact reste limité (au niveau du choix des matériaux par exemple) et il n'est, à l'heure actuelle, pas utilisé dans l'objectif de diminuer les consommations énergétiques ni d'améliorer le microclimat urbain. En particulier, il n'est pour l'instant pas possible d'imposer une densité bâtie minimale sur une parcelle au travers du PLU.

Colombert souligne que le meilleur dispositif d'aménagement règlementaire demeure les Zones d'Aménagement Concertées (ZAC). Ces zones urbaines sont soumises au PLU mais également à un règlement souvent plus restrictif qui peut permettre la prise en compte de problématiques environnementales plus pointues. Cependant, ces ZAC ne concernent qu'une très faible partie des zones urbaines, ce qui limite leur impact.

En conclusion, PLU et SCoT pourraient être des outils pour la prise en compte de problématiques environnementale à l'échelle urbaine, mais ils sont très peu utilisés comme tels. Une des limites réside dans la dispersion des dispositifs à différents niveaux de la législation Française. D'après Ducroux (ADEME, 2006), il existe un risque de « conflit de législations (droit de la construction, droit de l'environnement, droit de l'urbanisme) ». En effet « […] la rédaction de documents d'urbanisme réglementaires nécessite d'opérer des arbitrages, entre des logiques purement juridiques et des logiques opérationnelles qui incitent à inclure des dispositifs dont on ne cerne pas totalement la validité juridique ».

D'autres chercheurs (Hego Deveza Barrau, 2011; Souami, 2007) ont également mis en avant que le découpage foncier sur lequel se base la réglementation urbaine est un frein à l'intégration de certains dispositifs environnementaux. A titre d'exemple, Hego Deveza Barreau a exposé qu'il est difficile d'imposer la mise en place de panneaux solaires alors que le régime relatif à la copropriété n'explicite pas les conditions de leur mise en place ni de leur exploitation.

Pour finir, on note que les questions du microclimat urbain et de l'adaptation au changement climatique restent rarement évoquées dans les outils règlementaires au profit des thématiques liées aux économies d'énergie et à la réduction des émissions de GES.

2.3.3. Les pistes d'améliorations liées à la recherche

Comme on vient de l'évoquer, la climatologie urbaine et l'impact qu'elle peut avoir sur l'énergétique urbaine sont des champs relativement récents, complexes et pluridisciplinaires. Leur exploration est donc nécessaire afin de consolider les savoirs et afin que les différentes disciplines qui les composent apprennent à s'acculturer. C'est ce qui se passe actuellement à travers plusieurs projets de recherche tels que les projets MUSCADE, ACCLIMAT, OURANOS, ARCADIA, etc. En effet, la recherche est un terrain idéal pour cette exploration en raison de sa temporalité spécifique, de la place qui y est laissée pour l'expérimentation de méthodes et de la relative liberté de proposition. Ci-après sont brièvement présentés quelques exemples de ces projets de recherches pluridisciplinaires.

Le projet ARCADIA (Adaptation and Resilience in Cities: Analysis and Decision making using Integrated Assessment) a pour objectif la compréhension des interrelations entre changement climatique, économie, aménagement du territoire, transports et environnement bâti (ARCCCN, 2013). En se basant sur différents modèles et sur les savoirs des praticiens, le projet évalue les risques et les possibilités d'adaptation au changement climatique de villes au Royaume-Uni. La finalité du projet est de fournir des outils d'aide à la décision pour l'aménagement urbain.

OURANOS est un consortium ayant pour objet l'étude des changements climatiques. Il porte de nombreux projets de recherches dont un lié aux problématiques urbaines et intitulé « Changements climatiques et transformation urbaine : un projet de recherche-action pour renforcer la résilience de la communauté métropolitaine de Québec ». L'objectif du projet est d'étudier la capacité de la ville de Québec et de ses acteurs à s'adapter aux changements climatique au travers d'un diagnostic urbain multidisciplinaires (OURANOS, 2013).

Les projets MUSCADE et ACCLIMAT, portés par le CNRM, visent à étudier, de nos jours à l'horizon 2100, les interactions entre structure de ville, procédés constructifs, consommation d'énergie, production d'énergie décentralisée, microclimat urbain et changement climatique (Marchadier et al., 2012; Masson et al., 2012). Ces projets étudient le cas des agglomérations parisienne (MUSCADE) et toulousaine (ACCLIMAT) à l'échelle du siècle afin de tenir compte de l'inertie de la structure urbaine et du changement climatique. Un jeu de scénarios combinant hypothèses climatiques, macroéconomiques, urbaines, techniques et énergétiques a tout d'abord été construit. A partir des scénarios, le comportement de différents éléments (bâti, ville, microclimat) et leurs interactions ont été étudiés à l'aide d'outils de modélisation numérique. La finalité de ces projets est d'identifier des leviers d'action en termes de réglementation du bâti, modes de production d'énergie décentralisée et aménagement urbain.

Comme on peut le voir au travers de ces projets, la recherche permet d'explorer le domaine des possibles en termes d'énergétique urbaine. Particulièrement au travers de la simulation, elle peut être un outil pour choisir les solutions à mettre en œuvre en priorité. Par exemple, faut-il autoriser l'étalement urbain pour laisser plus de place aux espaces verts urbains, ou densifier pour réduire l'impact des transports ? Elle peut également permettre de donner des réponses concrètes sur l'efficacité de différentes mesures. Par exemple, une étude réalisée par de Munck et al. (de Munck et al., 2013) a permis de mettre en évidence l'effet de différents systèmes de climatisation sur l'effet d'ilot de chaleur urbain à Paris.

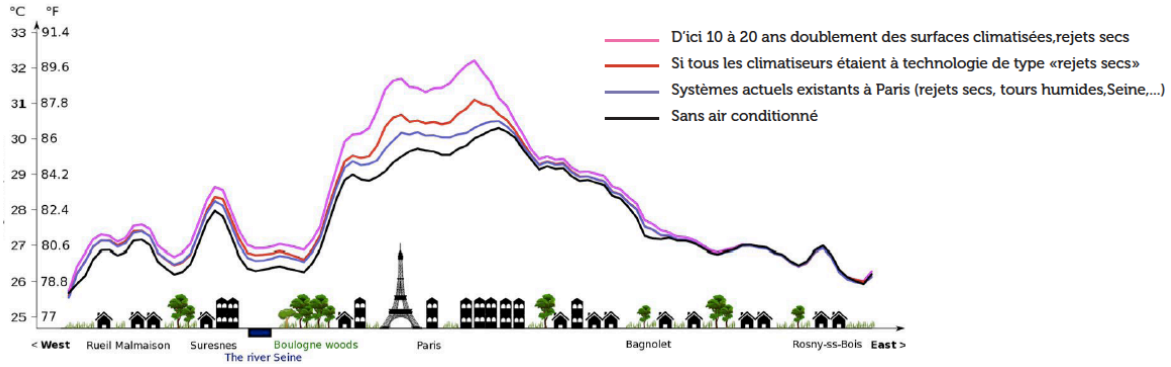


Figure 55 : Effet de différents systèmes de climatisation sur l'ilot de chaleur urbain (de Munck et al., 2013)

Pour finir, comme le fait remarquer Géraldine Molina, les chercheurs peuvent mettre en garde les praticiens contre les « solutions miracles » (Molina, 2012). La démystification de la densification que nous avons évoquée est un premier exemple. On peut également citer le phénomène peu connu du stress hydrique des végétaux. Alors que cette solution est perçue comme idéale pour lutter contre l'ilot de chaleur urbain par beaucoup d'aménageurs, on sait aujourd'hui que le choix de végétaux non adaptés et/ou un contexte particulièrement sec conduira à une situation de stress hydrique. Les végétaux perdront une partie de leurs feuilles et ne pourront alors plus jouer leur rôle de rafraichisseurs urbains par évapotranspiration et protection solaire. Au contraire, ils bloqueront une partie du rayonnement infrarouge retournant vers l'atmosphère par un phénomène de piégeage radiatif et contribueront ainsi à l'ilot de chaleur urbain.

2.4. Conclusion et positionnement

Densité : ce terme, s'il est mal défini, peut être mal compris : parle-on de densité bâtie ou humaine, de densité brute ou nette, de densité mesurée ou de densité perçue ? La densité reste dans tous les cas loin de l'idéal des français. Par ailleurs, si la densité bâtie a longtemps été plébiscitée par les énergéticiens, la prise en compte de nouvelles disciplines la remet aujourd'hui en question au regard de l'énergétique urbaine. Un certain nombre d'études ont tenté d'apporter des réponses au paradoxe énergétique urbain à l'échelle d'un bâtiment ou d'un petit groupe de bâtiments. Cependant, la majorité de ces études n'a pris en compte qu'un nombre limité de critères ; la consommation d'énergie pour le chauffage étant le critère le plus fréquemment étudié ; le microclimat urbain étant celui le plus souvent négligé.

Comme on vient de le voir, une des plus grandes limitations des recherches existantes est la difficulté de prendre en compte un grand nombre de savoirs issus de disciplines très différentes. Ainsi, cette thèse s'appuie sur deux projets de recherche nationaux, ACCLIMAT et MUSCADE, ce qui nous permet une approche pluridisciplinaire. En particulier, le microclimat urbain et l'effet d'ilot de chaleur urbain sont des critères susceptibles de remettre en cause la doctrine de la densité à tout prix car leurs effets ont peu été mis en relation avec la performance énergétique des formes urbaines.

Le manque d'intégration des études actuelles est en grande partie dû aux différences d'échelles qui existent entre différentes disciplines. Si on prend l'exemple de la thermique du bâtiment et de l'étude du microclimat urbain, bien que ces disciplines partagent un savoir commun sur les bilans énergétiques, leurs échelles sont très différentes. L'étude du comportement thermique d'un bâtiment nécessite la connaissance d'informations détaillées : a minima la géométrie du bâtiment et les matériaux qui le composent. En ce qui concerne l'étude du microclimat urbain, les données nécessaires sont tout aussi vastes mais concernent plutôt l'échelle du quartier, voire de la ville. Les bases de données nécessaires aux études urbaines doivent donc répondre à ces différentes échelles. Un des objectifs de la thèse est donc d'apporter des solutions à ce manque de bases de données polyvalentes.

3. Bases de données multi-scalaires pour les études énergétiques et microclimatiques à l'échelle urbaine

3.1. Problématique

Afin de répondre à des questions comme celle du paradoxe énergétique urbain il est primordial de pouvoir évaluer les différentes stratégies d'aménagement envisagées. Pour ce faire, la modélisation numérique de phénomènes physiques et socio-économiques est l'une des solutions. Cependant, à l'échelle de la ville, la recherche dans ces domaines est confrontée à deux principaux problèmes : (1) la pluridisciplinarité des approches et les échelles et bases de données associées et (2) l'échelle temporelle des problématiques urbaines, climatiques et sociales.

3.2. La pluridisciplinarité des approches, des échelles et des bases de données associées

3.2.1. Problématique

Les données utilisées dans le domaine de l'énergétique urbaine doivent satisfaire les attentes des modélisateurs issus de domaines différents. En effet, comme on a pu le voir dans le chapitre 1.6, à chaque problématique correspondent une échelle spatio-temporelle et un niveau de détail. Dans un récent article, Oliveira et Silva soulignent que la principale limite des recherches portant sur le lien entre énergie et morphologie urbaine provient du manque d'intégration des différentes disciplines concernées (Oliveira & Silva, 2013).

En ce qui concerne les échelles spatiales, les deux chercheurs précisent : « La recherche en énergétique 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). Les auteurs soulignent que la plupart des recherches en énergétique se situent soit à l'échelle de ville soit à l'échelle du bâtiment. A l'échelle de la ville les travaux de recherche portent principalement sur l'effet de la densité et de la structure de la tâche urbaine sur le transport et/ou le climat (voir chapitre 1.6). A l'échelle du bâtiment ou de l'ilot urbain, les chercheurs s'intéressent surtout aux consommations énergétiques de chauffage et de climatisation et/ou au confort à l'intérieur des bâtiments (voir chapitre 1.6). Il existe très peu de travaux d'énergétique à des échelles intermédiaires ou permettant de faire le lien entre l'échelle de la ville et celle du bâtiment. En ce sens, Batty fait remarquer qu'il n'y a quasiment aucuns travaux permettant d'établir un lien entre la morphologie d'un bâtiment et sa situation dans la ville (Batty, 2008).

Musy parvient à des conclusions similaires et rappelle en outre que l'évaluation du climat et de l'énergie à l'échelle d'un bâtiment et de son environnement proche nécessite la prise en compte des conditions aux limites de l'échelle supérieure. Par exemple, la vitesse et les turbulences du vent dans un quartier sont dépendantes des caractéristiques physiques de la ville aux alentours (M. Musy, 2012).

En ce qui concerne le niveau de détail, afin de répondre à l'ensemble des besoins des différentes disciplines, les données qui décrivent la ville doivent être nombreuses et précises. Or, ce qui est possible à l'échelle de quelques bâtiments ne l'est pas toujours à l'échelle d'une ville entière. En particulier, la composition de l'enveloppe des bâtiments se révèle être un élément essentiel. S'il est possible d'avoir certaines indications sur les matériaux de couverture via l'imagerie satellite, il s'avère en revanche plus difficile de connaître la composition des parois de manière détaillée. Cette problématique n'est pas nouvelle puisque, de manière générale, les recherches liées au climat urbain ou à l'énergétique urbaine sont confrontées à l'absence de précision des données à leur disposition (Martilli, 2007). On peut cependant espérer qu'à plus long terme, les campagnes « open data » et « ville numérique » mises en place actuellement par les collectivités permettront d'alimenter les simulations numériques.

D'autre part, la capacité de calcul des modèles actuels s'avère être une limite importante à des simulations pluridisciplinaires. C'est par exemple le cas en ce qui concerne les problématiques de confort hygrothermique prenant en compte la vitesse du vent. La modélisation précise des flux d'air nécessite un maillage fin de l'espace qui n'est pas compatible avec une étude à l'échelle d'une agglomération. À l'inverse, l'influence du tissu urbain sur la dynamique de l'atmosphère peut être modélisée par des approches simplifiées qui s'affranchissent de la représentation précise de la géométrie urbaine par des indicateurs comme la rugosité. Ainsi, l'imbrication de différentes échelles et de différentes disciplines nécessite d'adapter le niveau de détail à l'objet étudié et à la capacité du modèle. On peut citer comme autre exemple la prise en compte des arbres dans les bases de données. Si on souhaite évaluer leurs influences sur le confort extérieur ou encore sur l'éclairement naturel intérieur, la forme précise des arbres doit être modélisée. Si on considère l'impact de ces mêmes arbres sur le microclimat à l'échelle d'un quartier ou d'une ville, leur présence sera prise en compte par une surface d'occupation du sol (M. Musy, 2012). En effet, la forme précise de l'ensemble des arbres d'une ville serait impossible à gérer par un modèle et ne serait pas justifiée en termes de précision.

La Figure 56 résume les différentes échelles auxquelles sont étudiées les problématiques environnementales en lien avec l'énergétique urbaine. On comprend alors la difficulté de mener des études pluridisciplinaires sur la ville.

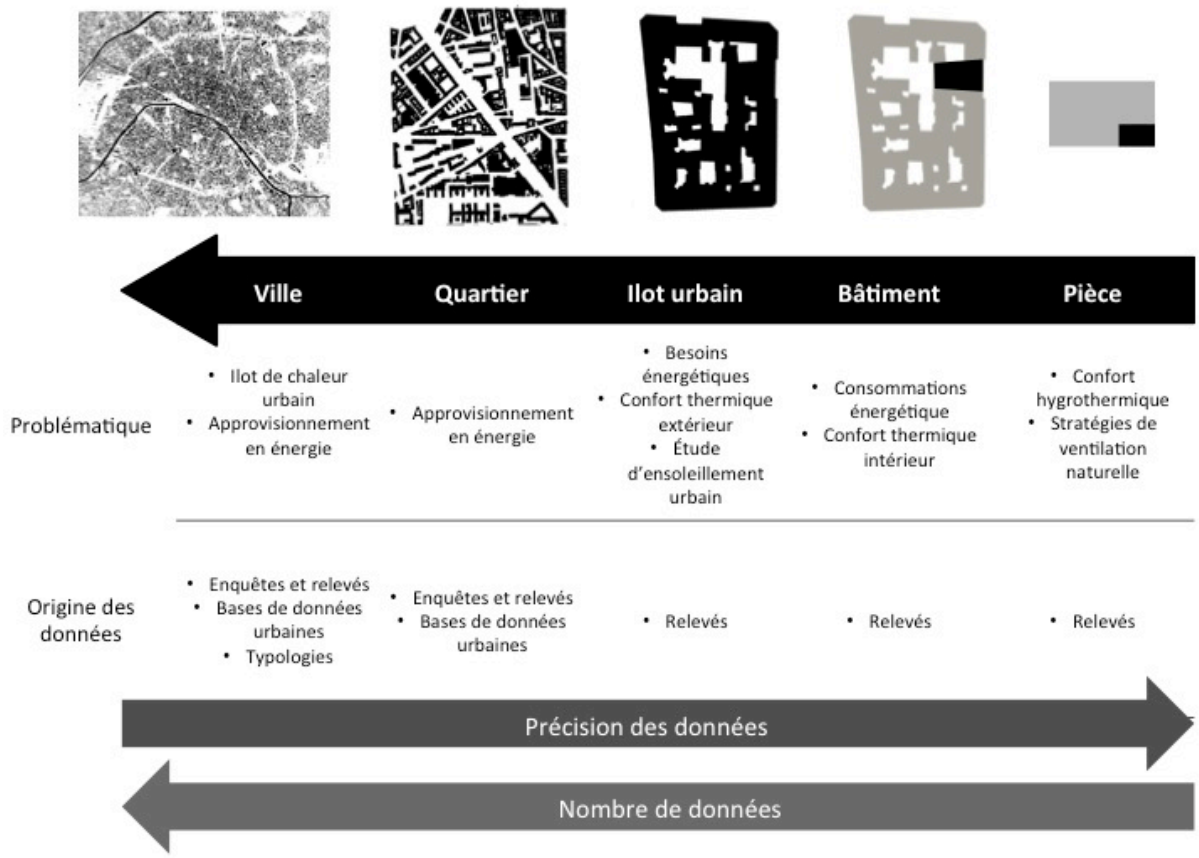


Figure 56 : Échelles des problématiques énergétiques (illustration de l'auteur)

Face à ces problèmes, trois principales approches sont généralement proposées :

1. un travail avec des données précises issues d'enquêtes ou de relevés ;
2. l'utilisation de bases de données urbaines existantes ;
3. la définition et l'utilisation de typologies urbaines.

Nous allons détailler ces trois approches dans le chapitre suivant.

3.2.2. Revue de littérature des méthodes actuelles

Enquêtes et relevés

Dans certain cas, l'étude des consommations et/ou du microclimat d'un quartier peut justifier un relevé précis de données.

C'est ce qui a été fait dans le cadre des travaux de l'APUR (Atelier Parisien d'Urbanisme 2007) qui ont permis de répertorier l'âge des bâtiments d'habitation parisiens. Les bâtiments

ont ensuite été classés par période de construction et à chaque période ont été attribuées des caractéristiques constructives. On a ainsi pu évaluer la consommation de chauffage des ilots urbains ainsi définis d'un point de vue thermique.

Ce type d'approche est souvent porté par des agences d'urbanisme localement implantées qui disposent d'un réseau structuré pour la collecte des données. C'est le cas dans l'étude menées par l'AURAN (Agence d'Urbanisme de l'Agglomération Nantaise, 2005). Ici, 68 sites représentatifs répartis sur le territoire de la communauté urbaine de Nantes ont été étudiés soit 6 % de la surface urbanisés pour l'habitat. Les urbanistes y ont collecté les données nécessaires à leurs études et les résultats sont présentés sous forme de fiches synthétiques qui présentent les caractéristiques du site, la répartition des différents types de surfaces (bâti, espace public, espace privé...) et l'indicateur de densité exprimé en nombre de logements par hectare.

On peut également citer l'étude de Giuliano Dall'O' et al. (Dall'O', Galante, & Pasetti, 2012). Ces chercheurs ont mené une grande enquête de terrain sur cinq municipalités de la province de Milan. Le relevé des caractéristiques des bâtiments leur a permis d'identifier les réhabilitations énergétiques possibles et utiles.

Ces méthodes permettent une grande précision et une grande fiabilité des données à condition que l'on ne dépasse pas l'emprise de l'ilot urbain ou du quartier. Au-delà, on ne peut pas conserver la méthode qui est extrêmement exigeante en terme de moyens (personnel, temps, budget, …). Il est alors nécessaire d'extrapoler les données ce qui conduit inévitablement à une perte de fiabilité. Ici, le manque d'interdisciplinarité résulte donc de la difficulté à combiner les échelles spatiales.

Bases de données urbaines vectorielles et issues d'imagerie satellite

Dans de nombreux cas, en particulier dans le domaine de la climatologie, des bases de données urbaines sont utilisées ; que ce soient des images satellites ou des cartes vectorielles.

On peut par exemple citer le projet EPICEA (Kounkou-Arnaud et al., 2011). Ce projet résulte d'une collaboration entre la ville de Paris, Météo-France et le CSTB. Son principal objectif est de quantifier l'impact du changement climatique à l'échelle urbaine. Les données d'entrée concernant l'usage du sol sont issues du CORINE Land Cover (Heymann, 1993) une base de données couvrant toute l'Europe et disponible à 1 km de résolution. Le CORINE Land Cover a permis d'identifier des types d'occupation du sol comme l'urbain dense ou le résidentiel ainsi que différents types d'occupation du sol. A partir de ces données, les chercheurs ont pu

réaliser des simulations ayant pour objet les interactions entre microclimat urbain, changement climatique et consommations des bâtiments.

Dans un autre domaine, le projet SAGACITE illustre également l'utilisation de bases de données (Adolphe, 2001). Dans ce cas, des bases de données vectorielles incluant l'emprise bâtie de l'urbain et la hauteur des bâtiments ont été utilisées pour réaliser une évaluation environnementale de la ville, basées sur le calcul d'indicateurs simplifiés via un logiciel SIG.

On peut également citer le logiciel STEVE Tool. Ce logiciel SIG a été développé pour prédire les températures dans la canopée urbaine de Singapour à partir de données vectorielles très simples : l'emprise et la hauteur des bâtiments ainsi que la taille et l'emplacement de la végétation dans une ville (Jusuf & Wong, 2009).

Dans les trois cas présentés ici, les données disponibles couvrent une large aire géographique (L'Europe dans le cas du CORINE Land Cover) mais la précision des données est réduite (au mieux on dispose de l'emprise des bâtiments et de leur hauteur). En effet, il existe peu de bases de données sur la constitution des bâtiments à l'échelle d'une ville. Aux États-Unis, la base de données NUDAPT comprend un certain nombre d'éléments permettant de caractériser précisément la forme urbaine (Ching et al., 2009). Plus récemment, Ching a proposé un cadre pour étendre NUDAPT en une base de données collaborative à l'échelle mondiale : WUDAPT (Ching, 2012). On peut également citer le travail réalisé pour la World Housing Encyclopedia qui répertorie la constitution de différents bâtiments d'habitation dans le monde. Bien que conçue pour des problématiques sismiques, cette base de données peut également servir à des études climatiques (Jackson, Feddema, Oleson, Bonan, & Bauer, 2010). Cependant, aucune de ces bases de données ne comporte pour l'instant d'information sur les typologies françaises. De même, aucune de ces bases de données ne comprend d'informations sur les équipements ni sur les usages des bâtiments.

Ainsi, l'utilisation de ce type de base de données nécessite la plupart du temps de faire des hypothèses sur les paramètres descriptifs de la ville diminuant la précision des données. Ici, le manque d'interdisciplinarité des études résulte donc de la difficulté à caractériser précisément la forme urbaine.

Typologies urbaines

D'après Panerai (Panerai, Demorgon, & Depaule, 1999), le « type » est un objet exemplaire qui permet de prendre en compte avec économie une population assez vaste, qu'il s'agisse de bâtiments, d'ilots urbains, etc. Cet outil est fréquemment utilisé par les géographes et les urbanistes afin de mieux comprendre la ville. C'est dans cette lignée de méthodes que l'on

rencontre le troisième type d'approche, lequel consiste en la définition d'une typologie de bâtiments ou d'usages du sol dans le but de réduire le nombre de simulations ou d'étude tout en recouvrant une grande diversité de cas. Ceci permet de combiner les avantages des deux précédentes méthodes : des données pertinentes sur une large aire d'étude.

Pour illustrer cette méthode on peut citer les travaux de Christen (Christen, van der Laan, Kellett, & Tooke, 2012). Cette étude consiste en une approche typologique sur une zone de sept kilomètres carrés à Vancouver. L'auteur propose une typologie composée de douze bâtiments archétypes combinés à cinq tailles de bâtiment, cinq facteurs d'ensoleillement et cinq types d'occupations pour un total de 180 simulations. Les différentes combinaisons sont ensuite identifiées sur une carte. Finalement, Christen utilise cette méthode pour estimer la consommation énergétique des bâtiments sur l'aire d'étude.

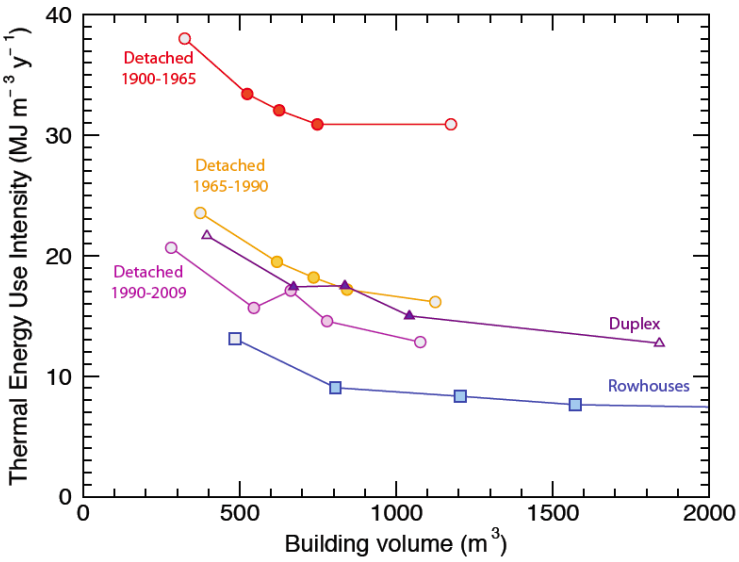


Figure 57 : Étude typo-énergétique de Christen : Consommation énergétique de cinq des douze types de bâtiments en fonction des cinq tailles de bâtiments

Wallemacq, Marique et Reiter utilisent également différentes approches typologiques en lien avec des problématiques énergétiques urbaines. Une de ces typologies traite des consommations énergétiques des bâtiments (Wallemacq, Marique, & Reiter, 2011). La méthode croise des données collectées via des enquêtes nationales et des bases de données urbaines. Au vu de ces données, les ilots urbains ayant un comportement énergétique présumé similaire sont regroupés. Les critères sélectionnés pour établir la typologie sont la date de construction, le nombre de façades de l'ilot urbain et le type de logement (collectif ou individuel). Par la suite, les auteurs calculent l'impact énergétique total des bâtiments de la ville de Liège en considérant que tous les individus d'un même groupe ont la même consommation. Les auteurs appliquent la même méthode à d'autres domaines liés à

l'évaluation environnementale de la ville comme les consommations énergétiques associées aux transports (Marique & Reiter, 2012).

Berghauser-Pont et Haupt se sont intéressés à la classification typo-morphologique de quartiers hollandais (Berghauser-Pont & Haupt, 2007). Suite à l'étude de 50 quartiers dont ils ont calculés la densité bâtie, le nombre de niveaux moyen des bâtiments, la densité de voirie, le coefficient d'emprise au sol et la pression du vide (rapport de la surface d'espace non bâti sur le nombre de personnes habitant ou travaillant dans la zone), ces chercheurs ont proposé un abaque, la « Spacematrix », permettant de classer n'importe quel quartier parmi huit types. Ils utilisent ensuite ce classement pour évaluer les qualités urbaines et environnementales de ces quartiers (espace privatif extérieur, parking, accessibilité, consommation énergétique, …).

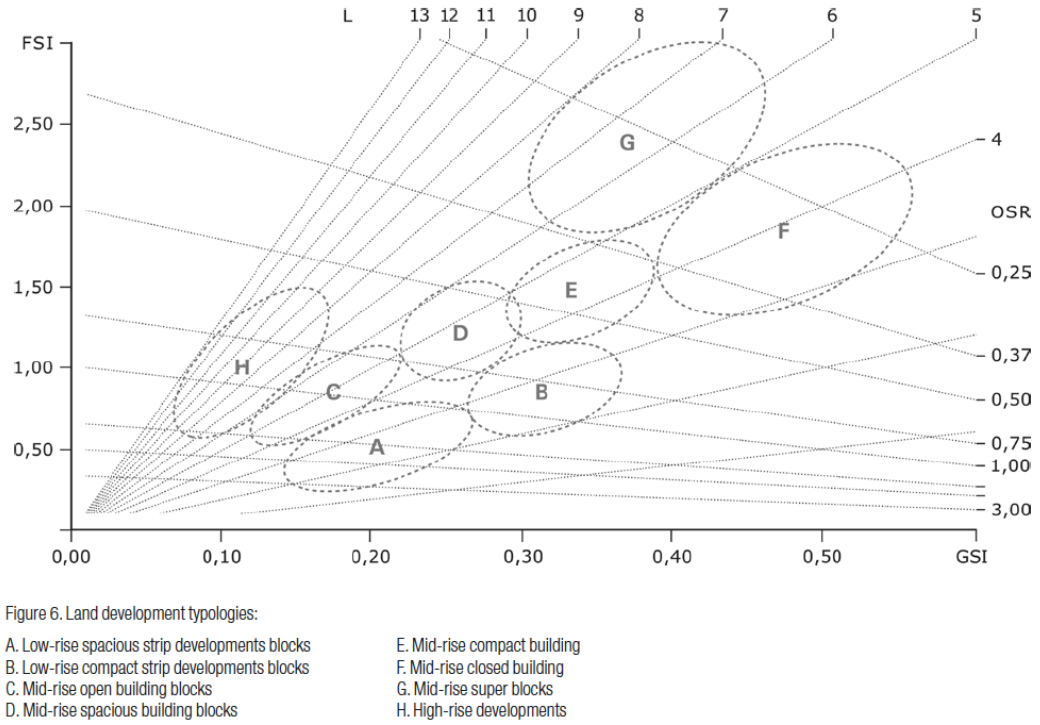


Figure 6. Land development typologies:

A. Low-rise spacious strip developments blocks
B. Low-rise compact strip developments blocks
C. Mid-rise open building blocks
D. Mid-rise spacious building blocks
E. Mid-rise compact building
F. Mid-rise closed building
G. Mid-rise super blocks
H. High-rise developments

Figure 58 : La « Spacematrix » de Berghauser-Pont et Haupt permet de classer un quartier en fonction de ses caractéristiques morphologiques

L'exemple le plus connu demeure celui des « Local Climate Zones » (LCZ) que Steward et Oke ont proposé en 2009 (Stewart & Oke, 2009). Les LCZ sont un système de classification des tissus urbains en fonction de leur aptitude à réduire ou à aggraver l'effet d'îlot de chaleur urbain. Le très grand nombre d'études utilisant les LCZ est significatif de l'importance que peuvent avoir des bases de données adaptées à l'étude de l'énergétique urbaine (Alexander, 2012; Bechtel, 2012; Dubois & Bergeron, 2012; Kotharkar, 2012; Perera, 2012).

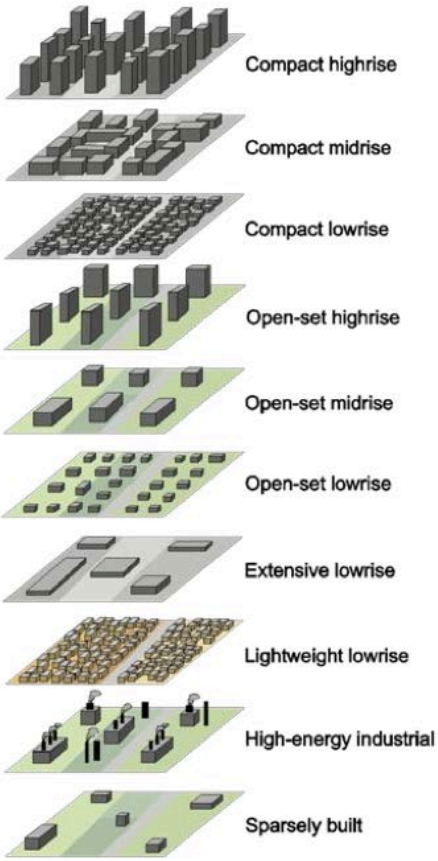


Figure 59 : Typologies LCZ de Stewart et Oke

Le principal inconvénient de ces méthodes est que l'on considère que les individus d'un même type ont un comportement identique. De plus, le niveau de détail dans la description de ces typologies est souvent insuffisant pour répondre aux besoins d'une étude interdisciplinaire d'énergétique urbaine.

Il semble donc bien que les bases de données existantes restent un frein à la réalisation d'études pluridisciplinaires. Les quelques exemples cités présentent des inconvénients soit d'échelle, soit de précision. Par ailleurs, aucune de ces méthodes ne permet de prendre en compte la diversité des échelles temporelles impliquées dans l'énergétique urbaine.

3.3. Les échelles temporelles des problématiques urbaines, climatiques et sociales

3.3.1. Problématique

Au-delà des échelles spatiales, les échelles temporelles impliquées dans l'étude de l'énergétique urbaine ont une importance primordiale.

D'une part, comme on a pu le voir dans le chapitre 1.6, elles divergent grandement d'une discipline à l'autre (M. Musy, 2012). Par exemple, là où le confort à l'intérieur d'un bâtiment nécessite une simulation thermique dynamique sur une année, la simulation des effets des changements climatiques est de l'ordre du siècle.

D'autre part, cet horizon temporel séculaire est en lui-même un défi scientifique. Il est imposé par plusieurs processus :

- Comme on l'a déjà dit, le changement climatique qui dépend des émissions de GES devrait avoir des effets au-delà de 2100 d'après les études du GIEC (GIEC et al., 2008).
- Les modifications structurelles des villes se produisent sur un large horizon temporel (Grazi & Van den Bergh, 2008). La plupart des villes européennes se sont construites en plus d'un siècle et les bâtiments qui les composent ont souvent plus d'un demi-siècle. En France en particulier, 65% des bâtiments ont été construits avant la première réglementation thermique de 1975 et le taux de renouvèlement du parc de bâtiment est d'environ 1 % seulement (Arantes et al., 2010).
- Certains modes de vie des citadins évoluent lentement, car ils dépendent en partie de l'éducation et de l'offre technologique et peuvent donc se concrétiser dans la génération suivante (Moussaoui, 2007).

Pour finir, il est nécessaire d'aborder les différentes temporalités de la recherche et de la pratique. Comme le fait remarquer Molina, les praticiens et acteurs institutionnels sont enjoints à agir dans l'urgence face aux défis des changements climatiques et à l'épuisement des ressources naturelles (Molina, 2012). Cependant, là où les temporalités des élus sont courtes, les effets potentiels des politiques mises en œuvre ne peuvent être perçus immédiatement.

Il est donc nécessaire de prévoir des simulations à l'échelle du siècle avec des pas de temps permettant de satisfaire les modèles les plus fins (pas de temps horaire par exemple). Ceci pose évidemment des questions en termes de capacité de compilation des modèles de simulations.

Cette échelle temporelle nous impose surtout l'utilisation de modèles prospectifs. D'après le dictionnaire Larousse, la prospective est une science « ayant pour objet l'étude des causes techniques, scientifiques, économiques et sociales qui accélèrent l'évolution du monde moderne, et la prévision des situations qui pourraient découler de leurs influences conjuguées ». Même si cette définition nous donne une idée simple de ce que peut être la prospective, il semble nécessaire de préciser que d'après Michel Godet, la prospective se distingue justement de la prévision par « un postulat de liberté face à des avenirs multiples et indéterminés » (Godet, 2007a). On pourra donc résumer ainsi la définition de la prospective : une science qui étudie les évolutions possibles du monde, leurs causes et leurs conséquences.

Plusieurs méthodes de prospectives existent dans la littérature. Parmi elles, on peut citer la consultation d'experts, la construction de scénarios d'évolution à partir d'extrapolations tendancielles ou à partir de prévisions conditionnelles (forecasting) ou à partir d'objectifs supposés atteints (back-casting) (Godet, 2007b). La plupart de ces méthodes sont traduites dans des modèles permettant de prendre en compte leurs grandes complexités (Morice et al., 2004). Cet exercice peut s'appliquer à de nombreux domaines comme l'économie, la climatologie, le transport, le logement, etc. Cependant, nous nous concentrerons dans le chapitre suivant sur le cas particulier des modèles d'évolution urbaine. En effet, c'est autour de cette problématique primordiale que se structure la question des bases de données multi-scalaires.

3.3.2. Modèles prospectifs d'évolution urbaine : Revue de litterature

Plusieurs modèles prospectifs ont été développés depuis le dix-neuvième siècle dans le but de simuler les évolutions urbaines (Pagliara & Wilson, 2010). Leur principal objectif est de guider la prise de décision des acteurs de l'urbanisme qui peuvent alors anticiper les effets de différents leviers d'action. Comme on le sait, il ne s'agit pas de modèles prédictifs, les résultats obtenus ne sont donc pas à considérer en tant que tels. Cependant, les simulations permettent (1) de comparer des futurs possibles résultant de différents scénarios et (2) d'évaluer l'influence de différents leviers dans l'absolu et les uns par rapport aux autres (étude de sensibilité).

Malgré ces objectifs généralement partagés, ces modèles sont gouvernés par des mécanismes divers que nous allons brièvement présenter ici. Ce chapitre ne constitue pas une revue de littérature exhaustive, ce travail ayant déjà fait l'objet de plusieurs publications (Haase & Schwarz, 2009; Pagliara & Wilson, 2010; Verburg, Schot, Dijst, & Veldkamp, 2004; Viguié, 2012), mais un aperçu des différents types de modèles existants. La Figure 60 reprend la structure des chapitres suivants. On y distingue quatre principales catégories de

modèles : (1) les premiers sont des modèles mathématiques simples souvent peu représentatifs de la réalité, (2) les deuxièmes sont des modèles géographiques basés sur la reproduction de tendances passées, (3) et (4) les derniers se basent sur la modélisation de mécanismes gouvernant le développement urbain avec plus ou moins de nuance en termes d'échelles temporelles.

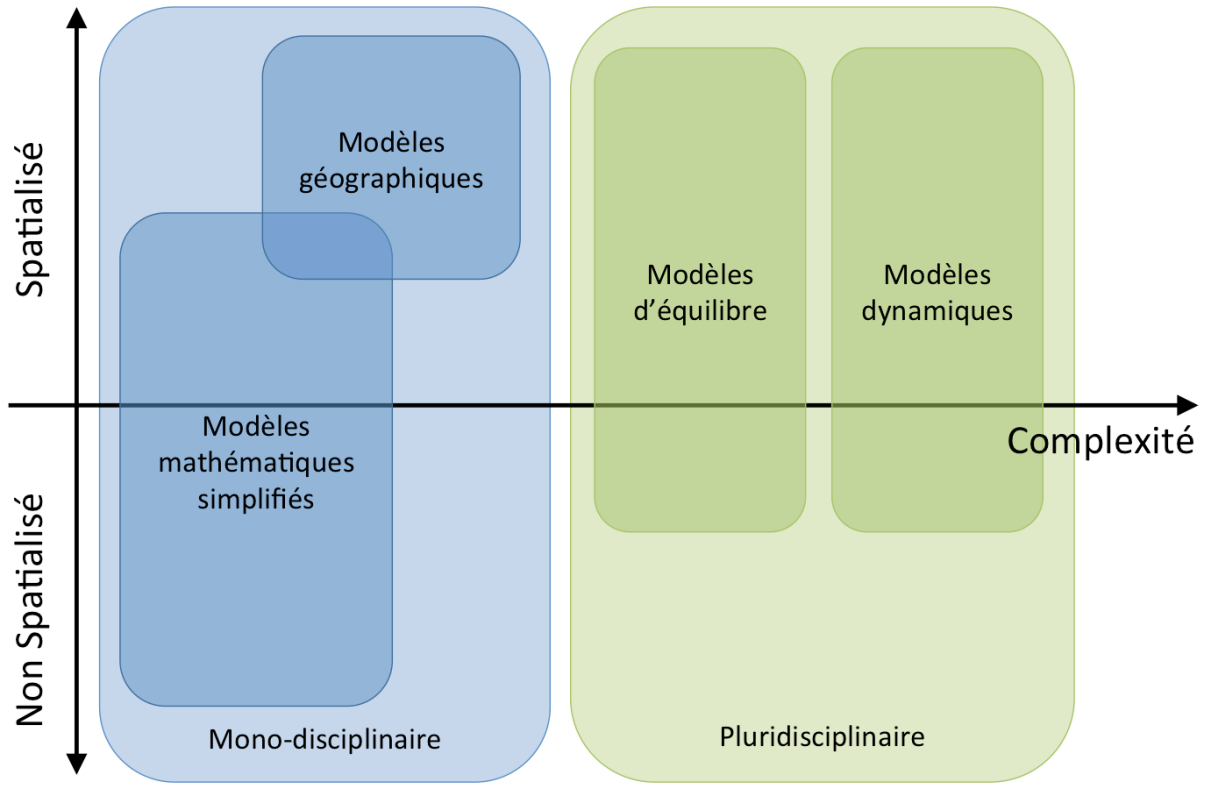


Figure 60 : Classification des modèles prospectifs urbains (illustration de l'auteur)

Modèles d'évolution mathématiques simplifiés

Ces modèles sont parmi les premiers à avoir émergé dans la discipline de la prospective urbaine. Ils sont inspirés de modèles mathématiques (comme les fractales par exemple) ou encore par d'autres disciplines scientifiques (cristallographie, biologie, etc.). Nous en citerons trois exemples présentés par Banos et Sander dans une revue de littérature (Banos & Sanders, 2012).

Tout d'abord, les modèles d'agrégation limitée par diffusion (DLA) sont des cas particuliers de modèles aléatoires. Ils fonctionnent sur un principe commun destiné à simuler l'étalement urbain : une ville théorique s'étend par arrivées successives et agrégation d'individus selon un processus aléatoire (Batty & Longley, 1994). Pour donner une image

simple, cela correspond à de nouveaux ménages décidant de s'installer et de construire leur maison à côté du premier quartier rencontré au hasard. Bien que ce modèle puisse être complexifié et territorialisé par la prise en compte de zones non constructibles, il reste extrêmement simplifié et peu représentatif des évolutions passées.

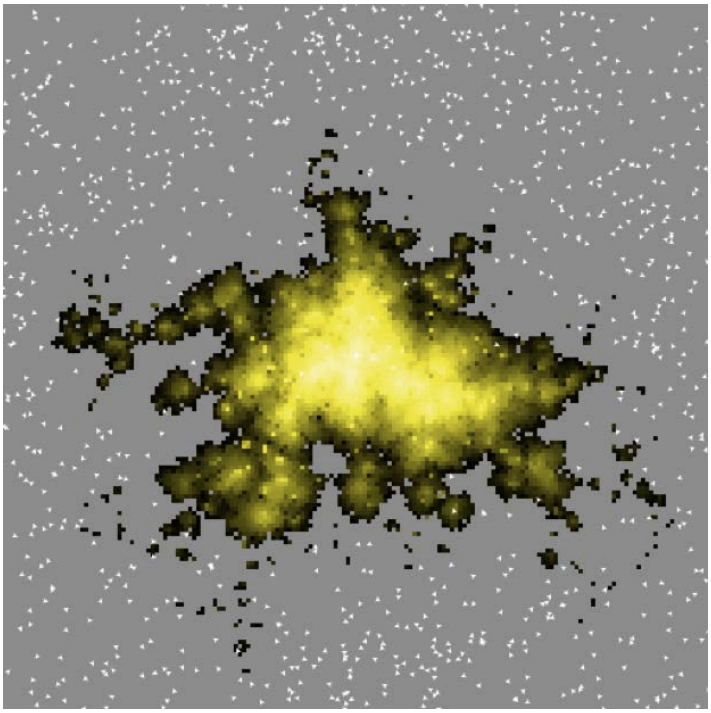


Figure 61 : Croissance urbaine simulée par un modèle DLA avec le modèle SMArtUrb (Banos & Sanders, 2012)

Parmi ces modèles on peut également parler des modèles de croissance de population. Ce type de modèle exprime, au travers d'équations différentielles, la croissance exponentielle d'une population suivie d'un ralentissement lorsque la capacité maximale d'occupation est atteinte (il y a surpopulation, la zone n'est donc plus attractive). A cette formulation mathématiquement très simple, on peut ajouter un peu de complexité en tenant compte d'un contexte géographique particulier. La croissance de population est alors soumise à des prévisions démographiques et les contraintes d'occupations maximales dépendent de la localisation dans la ville. Par exemple, dans un des modèles d'Allen (Allen, 1997), ces contraintes d'occupation maximale dépendent du manque d'attractivité d'une zone par rapport à d'autres parties de la ville.

Pour finir, il semble intéressant de présenter les modèles d'émergence de villes. En particulier, l'exemple du modèle SIMPOP (Pumain, Sanders, Bretagnolle, Glisse, & Mathian, 2009) permet de comprendre comment, en partant d'une grille représentant une répartition à peu près régulière de population, un modèle peut simuler l'émergence d'un système de

villes hiérarchisées. Le principe repose sur le fait qu'il existe, dans la plupart des pays, une relation linéaire entre le rang des villes et leur taille. Ainsi, en conservant cette proportionnalité, le modèle peut reconstituer l'émergence d'un système hiérarchisé de villes. Comme précédemment, on peut ajouter un peu de complexité en tenant compte d'un contexte géographique particulier dans la mise au point de la grille de départ.

Ces modèles restent très théoriques et ne permettent pas de guider les acteurs institutionnels dans leurs prises de décisions à l'échelle de la ville. Cependant, ils ont contribué à l'émergence de la modélisation prospective géographique et urbaine.

Modèles géographiques

Ce type de modèles, présenté par Viguié dans sa revue de littérature (Viguié, 2012), se base sur l'extrapolation de tendances géographiques passées afin de prédire les possibles évolutions futures. Ces tendances passées d'évolution des villes sont principalement étudiées via deux médias : les cartes et images satellites. La différence entre modèles provient principalement des degrés de complexité dans l'analyse de ces médias.

Par exemple, des modèles relativement simples vont analyser l'évolution des zones imperméabilisées détectées par satellite. L'évolution de la ville se traduit alors comme la progression des espaces artificialisés sur les espaces non artificialisés. D'autres modèles plus complexes vont distinguer des nuances au sein de ces espaces artificialisés : bâtiments, axes routiers, zones industrielles, densité de population, … On peut illustrer les modèles géographiques grâce au logiciel SLEUTH (Clarke, Gazulis, Dietzel, & Goldstein, 2007). Ce dernier permet de simuler un étalement urbain composé de différents types d'urbanisation (urbanisation diffuse, le long des axes routiers, à proximité de l'urbain existant, …) en tenant compte des contraintes géographiques existantes ou scénarisées (pente du terrain, exposition solaire, zones non constructibles, …).

Ces approches permettent des projections précises et détaillées. Cependant, en raison du fait qu'elles ne font que poursuivre des tendances passées, elles ne sont valides que sur du moyen terme. De plus, elles ne permettent pas de rendre compte de ruptures fortes dans l'évolution des facteurs influant l'étalement urbain.

Modèles d'équilibre

Ce type de modèle se base sur la compréhension et la modélisation de mécanismes gouvernant le développement urbain (Viguié, 2012). Cette compréhension se fait, comme

précédemment, par l'étude des comportements passés. Établir un lien entre ces évolutions et leurs conséquences sur le développement urbain permet de déduire l'effet qu'elles pourraient avoir dans le futur.

Beaucoup de ces modèles se concentrent sur les interactions entre usage du sol et système de transport, facteurs qui semblent être les plus influants sur le développement urbain. On peut citer l'exemple des travaux de Lowry (Lowry, 1964) sur le modèle Metropolis qui établit un lien entre l'accessibilité des transports et la densité de population. Suite à ses travaux, de nombreux modèles établissant un lien entre la localisation du logement et le choix des modalité de transport ont été proposés (Wegener, 2004).

Le principal inconvénient de ces méthodes est que de nombreux facteurs influençant l'évolution de la ville sont négligés. Cependant, la relative simplicité de ces modèles permet d'interpréter facilement l'impact d'un facteur donné. De plus, les mécanismes sur lesquels ils se basent sont supposés rester valables dans le temps ce qui rend ces modèles pertinents à long terme.

Modèles dynamiques

Derniers nés de la discipline, les modèles dynamiques sont basés sur des principes similaires aux modèles d'équilibres dans le sens où ils s'appuient sur la compréhension et la modélisation des mécanismes gouvernant le développement urbain. Leur degré de complexité est cependant plus grand dans la mesure où : (1) ils intègrent souvent plus de facteurs explicatifs du développement urbain, en particulier les aspects économiques, (2) ils intègrent surtout la temporalité propre de chaque phénomène (Leurent, 2012; Viguié, 2012).

Ainsi, le développement de la ville est soumis à diverses évolutions et ce à plusieurs échelles de temps. Par exemple, la localisation des ménages et des emplois est un processus relativement lent. Bien que ce processus soit influencé par des facteurs à l'évolution rapide (tels que les prix de l'énergie, les taux d'emprunts, etc.), les individus déménagent surtout selon des parcours de vie qui leur sont propres et qui évoluent sur plusieurs décennies. Dans un modèle dynamique, les évolutions des différents facteurs et leurs interactions ont donc des temporalités spécifiques.

Parmi les plus complexes de ces modèles, on peut citer les exemples des modèles MEPLAN (M. H. Echenique & Williams, 1980), TRANUS (De la Barra & Rickaby, 1982), URBANSIM (Waddell et al., 2003), etc. Il est également intéressant de citer le modèle NEDUM développé au CIRED (Viguié & Hallegatte, 2010). NEDUM a pour objectif de décrire les grandes

tendances d'évolution de la répartition des habitants d'une ville au cours du temps sur le long terme. Le mécanisme principal qui gouverne l'évolution de la ville dans NEDUM est l'arbitrage que font les ménages entre coût des transports, coût des loyers et attractivité du centre-ville. Le modèle prend également en compte diverses contraintes (zones non constructibles par exemple), et ajoute une dimension dynamique à ces mécanismes : les loyers peuvent évoluer relativement vite (échelle de temps : 3 ans) tandis que le changement de logement nécessite plus de temps (échelle de temps : la décennie).

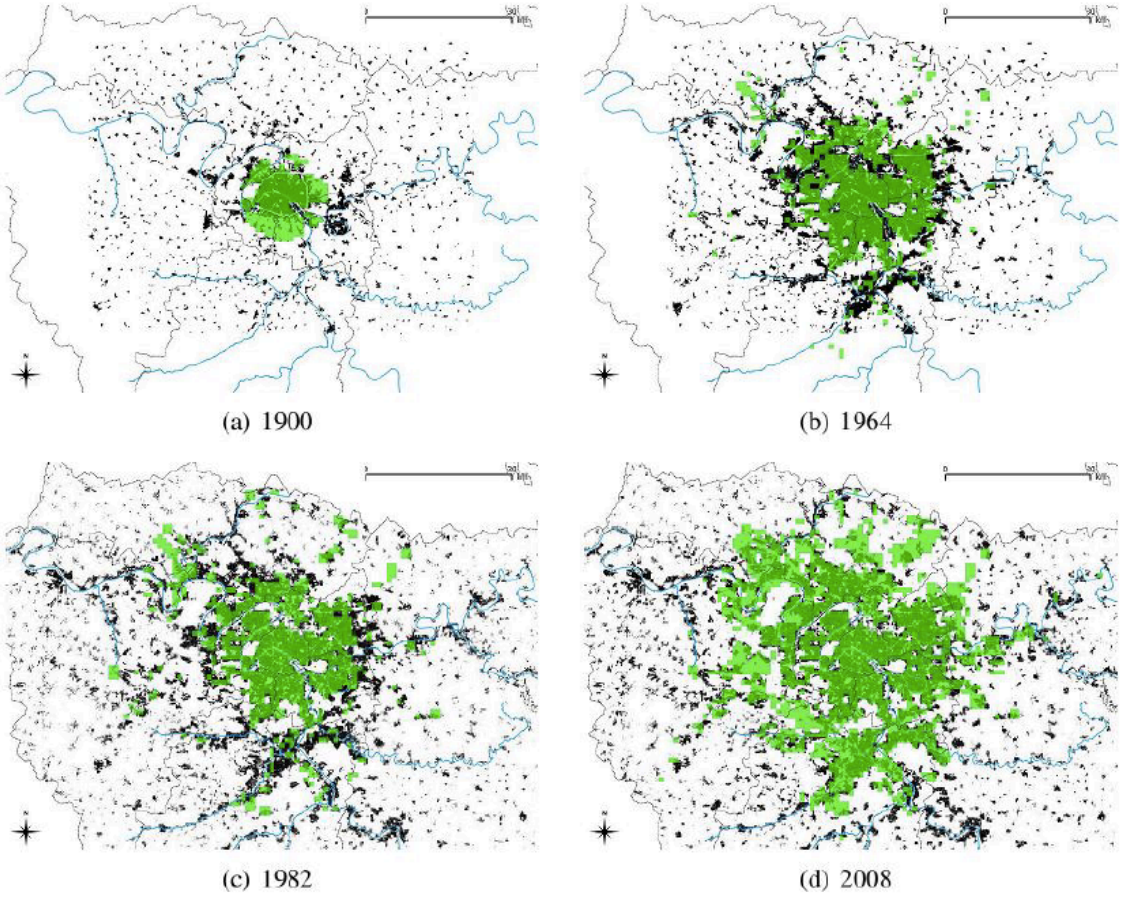


Figure 62 : Exemple de l'évolution de Paris réelle (noir) et simulée par NEDUM (vert) entre 1900 et 2008

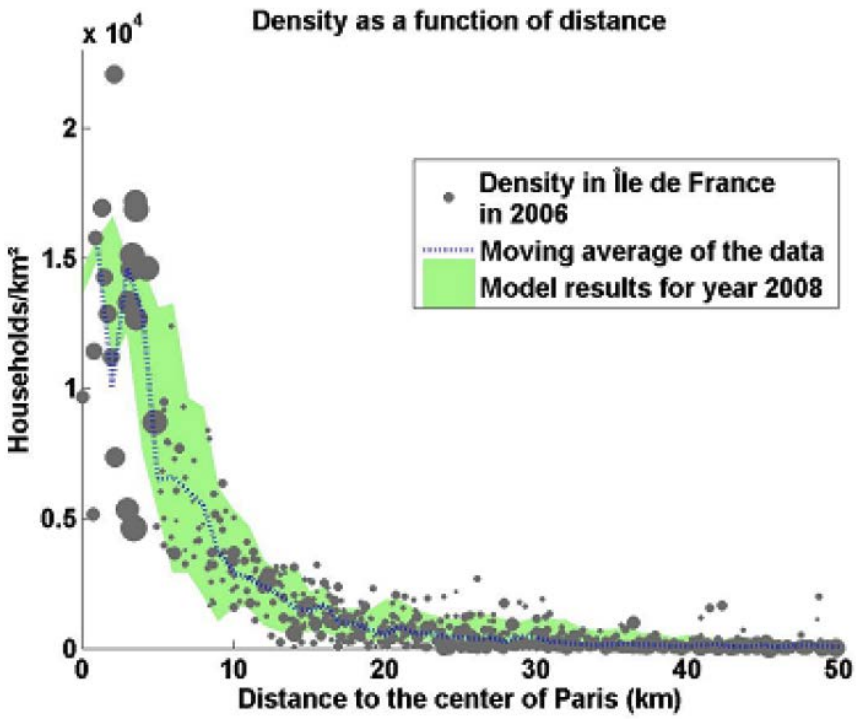


Figure 63 : Exemple de l'évolution de densité de population dans Paris -Réelle (gris) et simulée par NEDUM (vert)

Ces modèles complexes ou très complexes selon les cas, sont parmi les plus précis et permettent de prendre en compte de nombreuses disciplines. De plus, ils présentent l'avantage de rester valides sur le long terme. En effet, comme précédemment, les mécanismes sur lesquels ils se basent sont supposés rester valables dans le temps.

Conclusion

Il est cependant primordial de noter que, quel que soit le modèle considéré, la précision des données spatialisées produites reste faible. Dans le meilleur des cas, les modèles fournissent des densités de population. Il est donc extrêmement difficile d'utiliser ces modèles pour des études d'énergétique urbaine. Pourtant, l'utilisation de modèles prospectifs semble incontournable pour permettre la cohabitation de différentes disciplines et répondre au paradoxe énergétique urbain.

4. Conclusion de la première partie : positionnement et objectifs

La grande majorité des travaux de recherche s'accordent sur le fait qu'une ville « respectueuse de l'environnement » est une ville dense avec un bâti compact. Cependant, ce terme reste souvent mal défini et peu accepté par la population. Par ailleurs, la plupart de ces études ne prennent en compte qu'une partie des facteurs impactant l'énergétique urbaine. Or, la prise en compte de l'éclairage, de la ventilation, du rafraichissement, de la production d'énergies renouvelables, du microclimat urbain et de l'énergie primaire totale liée aux matériaux est susceptible de remettre en question le paradigme de la densité et de la compacité urbaine, c'est ce que nous avons appelé le paradoxe énergétique urbain. Il est donc aujourd'hui nécessaire, comme nous l'avons vu dans les chapitres 1 et 2, d'interroger les densités urbaines au regard d'une analyse pluridisciplinaire. D'une part, c'est la seule solution qui permette de répondre, ne serait-ce que partiellement, à la question du paradoxe énergétique urbain. D'autre part, c'est par l'interdisciplinarité seule que les problématiques de recherche en énergétique pourront être intégrées aux politiques et aux pratiques urbaines.

Au travers du chapitre 3 nous avons pu comprendre que les bases de données sont au cœur des difficultés que rencontrent ces approches pluridisciplinaires. Lors d'une récente conférence, Ching évoquait qu'en recherche la règle « GIGO » prime toujours (Ching, 2012). Sous cet acronyme se cache l'adage « Garbage In = Garbage Out » qui signifie que si les données d'entrées d'un modèle sont mauvaises, les sorties de ce modèle le seront également !

Or les données actuellement utilisées présentent deux principaux inconvénients. D'une part, les différentes disciplines travaillent à des échelles spatiales et à des précisions différentes, et les bases de données existantes ne permettent pas de concilier ces différents niveaux d'exigences. D'autre part, les problématiques urbaines nécessitent un travail sur des horizons temporels séculaires et les modèles prospectifs existants ne permettent pas de générer des bases de données suffisamment précises pour des études d'énergétique de la ville.

Dans cette thèse, nous nous proposons donc de développer une méthode et un outil permettant de générer des bases de données multi-scalaires pour une recherche pluridisciplinaire. Le modèle que nous avons conçu est GENIUS, pour GENérateur d'Ilots UrbainS. Ce développement fait l'objet de la deuxième partie du mémoire.

Deuxième partie : développement de GENIUS pour la génération de bases de données multi-scalaires

1. Objectifs et méthode

1.1. Objectif

Comme nous l'avons vu précédemment, les limites des bases de données existantes peuvent être un frein à la prise en compte de toutes les disciplines impliquées dans l'étude du climat et de l'énergie dans les villes. Pour contribuer à la résolution de ce problème, notre objectif est double. Dans un premier temps, nous souhaitons proposer une méthode de construction de bases de données urbaines pluridisciplinaires - c'est à dire contenant les informations nécessaires aux différentes disciplines évoquées et fonctionnant à différentes échelles spatiales. Dans un second temps, nous souhaitons développer une méthode permettant de faire évoluer ces bases de données urbaines dans le temps afin de s'adapter aux différentes échelles temporelles impliquées dans l'énergétique urbaine.

La méthode et le modèle correspondant présentés dans ce mémoire ont été baptisés GENIUS, pour GENérateur d'Ilots UrbainS.

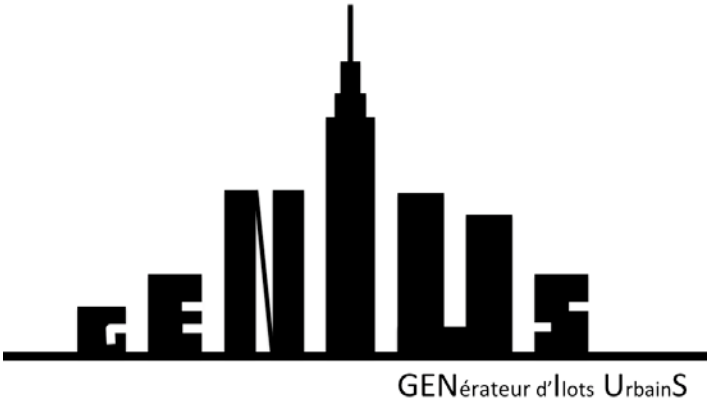


Figure 64 : Logo de GENIUS

1.1.1. De la modélisation synchronique …

Tout d'abord, nous allons proposer des bases de données adaptées à ce type de recherche pluridisciplinaire : (1) des données capables de couvrir un territoire englobant un pôle urbain* ainsi que son expansion future, (2) des données à l'échelle du quartier (type de quartier, densités urbaines, etc.), (3) des données fournissant des détails constructifs et techniques sur le bâti qui compose la ville (matérialité, équipement de

* Voir glossaire

chauffage/ventilation/climatisation, forme architecturale, etc.), (4) des données précises et localisées (contrairement aux méthode typologiques présentées au chapitre 3.2.2 de la première partie) et (5) des données compatibles avec les capacités de calcul des modèles actuels. La Figure 65 résume ces objectifs.

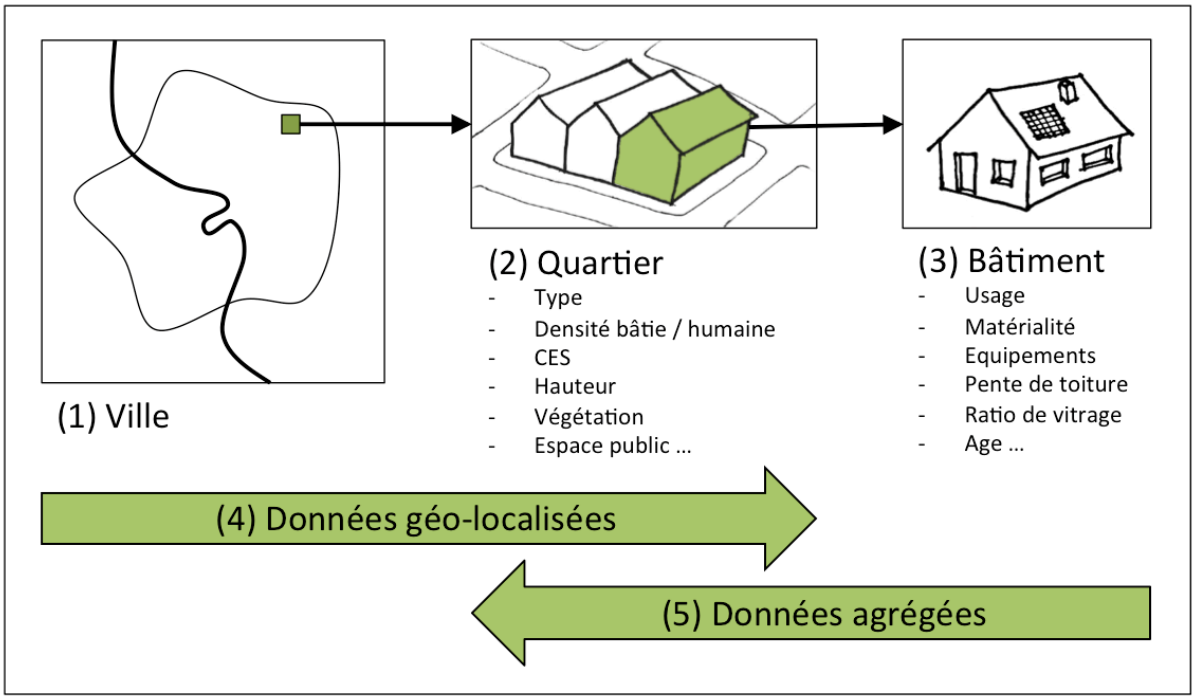


Figure 65 : Synthèse des objectifs de la modélisation synchronique de GENIUS (illustration de l'auteur)

1.1.2. … à la modélisation diachronique

Dans un second temps, nous allons proposer des bases de données capables d'évoluer dans le temps afin de satisfaire les différentes problématiques de l'énergétique urbaine qui peuvent avoir des impacts à l'échelle du siècle. Comme nous l'avons vu dans le chapitre 3.2.2 de la première partie, les modèles prospectifs actuels d'expansion urbaine ne permettent de faire évoluer que la densité de population d'une ville. Il nous faudra donc faire évoluer les éléments relatifs aux quartiers (voir point (2) de la Figure 65) et aux bâtiments (voir point (3) de la Figure 65).

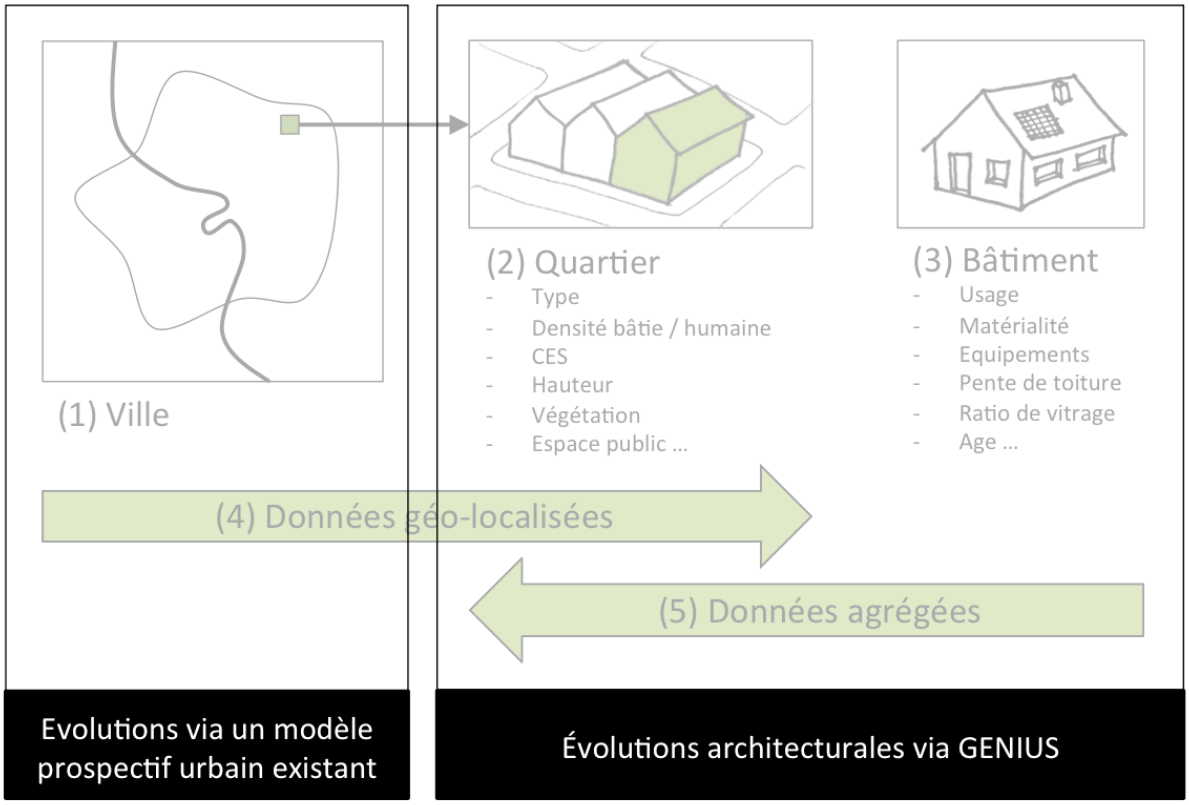


Figure 66 : Synthèse des objectifs de la modélisation diachronique de GENIUS (illustration de l'auteur)

1.2. Méthode générale

La méthode se décompose en deux temps. Dans un premier temps, une carte de la ville actuelle utile aux différentes disciplines et adaptée à leurs différentes échelles est générée : c'est la modélisation synchronique. Dans un deuxième temps, GENIUS va faire évoluer cette carte en s'appuyant sur un couplage avec un modèle prospectif de développement urbain : c'est la modélisation diachronique.

1.2.1. Première étape : modélisation synchronique

La modélisation synchronique consiste à proposer une base de données qui soit capable de fonctionner à différentes échelles et avec différents niveaux de précision. La méthode choisie se rapproche des méthodes « typologiques » présentée au chapitre 3.2.2 de la première partie. En effet, ces méthodes combinent les avantages de couvrir un large territoire tout en fournissant un niveau de détail élevé. Cependant, les méthodes typologiques actuelles ont le défaut d'assimiler un type à un comportement donné sans plus de finesse dans la description de la ville. Notre méthode se distingue par le fait qu'à chaque maille de la zone d'étude sont associés un type de quartier mais également des caractéristiques propres.

Pour mener à bien cette tâche il faut commencer par identifier une typologie c'est à dire un ensemble d'archétypes urbains représentatifs des quartiers et des bâtiments des villes françaises. Cette étape fait l'objet du chapitre 2.2.1. Nous verrons que sept types de morphologies urbaines ont été retenus.

Afin de caractériser une ville de l'échelle globale à l'échelle locale, il est nécessaire d'identifier ces morphologies urbaines types dans une carte. Nous avons donc choisi un découpage de la ville en sous-unités. Le choix de la dimension de ces sous-unités fait l'objet du chapitre 2.2.2. Une maille de 250 m par 250 m a été retenue.

L'étape suivante est d'identifier chacune de ces mailles comme appartenant à un type de quartier particulier. Pour cela, nous avons caractérisé chaque maille par un système d'indicateurs morphologiques qui nous renseigne sur la forme urbaine. Le choix et le calcul de ces indicateurs à partir de bases de données urbaines existantes font l'objet du chapitre 2.3. Le système retenu est composé de 51 paramètres.

Les paramètres sont des outils pour caractériser la maille mais avant tout pour identifier son type. Étant donné la surface que l'on souhaite étudier et la précision que l'on souhaite conserver, cette identification ne peut se faire que de manière automatique. Le chapitre 2.4

porte sur un choix de méthodes d'identification automatique des quartiers types et sur la mise en œuvre de cette classification. La méthode retenue est celle de l'analyse en composante principale.

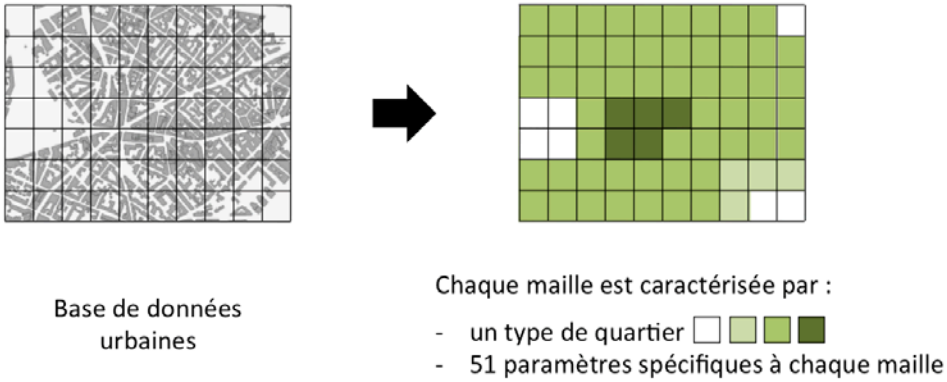


Figure 67 : Modélisation synchronique - Schéma de principe (illustration de l'auteur)

Par la suite, nous caractérisons chaque maille de manière individuelle par des paramètres morphologiques et technologiques propres. Ainsi, nous permettons une descente d'échelle de la ville au bâtiment et nous conservons un niveau de détail compatible avec les différents modèles de l'énergétique urbaine. Ce travail fait l'objet du chapitre 2.5. A la fin de cette étape, une carte de quartiers types est produite.

Pour finir, une validation et une analyse de la base de données urbaine générée font l'objet des chapitres 2.6 et 2.7.

Cette méthode permet de répondre aux objectifs fixés précédemment (voir Tableau 14).

Tableau 14 : Concordance entre la modélisation synchronique de GENIUS et les objectifs fixés

Objectifs	Adéquation avec la méthode
(1) Données capables de couvrir un territoire englobant un pôle urbain et son expansion future.	La zone d'étude couvre un territoire englobant un pôle urbain.
(2) Données à l'échelle du quartier (type de quartier, densités urbaines, …),	Cette zone d'étude est découpée en mailles à l'échelle du quartier.
(3) Données fournissant des détails constructifs et techniques sur le bâti qui compose la ville (matérialité, équipement de chauffage, forme architecturale, …),	Ces mailles contiennent toutes les informations nécessaires aux modèles les plus fins, en particulier les informations relatives au bâti : matérialité, équipement de chauffage, forme architecturale, …
(4) Données précises et localisées	Chaque maille contient des informations uniques relatives à sa localisation dans la carte et issues des bases de données existantes.
(5) Données compatibles avec les capacités de calcul des modèles actuels.	Le territoire est maillé. Il est constitué de carrés de 250 m par 250 m agrégeant une certaine complexité bâtie. Cela permet de traiter une grande aire tout en restant compatible avec les capacités de calcul des modèles.

1.2.2. Deuxième étape : modélisation diachronique

La modélisation diachronique consiste à faire évoluer la carte initiale de quartiers types précédemment générée. Il ne s'agit pas ici de proposer un nouveau modèle prospectif d'expansion urbaine puisqu'il en existe déjà de nombreux de grande qualité (voir chapitre 3.3.2 de la première partie). Dans ce travail, nous avons fait le choix de coupler notre modèle à un modèle prospectif existant afin d'y apporter des détails en terme de forme urbaine. Comme on a pu le voir, les modèles les plus précis ne donnent qu'une information sur la densité de population. De plus, le niveau de granulométrie est souvent peu précis (de l'ordre du kilomètre carré). Notre travail consiste donc à faire une descente d'échelle à partir des données produites par ces modèles et à décrire les mécanismes d'évolutions des morphologies urbaines.

Pour chaque pas de temps, GENIUS va échanger avec un modèle prospectif d'expansion urbaine permettant de connaître la densité de population dans la ville. En fonction des évolutions de densité, de scénarios contrastés, de la carte de quartiers types de l'année précédente et de règles d'évolution urbaine, GENIUS va générer une nouvelle carte chaque année.

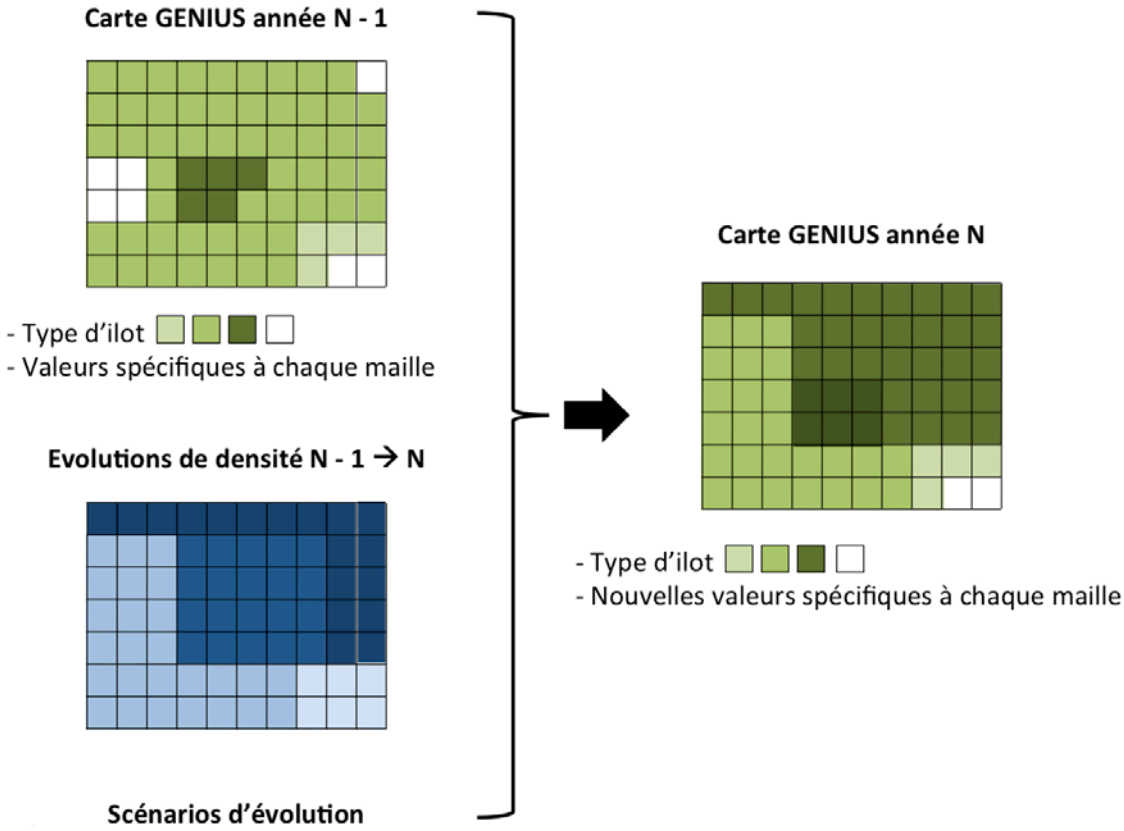


Figure 68 : Modélisation diachronique - Schéma de principe(illustration de l'auteur)

La première étape consiste donc à sélectionner un modèle prospectif d'évolution urbaine parmi ceux qui existent. Ce travail fera l'objet du chapitre 3.2. Nous avons choisi le modèle SLEDUM développé conjointement par un laboratoire d'économie et un laboratoire de géographie.

La deuxième étape consiste à définir des règles de descente d'échelle pour passer des informations produites par SLEDUM (évolutions de densité bâtie) à des informations plus précises à l'échelle du quartier et du bâtiment. Ces règles d'évolution seront basées sur des observations des évolutions passées présentées dans le chapitre 3.3.2 mais aussi sur des scénarios établis suite à des consultations d'experts présentés dans le chapitre 0.

Les chapitres 3.4, 3.5 et 3.6 détailleront les règles d'évolutions retenues pour les typologies, la morphologie et les technologies des quartiers et des bâtiments.

Pour finir, une validation de la méthode sur les évolutions passées de Paris fait l'objet du chapitre 3.7.

1.2.3. Limites géographiques de ce travail

La méthode mise en place est applicable quelle que soit la ville considérée. Cependant, nous limiterons nos expérimentations aux villes de Paris et Toulouse. La première raison à cela est le financement de la thèse. En effet, Ce travail a été rémunéré durant sa première année par le projet MUSCADE, projet de recherche financé par l'Agence Nationale de la Recherche à travers l'appel à projets Villes Durables. MUSCADE (Modélisation Urbaine et Stratégies d'adaptation au Changement climatique pour Anticiper la Demande et la production Energétique) a été coordonnée par le CNRM-GAME (Centre National de Recherche Météorologique de Météo-France – Groupe d'étude de l'Atmosphère Météorologique) et porté par de nombreux laboratoires dont le LRA (Laboratoire de Recherche en Architecture). Il est centré sur la ville de Paris et ses environs. Ce projet est jumelé au projet ACCLIMAT (Adaptation au Changement CLIMatique de l'Agglomération Toulousaine), projet de recherche financé par la fondation STAE (Fondation Sciences et Technologies pour l'Aéronautique et l'Espace) et centré sur la ville de Toulouse. Ces deux projets seront présentés plus en détail dans la troisième partie de ce mémoire. Ils sont en effet le cadre de la première application de GENIUS sur les villes de Paris et Toulouse.

Il est également important de souligner l'intérêt scientifique de ces deux villes. A l'échelle de la France, ce sont en effet deux métropoles très différentes. D'une part, bien que ces deux villes fassent partie des plus grandes agglomérations françaises, on note des différences très importantes dans leurs tailles et leurs densités de population (voir Tableau 15). A l'échelle de la commune, Paris et Toulouse ont des superficies similaires mais une densité de population difficilement comparable (5,6 fois plus élevée pour Paris). Malgré une atténuation en périphérie, on retrouve ces écarts de densité de population quelle que soit l'échelle. Il est également utile de souligner que tant à l'échelle de l'unité urbaine* qu'à celle de l'aire urbaine*, la métropole parisienne est 3,5 fois plus étendue que la métropole toulousaine.

* Voir glossaire

Tableau 15 : Chiffres clés de densité de population à Toulouse et Paris (INSEE, 2009a, 2009c, 2010a, 2010b, 2013a, 2013b)

		Paris	Toulouse
Commune	Population (2009)	2 234 105	440 204
	Superficie (km^2)	105,4	118,3
	Densité de population (habitant /km^2)	21 196	3 721
Unité urbaine	Population (2010)	10 460 118	879 683
	Superficie (km^2)	2 844,8	812
	Densité de population (habitant /km^2)	3 677	1 083
Aire urbaine	Population (2009)	12 161 542	1 218 166
	Superficie (km^2)	17 175	5 000
	Densité de population (habitant /km^2)	708	244

Par ailleurs, les climats toulousain et parisien sont très différents. Le tableau ci-dessous montre en particulier que le climat toulousain est plus clément.

Tableau 16 : Chiffres clés du climat (Météo-France, 2010)

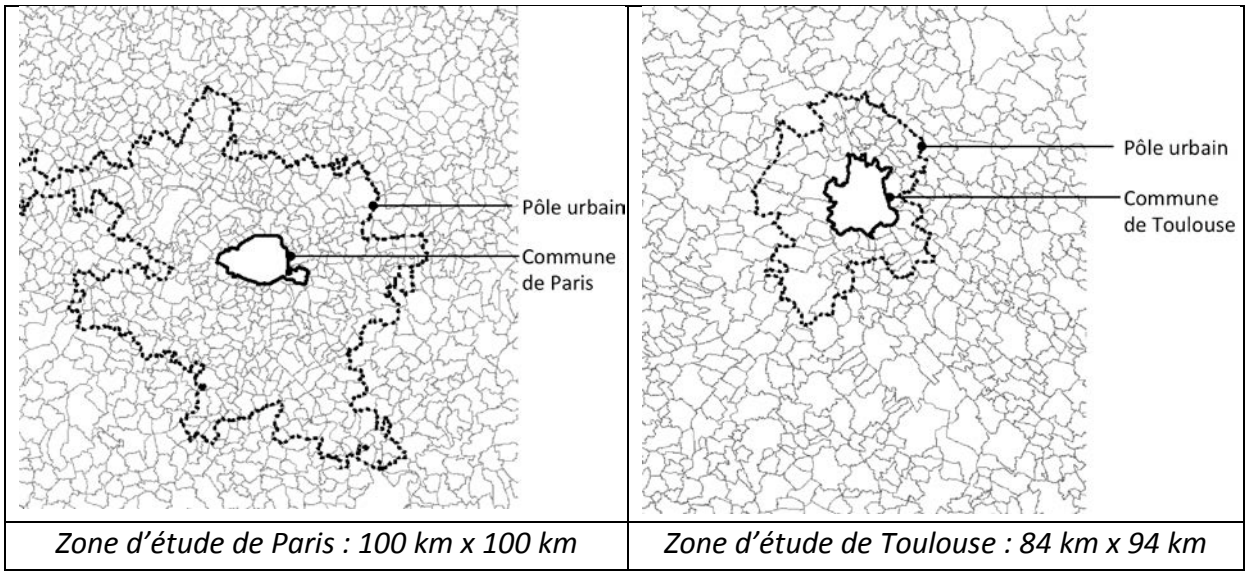
	Paris	Toulouse
Température minimale moyenne annuelle	8,9°	9,1°
Température maximale moyenne annuelle	16°	18,5°
Pluviométrie annuelle	637,4 mm	638,3 mm
Nombre de jours de pluie	111 jours	96 jours
Ensoleillement	1 662 heures	2 031 heures

En premier lieu, ces différences nous ont permis de nous assurer de la portabilité de notre méthode sur d'autres villes. En effet, nous avons d'abord mis au point la méthode sur Paris puis l'avons testée sur Toulouse qui est une ville à la structure très différente.

Ces différences présentent surtout un intérêt pour l'analyse pluridisciplinaire des problématiques d'énergétiques urbaines. En effet, varier les cas d'étude permet de mettre en avant l'importance du contexte dans les réponses à apporter au paradoxe énergétique

urbain, et permet d'éviter la mise en avant de « solutions miracles » uniquement valables dans certains cas particuliers. Par exemple, la mise en place de toitures végétalisées pourrait être plus problématique à Toulouse qu'à Paris car le climat y est plus chaud et pourrait favoriser un dessèchement de la végétation en toiture. De même, le taux de vitrage « idéal » ne sera pas le même à Toulouse et Paris car les deux villes n'ont pas le même ensoleillement.

En ce qui concerne la taille des zones d'étude, elles doivent permettre d'englober la majorité d'un pôle urbain ainsi que l'expansion future de la ville. Afin de définir cette emprise, nous nous sommes donc basés sur les résultats du modèle prospectif d'expansion urbaine choisi (voir chapitre 3.2). Les zones retenues ont finalement une emprise de 100 km par 100 km autour de la commune de Paris et une emprise de 84 km par 94 km autour de la commune de Toulouse.



Zone d'étude de Paris : 100 km x 100 km	*Zone d'étude de Toulouse : 84 km x 94 km*

Figure 69 : Emprises des zones d'étude (illustration de l'auteur)

2. Modélisation synchronique – Une base de données urbaines multi-scalaire

2.1. Revue de littérature des méthodes existantes

Les « quartiers types » tels que nous les définissons sont des archétypes représentatifs des formes urbaines rencontrées. D'après Panerai (Panerai et al., 1999), le type est un objet exemplaire qui permet de prendre en compte avec économie une population assez vaste, qu'il s'agisse de bâtiments, d'ilots, etc. Cet outil est donc fréquemment utilisé par les géographes et les urbanistes afin de mieux comprendre la ville.

Les îlots types sélectionnés devront être des formes urbaines contrastées permettant la mise en évidence de l'effet des différents facteurs morphologiques sur le microclimat, les consommations d'énergies et le potentiel en énergies renouvelables. Par ailleurs, ces formes urbaines devront être représentatives des villes de Paris, Toulouse et éventuellement d'autres villes européennes. Pour finir, ces ilots types devront être capables de représenter la ville actuelle et de s'adapter à ses évolutions possibles dans les 100 prochaines années.

Diverses méthodes existent dans la littérature pour la sélection d'ilots d'étude. On en retiendra trois types : les méthodes du type « familles de références », les méthodes du type « morphologies simplifiées » et les méthodes « statistiques ».

2.1.1. Les méthodes du type « familles de référence »

La première méthode consiste à identifier, pour une ville donnée, l'ensemble des bâtiments représentatifs d'une typologie ou d'une époque. C'est ce qui a été fait, par exemple, dans le travail de recherche de l'APUR intitulé « Consommation d'énergie et émissions de gaz à effet de serre liées au chauffage des résidences principales parisiennes » (Atelier Parisien d'URbanisme, 2007). Chaque immeuble parisien est classé dans une famille de référence. Ces familles sont tout d'abord historiques, chacune correspondant à une période de transformation et de croissance de la ville à laquelle il est possible d'associer une forme dominante de bâtiment et un mode de construction tenant compte des deux éléments fondateurs du tissu urbain : la configuration du parcellaire et les types d'édifice (implantation, forme, mode de construction). Le rapport de l'APUR présente neuf typologies différentes correspondant à neuf périodes de construction relativement homogènes en terme de morphologie, de matérialité et de niveau d'isolation de l'enveloppe (voir Figure 70).

Figure 70 : Familles de références de l'APUR (Atelier Parisien d'URbanisme, 2007)

Cette méthode présente plusieurs avantages. Tout d'abord, les neuf groupes typologiques sont représentatifs des bâtiments d'habitation que l'on retrouve dans Paris puisqu'ils permettent de reconstituer une carte de la commune. Par ailleurs, des données rigoureuses (constructives, d'implantation, de performances) peuvent être collectées par sondage. Le niveau de détail des ilots étudiés peut donc être très fin puisqu'il s'agit d'éléments construits et documentés.

Cette méthode présente cependant des limites. Tout d'abord, elle demande un travail de recensement très lourd. Par ailleurs, en raison de cette méthode d'enquête, les typologies sélectionnées sont représentatives de la ville de Paris mais peuvent difficilement être adaptées à d'autres villes. D'autre part, cette étude s'est poursuivie par le choix d'un ilot représentatif de chaque type afin de simuler son comportement thermique et de généraliser les résultats à l'ensemble de la ville. Cependant, lorsqu'un bâtiment « exemplaire » est choisi, ses particularités ne lui permettent pas d'être entièrement représentatif d'une typologie. Il est également intéressant de noter que, les quartiers identifiés seront extrêmement difficiles à faire évoluer dans le temps puisque chacun possède une géométrie propre. Il sera donc difficile de se projeter sur un horizon temporel séculaire avec cette méthode.

2.1.2. Les méthodes du type « morphologies simplifiées »

Cette deuxième méthode consiste à choisir des morphologies théoriques simplifiées qui soient représentatives des formes urbaines à étudier.

On peut citer l'exemple du projet ZED : towards Zero Emission urban Development (Steemers et al., 1996). Dans ce projet il a été fait le choix de six formes simplifiées : (1) les

tours, (2) les maisons mitoyennes, (3) les barres, (4) les structures à cours mitoyennes, (5) structures isolées à cours et (6) les structures continues à cours (voir Figure 71).

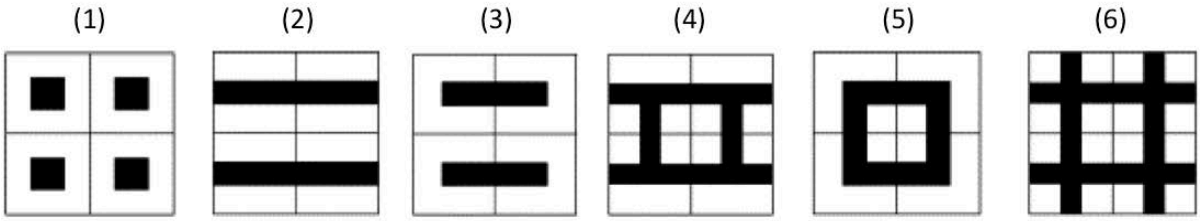


Figure 71 : Ilots simplifiés du projet ZED

Ces formes peuvent être répétées à l'infini pour créer le motif d'un tissu urbain simplifié. Les hauteurs sont ajustées pour que la surface bâtie soit la même dans tous les cas. L'idée est de comparer l'influence de la morphologie sur l'énergétique urbaine indépendamment de la densité bâtie.

Cette méthode permet de modéliser des formes urbaines qui ne sont pas spécifiquement liées à une ville existante : elle est donc utilisable dans le cadre d'un travail de prospective. D'autre part, le caractère « simpliste » d'une forme simplifiée lui permet de représenter un ensemble de bâtiments.

Cette méthode présente cependant de nombreuses limites, la principale étant bien sûr que les six formes ne représentent pas la large diversité des formes urbaines. Certaines, comme la sixième « structure continue à cours » ne sont pas plausibles dans le sens où on ne pourrait pas circuler dans ce tissu urbain (sauf à créer des passages en dessous des immeubles). De plus les formes très simplifiées excluent une modélisation précise (pas de vitrage, pas de décrochés dans la façade, pas de distinction des modes constructifs, etc.). Pour finir, il existe deux unités communes à ces ilots simplifiés : la surface construite et la surface de la portion de ville. Cela permet la comparaison des effets de la morphologie seule. Cependant, cela annule les effets de la densité bâtie qui est strictement identique pour les six formes urbaines.

2.1.3. Les méthodes « statistiques »

Certaines méthodes s'appuient sur une analyse statistique de la ville. Ainsi, la typologie n'est pas basée sur des connaissances urbaines a priori mais sur une méthode mathématique de classification. C'est le cas de l'étude de Long (Long & Kergomard, 2005) qui a mis en œuvre la méthode des nuées dynamiques (ou centres mobiles) sur la ville de Marseille. Dans cette méthode, les auteurs réalisent un maillage régulier de la ville (200 m x 200 m). Pour chaque

maille, des indicateurs statistiques portant sur l'usage des sols ou sur la forme des bâtiments sont calculés à partir de bases de données urbaines et d'un logiciel SIG. Par la suite, un certain nombre de mailles sont aléatoirement spécifiées comme les centres des classes et tous les autres quartiers sont assignés à la classe dont le centre est le plus proche. Les centres de chaque classe sont ensuite recalculés et la procédure précédente est réitérée jusqu'à ce que l'algorithme converge ou qu'un nombre maximal d'itérations ait eu lieu. Les auteurs répètent cette méthode pour un nombre de classes variable de deux à douze et sélectionnent la classification en neuf quartiers types pour laquelle la variance intra-classe est la plus faible.

Cette méthode présente l'avantage d'être représentative des quartiers de Marseille puisqu'elle permet de reconstituer une carte de la commune. Par ailleurs, des données telles que la densité, la compacité, etc. sont calculées et permettent de caractériser la forme urbaine.

Cependant, cette méthode présente aussi des inconvénients. Tout d'abord, le niveau de description des ilots n'est pas suffisamment fin pour permettre une modélisation très précise (pas de vitrage, pas de distinction des modes constructifs, etc.). Par ailleurs, la classification est basée sur des études statistiques et ne permet pas forcément de faire un lien avec des connaissances urbaines ou architecturales. Ainsi, les groupes de quartiers retenus seront pertinents en termes de « distance euclidienne* » calculée sur des critères quantitatifs mais ne correspondront pas forcément à des courants historiques de l'urbanisme. Or nous verrons que ce lien avec l'histoire de la ville est essentiel pour caractériser plus finement le bâti. Un même classement réalisé par un historien ou un urbaniste ne donnerait sans doute pas les mêmes résultats.

* Voir glossaire

2.1.4. Choix d'une méthode

Le Tableau 17 synthétise les atouts et faiblesses des différentes méthodes. Aucune méthode n'étant idéale pour notre étude, nous choisissons une méthode intermédiaire qui combine les avantages des exemples présentés précédemment.

Tableau 17 : Comparaison des trois méthodes typologiques

	Famille de référence	Morphologie simplifiée	Méthode statistique
Formes représentatives des bâtiments et villes existants	Oui	Non	Oui
Adaptable à une étude prospective	Non	Oui	Oui
Données précises sur la forme et la constitution du bâti	Oui	Non	Non
Extraction automatique des données	Non	-	Oui

Tout d'abord, nous allons choisir des types de quartiers de référence correspondant à des courants historiques de l'urbanisme (première méthode). Cette étape est présentée dans le chapitre 2.2.

Par la suite, ces quartiers seront identifiés au sein de la ville par une analyse statistique (troisième méthode). Comme dans les travaux de Long, nous commencerons par réaliser un maillage de la ville. Dans chaque maille, des indicateurs seront calculés à l'aide d'un logiciel SIG. L'analyse statistique permettra ensuite d'identifier automatiquement les types de quartiers. Cette étape est présentée dans les chapitres 2.3 et 2.4.

Pour finir, ces quartiers seront simplifiés en archétypes urbains (deuxième méthode) correspondant d'une part à la classe de quartier mais aussi à la spécificité de la maille considérée. A ces archétypes urbains, on attribuera en particulier des caractéristiques techniques permettant de réaliser des simulations thermiques relativement fines. Cette étape est présentée dans le chapitre 2.5.

Le travail présenté par la suite a été réalisé sur les zones d'étude de Paris et Toulouse. Cependant seule l'étude de Paris est présentée dans cette deuxième partie afin d'alléger la lecture du mémoire.

2.2. Sélection des quartiers types

2.2.1. Quartiers types sélectionnés

D'après Panerai, le domaine bâti s'élabore sur une structure profonde : le type n'a donc de sens que dans un tissu urbain, avec sa forme et son histoire. Nous avons donc choisi des types représentatifs de tissus urbains de références (Panerai et al., 1999). Le Tableau 18 représente les sept formes urbaines dominantes permettant de caractériser les quartiers que nous avons sélectionnés. Par la suite nous parlerons de « quartiers types » bien qu'il ne s'agisse pas à proprement parler de quartiers.

Le type « centre ancien » correspond à ce que Salat appelle « tissu ancien » et « développement des époques classique et industrielle ». Il correspond aux centres villes historiques. Avant 1850, la plupart des villes françaises sont composées de nombreux bâtiments venant s'implanter sur des parcelles étroites. Ces bâtiments font entre deux et quatre niveaux et sont souvent organisés autour de cours (Salat, 2011a). Entre 1853 et 1882, le préfet Hausmann fait connaître à Paris des transformations importantes. L'espace est optimisé pour rentabiliser l'immobilier, le système viaire est transformé par des percées pour des raisons esthétiques (image bourgeoise de la ville, mise en valeur des monuments) et techniques (salubrité, transports, mise en place d'équipement publics, etc.). L'ilot haussmannien est donc plus haut (sept niveaux) et peut parfois être triangulaire en raison des percées qui sont venues redécouper le bâti existant. Le développement urbain se poursuit sans grande rupture jusqu'à la fin de la seconde guerre mondiale (Panerai, Castex, & Depaule, 1997). Le type « centre ancien » correspond donc à un tissu urbain parmi les plus denses tout en conservant des hauteurs moyennes et relativement homogènes. Il est caractérisé par la présence de cours dans la plupart des ilots urbains.

Le type « immeuble discontinu » apparait plutôt après la deuxième guerre mondiale mais a perduré jusqu'à aujourd'hui. Bien que les hauteurs de ces bâtiments puissent être plus élevées que celles du centre ancien, ce tissu est globalement deux fois moins dense et crée souvent des espaces extérieurs moins qualifiés car moins appropriés par les habitants (Salat, 2011a).

Le type « Immeuble de grande hauteur » désigne à la fois les tours de bureaux et les tours d'habitation. En effet, la morphologie de ces bâtiments est très proche, et bien que nous les distinguerons par la suite en fonction de leurs usages, nous allons considérer qu'ils appartiennent à une même classe.
L'origine de ces immeubles d'habitation est à rechercher dans les années 60 à 70, quand la pénurie de logement ainsi que la volonté de soutenir l'industrie de la construction française

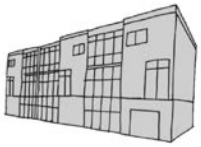
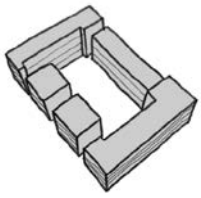
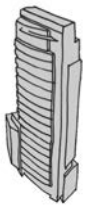
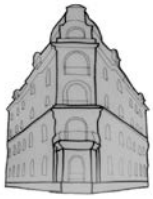
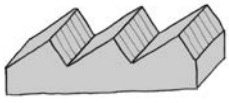
ont conduit à l'apparition des grands ensembles. Leurs hauteurs sont généralement plus élevées que celles du tissu ancien existant mais leurs densités peuvent être faibles en raison des nombreux espaces libres qui les entourent. Ces espaces résultent de la volonté moderniste de libérer le sol. Cependant, ils se révèlent souvent peu qualifiés et peu entretenus. De plus, la paupérisation qui a frappé ces quartiers et leur éloignement au reste de la ville ont conduit aux problèmes sociaux que l'on connaît aujourd'hui (Panerai et al., 1997).
Les premières tours de bureaux ont elles vu le jour dès la fin du XIX aux États-Unis mais elles sont toujours des symboles de modernité construites à travers le monde malgré leur manque d'adaptabilités aux contextes climatiques locaux nécessitant des consommations importantes de climatisation et / ou de chauffage (Fernandez & Lavigne, 2009).

Le type « immeuble continu » correspond à un retour vers les formes urbaines traditionnelles opéré au début du vingt-et-unième siècle. Il est composé d'ilots ouverts possédant une densité plus élevée que les immeubles de grande hauteur ou les immeubles discontinus. De plus, d'après Salat, ce type « présente l'avantage de mieux organiser l'espace et de s'insérer dans le tissus urbain. Il reste regrettable que ces ilots soient constitués d'aussi peu de bâtiments ce qui les rend moins diversifiés que le tissu urbain traditionnel. » (Salat, 2011a).

Les « bâtiments d'activités » sont constitués de bâtiments industriels, de bâtiments commerciaux mais également de locaux agricoles. Ils se trouvent donc plutôt en périphérie des villes. Ce type de bâtiments est caractérisé par de grandes surfaces (en raison de leur activité) à la volumétrie très simple (pour des raisons économiques).

Les types « pavillon discontinu » et « pavillon continu » correspondent traditionnellement à un mode d'habitat rural et ne se rencontraient que très peu en ville avant le phénomène de périurbanisation qui, petit à petit, a gommé les écarts entre milieu urbain et milieu rural (Ascher, 2010; Laigle et al., 2012). On a donc assisté pendant les dernières décennies au développement de lotissements pavillonnaires en périphérie plus ou moins lointaine des villes. Cependant, il faut également ajouter à ce phénomène un courant de l'urbanisme plus ancien : les cités jardins. Suite à la deuxième révolution industrielle, beaucoup de pays européens ont souffert d'une crise du logement. En Angleterre en particulier, la solution retenue n'est pas celle de logements collectifs mais celle des cités jardins : des villes satellites entières sont conçues sur le modèle traditionnel de l'architecture rurale avec d'une part des maisons isolées mais aussi également des maisons en bandes qui correspondent à notre type « pavillon continus ». Ce mode d'habitat de masse est rendu possible par des réseaux de transports structurés autours des différents pôles de croissance (Panerai et al., 1997). Bien que plus rare et ponctuel, ce type d'urbanisme s'est également développé en France (Weidknnet, 2012).

Tableau 18 : Les sept quartiers types retenus

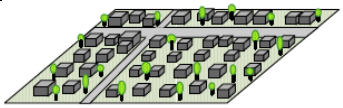
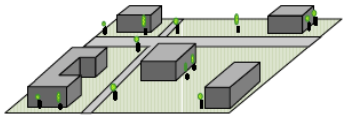
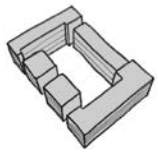
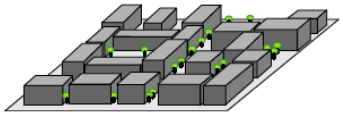
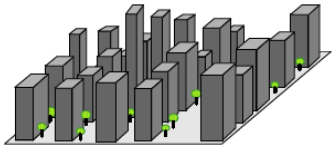
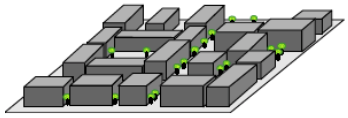
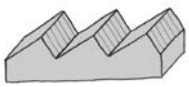
Type de quartier	Illustration
Pavillon discontinu	
Pavillon continu	
Immeuble discontinu	
Immeuble continu	
Immeuble de grande hauteur	
Centre ancien	
Bâtiment d'activités	

Ce choix d'ilots a été validé par des entretiens avec les urbanistes de l'IAU-IdF (Institut d'Aménagement et d'Urbanisme d'Ile-de-France) lors d'une réunion en avril 2011 dans leur locaux. L'objectif de la thèse ainsi que les typologies envisagées ont été présentés à quatre spécialistes de l'IAU-IdF qui ont validé la typologie et contribué à en définir la terminologie.

Par ailleurs, un questionnaire complété par les adhérents de l'APUMP (Association des Professionnels de l'Urbanisme de Midi-Pyrénées) a contribué à asseoir ce choix typologique (cf. Annexe 1). Les vingt-cinq urbanistes ayant répondu à ce sondage ont en majorité jugé les types choisis comme représentatifs des villes de Midi-Pyrénées.

Par ailleurs, ces types trouvent des échos dans d'autres études de la morphologie urbaine comme la thèse de Long (Long & Kergomard, 2005) qui a conduit à des conclusions similaires avec les classes de bâtiments suivantes : bâtiments industriels, centre-ville, péricentre, grands ensembles, petits collectifs et quatre classes d'habitat individuel. On peut également trouver un parallèle avec les LCZ de Steward et Oke (Stewart & Oke, 2009) où les classes sont les suivantes :

Tableau 19 : Correspondance entre les LCZ et nos quartiers types

Quartiers type		LCZ	
Pavillon discontinu		Open lowrise Sparsely built	
Pavillon continu		Compact lowrise	
Immeuble discontinu		Open midrise	
Immeuble continu		Compact midrise	
Immeuble de grande hauteur		Open highrise Compact highrise	
Centre ancien		Compact midrise	
Bâtiment d'activités		Large lowrise Heavy Industry	

Notons que ces types sont purement morphologiques et indépendants de l'usage qu'ils abritent (par exemple, le centre ancien comme le pavillon peuvent accueillir de l'habitat ou des bureaux).

2.2.2. Taille des mailles

Concernant la taille des ilots, il nous faut trouver une maille qui ne fragmente pas trop les ilots de grande taille (grands ensembles, bâtiments d'activités) tout en représentant avec pertinence l'hétérogénéité urbaine.

Dans le cadre de la thèse de Long (Long & Kergomard, 2005), un travail statistique a été mené avec pour objectif d'analyser l'homogénéité des objets à l'intérieur de mailles de 50, 100 et 200 m de côté, sur la ville de Marseille. La maille de 200 mètres par 200 mètres a finalement été retenue. L'auteur précise cependant que la pertinence de cette maille peut dépendre de la ville étudiée.

Nous avons mené une étude similaire sur la zone d'étude parisienne. Ainsi, nous avons calculé un certain nombre de paramètres pour des mailles de 50, 100, 250 et 500 m de résolution (voir méthode de calcul au chapitre 2.3). En fonction du type de quartier, nous avons calculé pour chacun de ces paramètres des indicateurs statistiques : moyenne, écart type* global entre les mailles et, lorsque cela était possible, l'écart type moyen au sein de chaque maille. Nous avons également calculé le fractionnement des bâtiments qui correspond au nombre de fragments de bâtiments créés par le maillage divisé par le nombre de bâtiments avant fractionnement.

* Voir glossaire

Tableau 20 : Indicateurs statistiques pour quatre types de résolutions

Paramètre	Type	Résolution	Moyenne	Écart type moyen dans une maille	Écart Type global entre mailles
Fractionnement des bâtiments	Pavillons	50 x 50	175,23%	-	-
		100 x 100	123,85%	-	-
		250 x 250	113,69%	-	-
		500 x 500	107,16%	-	-
	Immeubles continus et discontinus	50 x 50	178,84%	-	-
		100 x 100	133,15%	-	-
		250 x 250	113,92%	-	-
		500 x 500	107,88%	-	-
	Immeubles de grande hauteur	50 x 50	202,44%	-	-
		100 x 100	146,50%	-	-
		250 x 250	121,32%	-	-
		500 x 500	112,14%	-	-
	Centre ancien	50 x 50	187,83%	-	-
		100 x 100	139,22%	-	-
		250 x 250	114,20%	-	-
		500 x 500	108,67%	-	-
Densité brute	Pavillons	50 x 50	0,457	-	0,503
		100 x 100	0,388	-	0,329
		250 x 250	0,420	-	0,409
		500 x 500	0,429	-	0,432
	Immeubles continus et discontinus	50 x 50	1,905	-	1,375
		100 x 100	1,778	-	0,921
		250 x 250	0,987	-	0,884
		500 x 500	0,869	-	0,831
	Immeubles de grande hauteur	50 x 50	3,740	-	2,576
		100 x 100	2,951	-	2,937
		250 x 250	1,791	-	1,311
		500 x 500	1,530	-	1,006
	Centre ancien	50 x 50	3,136	-	1,438
		100 x 100	3,030	-	1,103
		250 x 250	2,495	-	1,000
		500 x 500	2,226	-	0,974
Hauteur	Pavillons	50 x 50	7,577	1,600	4,130
		100 x 100	7,466	2,208	3,769
		250 x 250	8,470	3,021	4,318
		500 x 500	9,007	3,368	4,236
	Immeubles continus et	50 x 50	16,589	4,297	6,927
		100 x 100	14,236	5,066	6,977

Paramètre	Type	Résolution	Moyenne	Écart type moyen dans une maille	Écart Type global entre mailles
	discontinus	250 x 250	13,105	5,187	6,311
		500 x 500	12,530	5,018	5,870
	Immeubles de grande hauteur	50 x 50	45,284	10,983	10,999
		100 x 100	54,564	18,614	25,619
		250 x 250	40,133	13,918	14,135
		500 x 500	42,541	12,253	11,031
	Centre ancien	50 x 50	20,295	4,943	5,242
		100 x 100	20,263	3,669	4,246
		250 x 250	19,878	6,527	3,991
		500 x 500	19,655	7,031	4,276
Contiguïté	Pavillons	50 x 50	0,030	0,030	0,078
		100 x 100	0,017	0,028	0,052
		250 x 250	0,031	0,058	0,071
		500 x 500	0,041	0,077	0,080
	Immeubles continus et discontinus	50 x 50	0,216	0,118	0,186
		100 x 100	0,132	0,112	0,149
		250 x 250	0,118	0,121	0,140
		500 x 500	0,109	0,124	0,132
	Immeubles de grande hauteur	50 x 50	0,504	0,185	0,225
		100 x 100	0,185	0,152	0,191
		250 x 250	0,189	0,186	0,154
		500 x 500	0,190	0,190	0,137
	Centre ancien	50 x 50	0,362	0,155	0,167
		100 x 100	0,365	0,169	0,142
		250 x 250	0,331	0,187	0,130
		500 x 500	0,317	0,194	0,117
Compacité	Pavillons	50 x 50	5,392	0,483	0,970
		100 x 100	5,600	0,652	0,827
		250 x 250	5,687	0,800	0,741
		500 x 500	5,704	0,894	0,622
	Immeubles continus et discontinus	50 x 50	5,290	1,035	1,676
		100 x 100	5,749	1,177	1,341
		250 x 250	5,688	1,172	0,995
		500 x 500	5,662	1,187	0,792
	Immeubles de grande hauteur	50 x 50	4,440	1,726	1,738
		100 x 100	5,953	1,400	1,395
		250 x 250	5,855	1,564	1,122
		500 x 500	5,726	1,484	0,820
	Centre ancien	50 x 50	4,709	1,249	1,520
		100 x 100	4,704	1,354	1,218
		250 x 250	4,931	1,452	1,095
		500 x 500	4,973	1,492	0,815

Paramètre	Type	Résolution	Moyenne	Écart type moyen dans une maille	Écart Type global entre mailles
CES	Pavillons	50 x 50	0,166	-	0,091
		100 x 100	0,149	-	0,071
		250 x 250	0,137	-	0,067
		500 x 500	0,129	-	0,066
	Immeubles continus et discontinus	50 x 50	0,327	-	0,176
		100 x 100	0,239	-	0,126
		250 x 250	0,207	-	0,115
		500 x 500	0,186	-	0,108
	Immeubles de grande hauteur	50 x 50	0,466	-	0,244
		100 x 100	0,251	-	0,143
		250 x 250	0,218	-	0,108
		500 x 500	0,213	-	0,102
	Centre ancien	50 x 50	0,467	-	0,180
		100 x 100	0,452	-	0,146
		250 x 250	0,379	-	0,142
		500 x 500	0,340	-	0,137

Un maillage optimal permettrait : (1) de réduire l'écart type moyen au sein de chaque maille de manière à ce que les mailles soient homogènes, (2) d'augmenter l'écart type global de manière à ce que les mailles soient biens différenciées, (3) de réduire le fractionnement des mailles et (4) de limiter les temps de calcul.

Cependant, comme on peut le voir dans le Tableau 20, il n'y a pas de maillage optimal. En effet, si on classe les différents découpages par pertinence selon les quatre critères exposés précédemment (1 désignant la meilleure solution et 4 la solution la moins bonne) il n'y a pas de solution qui se détache clairement des autres (voir Tableau 21).

Du point de vue de l'homogénéité du découpage, la maille de résolution 50 mètres est la meilleure (l'écart type moyen dans une maille est le plus faible). Suivent ensuite dans l'ordre les résolutions de 100, 250 et 500 mètres. L'ordre est le même si l'on souhaite que les mailles soient aussi différenciées que possible les unes des autres (l'écart type global moyen est le plus fort).

Cependant, si on s'intéresse au fractionnement des bâtiments, le classement par pertinence des maillages est inversé. De même le temps de calcul des indicateurs caractérisant chaque maille est directement lié à la finesse de la maille. Ces deux critères conduisent donc à classer les différents découpages dans l'ordre de pertinence suivant : 500, 250, 100 et 50 mètres.

Si on agrège les quatre critères en réalisant une moyenne de leurs classements (sans pondération particulière), les mailles de 100 mètres par 100 mètres et les mailles de 250 mètres par 250 mètres semblent être les plus pertinentes (voir Tableau 21). Nous arrêtons finalement notre choix sur la maille de 250 mètres par 250 mètres qui permet un temps de calcul des indicateurs plus faible que celle de 100 mètres par 100 mètres.

Tableau 21 : Classement des maillages par pertinence selon quatre critères

Maillage	Moyenne des classements				Classement final
	Écart type moyen dans une maille	Écart Type global entre mailles	Fractionnement	Temps de calcul	
50 x 50	1,6	1,4	4	4	2,7
100 x 100	1,9	2,2	3	3	2,5
250 x 250	3	2,9	2	2	2,5
500 x 500	3,5	3,5	1	1	2,2

2.3. Choix et calcul des paramètres

Notre objectif est de calculer un certain nombre de paramètres qui vont décrire la forme urbaine de façon à ce que l'on puisse identifier les différents types de quartier de la ville de manière automatique. Rappelons que puisque l'on va réaliser un maillage de la ville, ces paramètres devront être agrégés à l'échelle de mailles de 250 mètres par 250 mètres.

L'analyse statistique que nous allons mener par la suite permettra en premier lieu de ne sélectionner que les paramètres significatifs pour la détermination des différents types de quartiers. Dans cette optique, on va chercher à être le plus exhaustif possible dans le choix des paramètres.

2.3.1. Base de données

La première étape avant de sélectionner les indicateurs est de déterminer les bases de données à notre disposition. En effet, celles-ci vont influencer le choix des paramètres dans le sens où il nous sera impossible de calculer des paramètres issus de données inexistantes ou indisponibles.

Il existe plusieurs bases de données qui correspondent à nos besoins. En effet, pour chaque ville, des données spécifiques provenant des mairies, des services de gestion des espaces verts, des professionnels de l'immobilier, des services des transports, etc. sont collectées et structurées en bases de données urbaines.

Cependant, toutes ne sont pas accessibles. De plus, afin de pouvoir reproduire notre travail dans plusieurs villes, nous souhaitons travailler avec des bases de données homogènes à l'échelle de la France. Ainsi, nous allons utiliser deux principales sources de données : L'IGN et l'INSEE. Nous utiliserons également des bases de données locales plus détaillées à des fins de validation (voir chapitre 2.6).

L'institut national de l'information géographique et forestière (IGN) est un établissement public à caractère administratif, placé sous la double tutelle du ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie et du ministère de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt. « L'institut a pour vocation de décrire, d'un point de vue géométrique et physique, la surface du territoire national et l'occupation de son sol, d'élaborer et de mettre à jour l'inventaire permanent des ressources forestières nationales prévu par l'article L. 521-1 du code forestier, ainsi que de faire toutes les représentations appropriées, d'archiver et de diffuser les informations correspondantes. » (Ministère de l'Ecologie, du Développement

Durable et de l'Energie, 2011). De l'IGN, nous utiliserons les bases de données urbaines suivantes : la BD Topo, la BD Parcellaire et la BD IRIS.

La base de données topographique (BD Topo) de l'IGN est une base de données vectorielles qui fournit des informations à l'échelle de l'objet sur différentes thématiques : les bâtiments (indifférenciés, industriels, remarquables, etc.), la végétation, les routes, le réseau hydrographique, etc.). Les données utilisées pour Paris et Toulouse ont été mises à jour en 2008.

La BD Parcellaire est une base de données vectorielles contenant, entre autres, des informations à l'échelle de l'objet telles que les limites administratives des communes et la localisation des parcelles. Les données utilisées pour Paris et Toulouse ont également été mises à jour en 2008.

Afin de géolocaliser ses données statistiques, l'INSEE a développé un découpage du territoire en mailles de taille homogène appelées IRIS (Ilots Regroupés pour l'Information Statistique). La taille visée pour chaque IRIS est de 2 000 habitants. Le contour des IRIS est distribué par l'IGN et les données attributaires sont diffusées par l'INSEE (INSEE, 2012). Les données utilisées pour Paris et Toulouse ont été mises à jour en 2010 mais contiennent des informations datant du recensement de 2008 réalisé par l'INSEE.

L'Institut National de la Statistique et des Études Économiques (INSEE) est une direction générale du ministère de l'Économie et des Finances. La première mission de l'INSEE est « d'établir, de rassembler et de mettre à jour les statistiques relatives à l'État et au mouvement des personnes et des biens dans la métropole et dans les territoires d'outre-mer » (Ministère de l'Économie et des Finances, 1946). De l'INSEE, nous utiliserons la base de données infracommunales qui contient, entre autres, des informations sur les logements et la population pour chaque IRIS. Ces données sont issues du recensement de 2008 et décrivent la composition de la population (âge, sexe, groupe socio-professionnel, activité des résidents, composition des ménages). Elles donnent également des informations sur les logements (nombre de pièces, type, année de construction, etc.). Notons cependant que certaines de ces données étant déclarées par l'enquêté, elles ne sont pas toujours fiables.

Une fois les bases de données identifiées, il s'agit de préparer l'extraction des informations. L'usage des données nécessite une qualification et un « nettoyage » préalable car elles peuvent être lacunaires sur certaines IRIS ou bien sembler aberrantes, les contours des bâtiments peuvent présenter des superpositions, des dédoublements ou d'autres erreurs de topologie. Nous avons réalisé ces opérations de vérification et de correction avec l'outil ArcGIS que nous présenterons dans le chapitre 2.3.4.

2.3.2. Analyse bibliographique

Corpus bibliographique

La sélection de paramètres permettant de caractériser le tissu urbain ainsi que son comportement est un thème récurrent de la morphologie urbaine. Différents types de publications traitent de ce sujet sous des angles distincs.

D'une part, une partie de la littérature s'intéresse aux paramètres descriptifs des formes urbaines. C'est souvent le cas des établissements publics de coopération intercommunale ou des agences d'urbanisme locales qui cherchent à connaître plus précisément le parc de bâtiments et les morphologies urbaines qui composent leur ville. On peut par exemple citer le travail de l'agence d'urbanisme de Caen-Métropole sur la création d'un « Répertoire des formes urbaines résidentielles de Caen-Métropole » (AUCAME, 2010). On peut également citer les travaux de la communauté métropolitaine de Québec et de l'atelier parisien d'urbanisme qui ont tous deux cherché à caractériser la densité de leurs formes urbaines (Communauté métropolitaine de Québec, 2010; Moulinié & Naudin-Adam, 2005b). Certaines études comme celles de Tsai s'attachent à décrire la forme de la ville dans son ensemble (Tsai, 2005). Elles permettent de faire le lien entre la forme urbaine et la structure de la ville.

D'autre part, une partie de cette littérature a pour objectif d'étudier les comportements physiques des formes urbaines vis-à-vis d'une problématique environnementale particulière. On peut par exemple citer Fouad ou encore Long qui ont sélectionné des indicateurs en lien avec l'atténuation de l'effet d'ilot de chaleur urbain (Fouad, 2007; Long & Kergomard, 2005). Sur la thématique des consommations énergétiques des bâtiments, l'APUR a également proposé un certain nombre de paramètres décrivant la forme urbaine (Atelier Parisien d'URbanisme, 2007).

Enfin, notre attention a été particulièrement retenue par un certain nombre de travaux proposant d'établir des systèmes d'indicateurs pour réaliser des analyses multicritères de la ville. C'est l'objet du projet de recherche SAGACITE qui a conduit au développement d'un outil SIG nommé MORPHOLOGIC. Cet outil permet de calculer une quarantaine d'indicateurs regroupés selon quatre axes : les bâtiments, les transports, la végétation et le confort (Adolphe et al., 2002). Dans un ouvrage récent, Salat propose un système d'indicateurs plus complexes centrés sur la forme urbaine. Il y distingue 62 indicateurs répartis en neuf thèmes d'analyse : usage du sol, mobilité, eau, biodiversité, équité, économie, déchets, culture & bien être, énergie & bioclimatisme (Salat, 2011a).

En collaboration avec Catherine Dubois, doctorante à l'École d'architecture de l'Université de Laval à Québec, nous avons réalisé une revue de littérature des paramètres utilisés pour décrire la forme urbaine dans ce corpus bibliographique. Ce travail est présenté en annexe 2.

Les établissements publics de coopération intercommunale et les agences d'urbanisme proposent souvent des paramètres descriptifs de la forme urbaine destinés à caractériser le parc de bâtiments de leur ville. Ces paramètres ne sont pas nécessairement quantitatifs : forme urbaine, distribution des logements, mitoyenneté, type d'habitat, implantation du bâti sur la parcelle, etc. Par ailleurs, une attention particulière est portée au lien entre cette description des formes urbaines et les densités de la ville. De nombreux paramètres sont utilisés pour caractériser ces densités de manière précise et pertinente : densité bâtie brute, nette, densité de population brute et nette, densité de logements, coefficient d'occupation du sol, coefficient d'emprise au sol, etc. (AUCAME, 2010; Communauté métropolitaine de Québec, 2010; Moulinié & Naudin-Adam, 2005b).

Les études ayant pour objet l'impact des formes urbaines sur des phénomènes physiques (microclimat, thermique du bâtiment, etc.) sont riches en paramètres descriptifs de la forme des bâtiments : coefficient de compacité, coefficient de contiguïté, hauteur du bâti, type de toiture, surface de vitrage, facteur de vue du ciel, rugosité et porosité urbaine, etc. On y retrouve également des paramètres décrivant la matérialité du bâti : albédo, matériaux, période de construction, etc. (Atelier Parisien d'URbanisme, 2007; Fouad, 2007; Long & Kergomard, 2005).

Les études proposant des systèmes d'indicateurs pluridisciplinaires sont extrêmement complètes et proposent des paramètres en lien avec de nombreuses thématiques : la consommation énergétique des bâtiments, les transports, la biodiversité, le confort, l'eau, la socio-économie, la gestion des déchets, etc. (Adolphe et al., 2002; Salat, 2011a). Cette variété permet d'être exhaustif dans le choix de paramètres susceptibles de différencier plusieurs types de quartiers.

L'étude de Tsai est particulière dans le sens où, contrairement aux précédentes, elle ne porte pas sur l'échelle du bâtiment mais sur celle de la ville. Aux densités bâties et de population globales de la ville, Tsai ajoute l'emprise de la ville, ainsi que des coefficients caractérisant la distribution de ces densités (homogène ou hétérogène, mono-centrique ou polycentrique) (Tsai, 2005).

Méthode d'analyse

Comme l'explique Panerai dans son ouvrage « Analyse urbaine » (Panerai et al., 1999), un type de bâtiment n'a de sens que dans un contexte spatial et temporel. Le premier axe d'analyse sera donc l'insertion du type dans le tissu urbain. Dans un deuxième temps, Panerai distingue trois éléments d'analyse des formes urbaines : le réseau de voiries, le découpage foncier et les constructions. De plus, nous ferons une distinction entre le bâtiment en tant que tel et « le bloc » qui est constitué d'une juxtaposition de bâtiments. Ainsi, nous analyserons la forme urbaine selon cinq axes : (1) insertion dans un tissu urbain, (2) espace public (y compris le réseau de voiries), (3) découpage foncier, (4) bloc et (5) bâtiment.

L'analyse du tissu urbain résulte de l'identification de chacun de ces ensembles, l'étude de leurs logiques et de leurs relations. Nous avons donc réparti les indicateurs relevés dans notre analyse bibliographique et les avons associés à chacun des axes. Ainsi, les arbres ci-après (Figure 72 à Figure 77) reprennent l'articulation des éléments constitutifs d'une typologie, de leurs caractéristiques et des paramètres permettant d'évaluer ces caractéristiques. Les numéros entre parenthèses correspondent aux références bibliographiques étudiées. Notons que certains paramètres ne résultent pas de l'analyse bibliographique mais sont proposés dans le cadre de cette thèse pour décrire les caractéristiques des formes urbaines.

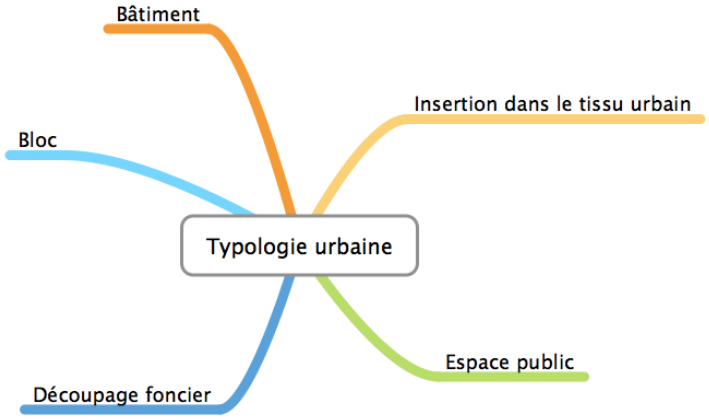


Figure 72 : Paramètres descriptifs d'une typologie urbaine – Structure de l'arbre (illustration de l'auteur)

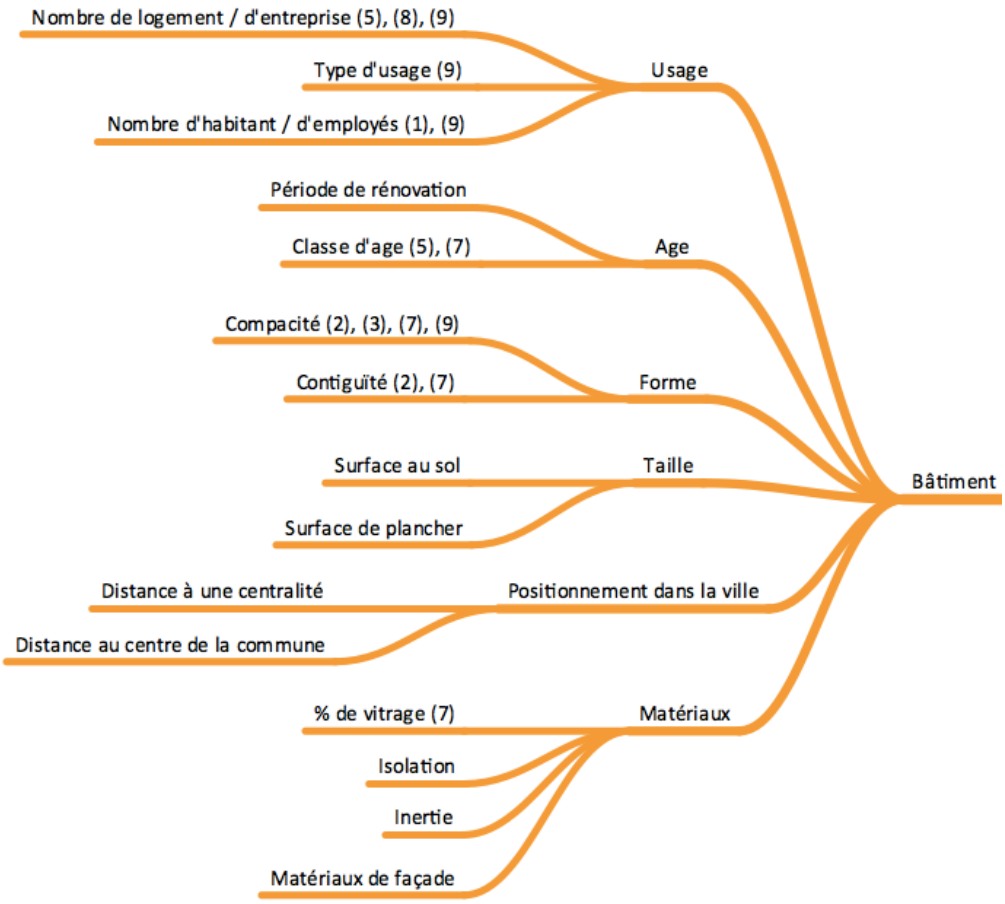


Figure 73 : Paramètres descriptifs d'une typologie urbaine – Axe « Bâtiment » (1) (Tsai, 2005), (2) (Adolphe et al., 2002), (3) (Long & Kergomard, 2005), (5) (AUCAME, 2010), (7) (Atelier Parisien d'URbanisme, 2007), (8) (Moulinié & Naudin-Adam, 2005b) et (9) (Salat, 2011a)

Figure 74 : Paramètres descriptifs d'une typologie urbaine – Axe « Bloc » (2) (Adolphe et al., 2002), (3) (Long & Kergomard, 2005), (4) (Fouad, 2007), (7) (Atelier Parisien d'URbanisme, 2007), et (9) (Salat, 2011a)

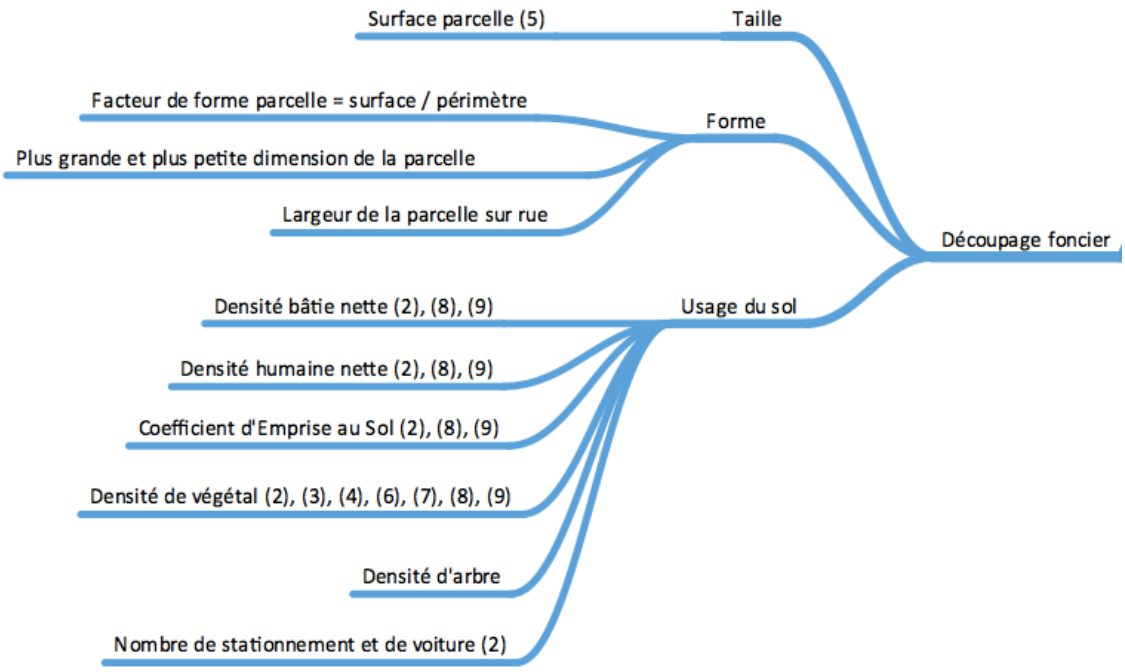


Figure 75 : Paramètres descriptifs d'une typologie urbaine – Axe « Découpage foncier » (2) (Adolphe et al., 2002), (3) (Long & Kergomard, 2005), (4) (Fouad, 2007), (5) (AUCAME, 2010), (6) (Communauté métropolitaine de Québec, 2010), (7) (Atelier Parisien d'URbanisme, 2007), (8) (Moulinié & Naudin-Adam, 2005b) et (9) (Salat, 2011a)

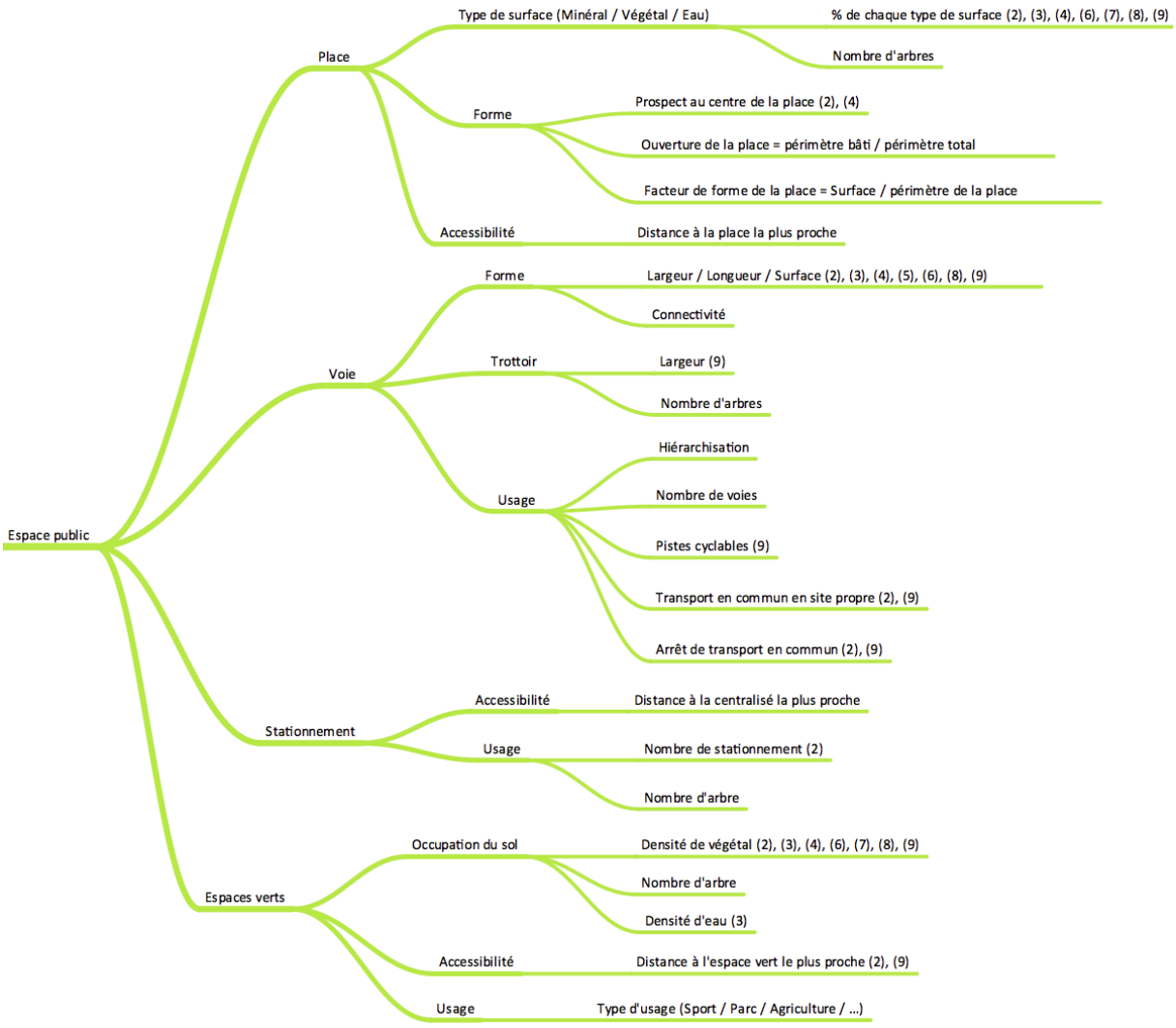


Figure 76 : Paramètres descriptifs d'une typologie urbaine – Axe « Espace public» (2) (Adolphe et al., 2002), (3) (Long & Kergomard, 2005), (4) (Fouad, 2007), (5) (AUCAME, 2010), (6) (Communauté métropolitaine de Québec, 2010), (7) (Atelier Parisien d'URbanisme, 2007), (8) (Moulinié & Naudin-Adam, 2005b) et (9) (Salat, 2011a)

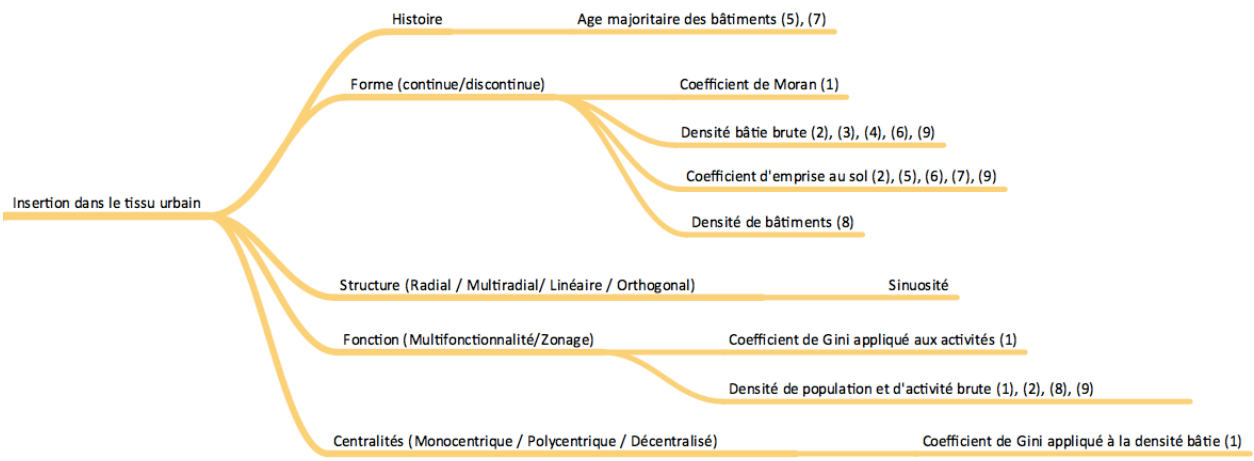


Figure 77 : Paramètres descriptifs d'une typologie urbaine – Axe « Insertion dans le tissu urbain» (1) (Tsai, 2005), (2) (Adolphe et al., 2002), (3) (Long & Kergomard, 2005), (4) (Fouad, 2007), (5) (AUCAME, 2010), (6) (Communauté métropolitaine de Québec, 2010), (7) (Atelier Parisien d'URbanisme, 2007), (8) (Moulinié & Naudin-Adam, 2005b) et (9) (Salat, 2011a)

Comme le montre la Figure 78, ces cinq axes peuvent être agrégés dans une seule unité : celle de la maille.

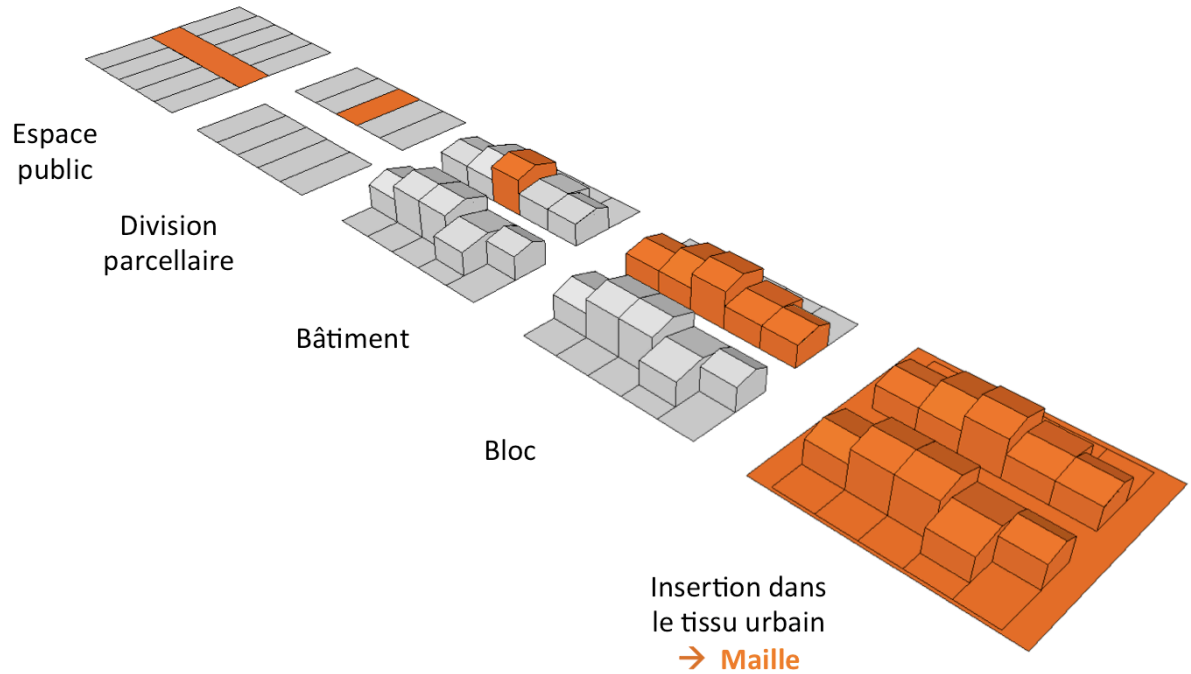


Figure 78 : Emboitement des échelles (illustration de l'auteur)

L'agrégation des données pose la question de la pondération des paramètres. Celle-ci peut prendre plusieurs formes en fonction du paramètre considéré.

Pour les paramètres décrivant une quantité (surface au sol, surface de plancher, surface d'espaces verts, etc.) il nous suffit de faire une somme.

Pour les paramètres décrivant des caractéristiques du tissu urbain pour lesquels on souhaite avoir une idée générale (hauteur, compacité du tissu, contiguïté, etc.) il nous faut faire des moyennes. Ces moyennes peuvent être pondérées (1) soit par la surface au sol, afin de prendre en compte la part de l'élément dans le découpage de la maille ; (2) soit, dans le cas de certains paramètres calculés pour les bâtiments, par la surface de plancher, afin de prendre en compte la part du bâtiment en tant qu'unité fonctionnelle dans le découpage de la maille. Notons cependant qu'avec ce type d'agrégation on perd inévitablement de la précision dans les données. Si on considère l'exemple d'une maille où l'on trouve des hauteurs très faibles (pavillon d'un seul niveau) et des hauteurs très élevées (tour de plus de dix étages) la valeur moyenne obtenue pour la hauteur de l'ensemble de ces bâtiments n'aura que peu de sens. Il est donc utile de compléter ce type d'agrégation par des mesures d'hétérogénéité.

Pour les indicateurs obtenus par des moyennes, nous calculerons l'écart type. Celui-ci nous permettra de savoir si les moyennes sont représentatives des éléments d'une maille. Ce type d'indicateur n'est pas qu'un élément statistique puisqu'il permet de caractériser l'hétérogénéité d'un tissu urbain, laquelle peut être représentative d'un type de quartiers. Notons qu'il existe d'autres mesures de l'hétérogénéité comme la dispersion, l'amplitude, l'écart interfractiles ou interquantiles, etc.

2.3.3. Analyse opérationnelle

L'agrégation des paramètres selon les différentes méthodes présentées conduit à une démultiplication de leur nombre. Cependant, certains paramètres n'ont pas pu être pris en compte pour des raisons opérationnelles (non calculables par les logiciels SIG à notre disposition ou inexistants dans les bases de données urbaines disponibles). En particulier, les parcelles n'étant pas disponibles sous format vectorisé parmi les bases de données de l'IGN au moment de l'étude, l'axe « découpage foncier » n'a pu être analysé.

Par ailleurs, certains paramètres qui ne sont a priori pas pertinents pour l'identification des typologies sont néanmoins nécessaires en tant que données d'entrée pour des modèles d'énergétique urbaine. Par exemple, l'orientation des bâtiments est essentielle pour évaluer l'apport solaire mais n'avait pas été retenue jusqu'à présent pour différencier les typologies.

Nous obtenons finalement le jeu de paramètres présentés dans le Tableau 22. Les numéros entre parenthèse dans la première colonne correspondent aux références bibliographiques étudiées : (1) (Tsai, 2005), (2) (Adolphe et al., 2002), (3) (Long & Kergomard, 2005), (4) (Fouad, 2007), (5) (AUCAME, 2010), (6) (Communauté métropolitaine de Québec, 2010), (7) (Atelier Parisien d'URbanisme, 2007), (8) (Moulinié & Naudin-Adam, 2005b) et (9) (Salat, 2011a).

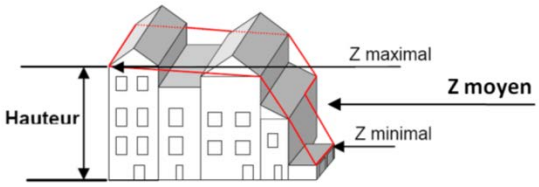
Tableau 22 : Paramètres retenus pour caractériser le tissu urbain

Désignation	Indicateur	Définition / Calcul	Base de données
Axes : bâtiment et bloc			
H_moy_bat (m) (3), (7)	Hauteur moyenne des bâtiments dans la maille	Moyenne dans une maille des hauteurs données par la BD topo au prorata de la surface au sol du bâtiment. $$H_{moy\ bat} = \frac{\sum_i (h_{bat\ i} \times S_{sol\ i})}{S_{sol\ tot}}$$	IGN BD Topo
H_indus	Hauteur moyenne des bâtiments d'activités	Moyenne dans une maille des hauteurs données par la BD topo au prorata de la surface au sol du bâtiment.	IGN BD Topo
H_EcTy (m)	Écart type des hauteurs des bâtiments dans la maille	Écart type dans une maille des hauteurs données par la BD topo (pas de pondération par la surface au sol).	IGN BD Topo
H_EcTy_blo (/)	Écart type des hauteurs des bâtiments dans un même bloc bâti	Écart type dans un bloc des hauteurs données par la BD topo (pas de pondération par la surface au sol). (Voir Figure 78 pour la définition d'un bloc).	IGN BD Topo
S_sol (m²)	Surface au sol des bâtiments de logement et de bureau dans la maille	Somme des surfaces au sol bâties dans la maille d'après la BD topo.	IGN BD Topo
Ssol_indus (m²)	Surface au sol des bâtiments d'activités dans la maille	Somme des surfaces de plancher des bâtiments d'activités dans la maille. D'après la BD Topo de l'IGN, sont concernés : - Les bâtiments industriels - Les bâtiments commerciaux - Les bâtiments agricoles (y-compris les serres et les silos)	IGN BD Topo

Désignation	Indicateur	Définition / Calcul	Base de données
S_pl (m²)	Surface de plancher des bâtiments de logement et de bureau dans la maille	Somme des surfaces de plancher de logement et de bureau dans la maille. De la hauteur on déduit un nombre de niveau (= arrondi supérieur de la hauteur divisée par 3). On multiplie ensuite le nombre de niveau par la surface au sol. $S_{pl\ tot} = \sum_i \left(arrondi\ supérieur \left(\frac{h_{bat\ i}}{3} \right) \times S_{sol\ i} \right)$	IGN BD Topo
S_pl_com (m²)	Surface de plancher des bâtiments commerciaux dans la maille	Somme des surfaces de plancher des bâtiments commerciaux dans la maille.	IGN BD Topo
S_pl_tot (m²)	Surface de plancher des bâtiments de tous les types dans la maille	Somme des surfaces de plancher des bâtiments de tous les types dans la maille.	IGN BD Topo
S_pl_moy_B (m²)	Surface de plancher moyenne par bâtiment	Cet indicateur calcule la surface de plancher moyenne des bâtiments dans la maille.	IGN BD Topo
Spl_bl_moy (m²)	Surface de plancher moyenne par bloc de bâtiment	Cet indicateur calcule la surface de plancher moyenne des blocs dans la maille.	IGN BD Topo
Dens_N_bat (/) (6), (8)	Densité nette des bâtiments	La densité nette du bâtiment se définie comme sa surface de plancher divisée par sa surface au sol : $Dens_{N\ bat\ i} = \frac{S_{pl\ i}}{S_{sol\ i}}$ Sur la maille, on fait une moyenne des densités nettes des bâtiments pondérées par la surface au sol des bâtiments : $Dens_{N\ bat} = \frac{\sum_i (Dens_{N\ bat\ i} \times S_{sol\ i})}{\sum_i S_{sol\ i}}$	IGN BD Topo
Dens_N_EcTy (/)	Écart type des densités nettes des bâtiments	Cet écart type est calculé sur la moyenne ci-dessus.	IGN BD Topo

Désignation	Indicateur	Définition / Calcul	Base de données
S_env_ext (m²)	Surface d'enveloppe extérieure des bâtiments chauffés	Cet indicateur détermine la surface d'enveloppe verticale extérieure des bâtiments résidentiels, de bureaux et de commerces (somme de tous les bâtiments de maille). Notons qu'il est sous-estimé en ville puisqu'il ne compte pas les surfaces d'enveloppe extérieures résultants d'une différente de hauteur entre deux bâtiments mitoyens.	IGN BD Topo
Comp_bat (/) (2), (3), (7), (9)	Coefficient de compacité des bâtiments	La compacité d'un bâtiment est calculée comme suit : $Comp_{bat\ i} = \frac{Surface\ d'enveloppe\ bati\ (mur + toit)}{(Volume\ bati)^{2/3}} = \frac{S_{env\ ext\ i} + S_{sol\ i}}{(S_{sol\ i} \times h_{bat\ i})^{2/3}}$ Sur la maille, on fait une moyenne des compacités des bâtiments pondérées par la surface au sol des bâtiments : $Comp_{bat} = \frac{\sum_i (Comp_{bat\ i} \times S_{sol\ i})}{\sum_i S_{sol\ i}}$	IGN BD Topo
Comp_EcTy (/)	Écart type des compacités des bâtiments	Cet écart type est calculé sur la moyenne ci-dessus.	IGN BD Topo
Comp_bloc (/)	Coefficient de compacité des blocs	Cet indicateur calcule la compacité des blocs. $Comp_{bloc\ i} = \frac{Surface\ d'enveloppe\ bloc\ (mur + toit)}{(Volume\ bloc)^{2/3}}$ Sur la maille, on fait une moyenne des compacités des blocs pondérées par la surface au sol des bâtiments : $Comp_{bloc} = \frac{\sum_i (Comp_{bloc\ i} \times S_{sol\ i})}{\sum_i S_{sol\ i}}$	IGN BD Topo
S_cours (m²)	Surface moyenne des cours	Dans les blocs possédant une ou plusieurs cours on mesure la surface de cette cours.	IGN BD Topo

Désignation	Indicateur	Définition / Calcul	Base de données
Ouv_cours (/)	Coefficient d'ouverture des cours	Afin de caractériser de manière simple la forme des cours on crée un indicateur « Coefficient d'ouverture des cours ». La sensation d'ouverture d'une cours dépend : - De la surface de la cours (+) - Du périmètre de la cours (-) - De la hauteur du bâti (-) On calcule donc le coefficient ainsi : $$Ouv_cours = \frac{S_{cours}}{h_{bat\ i} \times Périmètre_{cours}}$$ Sur la maille, on fait une moyenne des coefficients d'ouverture pondérés par la surface au sol des blocs.	IGN BD Topo
Cont_bat (/) (2), (7)	Coefficient de contigüité des bâtiments	La contigüité d'un bâtiment est calculée comme la surface de murs mitoyens sur la surface de murs totale. $$Cont_{bat\ i} = \frac{S_{env\ tot} - S_{env\ ext}}{S_{env\ tot}}$$ Sur la maille, on fait une moyenne des contiguïtés des bâtiments pondérées par la surface au sol des bâtiments : $$Cont_{bat} = \frac{\sum_i (Cont_{bat\ i} \times S_{sol\ i})}{\sum_i S_{sol\ i}}$$	IGN BD Topo
Cont_EcTy (/)	Écart type des contiguïtés des bâtiments	Cet écart type est calculé sur la moyenne ci-dessus.	IGN BD Topo
Orient_bat (°) (7)	Orientation des bâtiments	Il s'agit de l'orientation en degré des façades par rapport au Nord : 90° ou - 90° = un bâtiment orienté Est – Ouest ; 45 ° = un bâtiment orienté Sud/Est – Nord/Ouest ; - 45 ° = un bâtiment orienté Sud/Ouest – Nord/Est ; 0° ou - 0° = = un bâtiment orienté Nord – Sud. Sur la maille, on fait une moyenne des orientations des bâtiments pondérées par la surface au sol des bâtiments. Notons que cette orientation n'est pas significative puisqu'elle calcule l'orientation de portions de bloc, ne tenant pas compte des effets de mitoyenneté. On privilégiera l'orientation des blocs.	IGN BD Topo

Désignation	Indicateur	Définition / Calcul	Base de données
Orien_EcTy (°)	Écart type des orientations des bâtiments	Cet écart type est calculé sur la moyenne ci-dessus.	IGN BD Topo
Orient_bl (°)	Orientation des blocs	Il s'agit de l'orientation en degré des façades par rapport au Nord : 90° ou - 90° = un bâtiment orienté Est – Ouest ; 45 ° = un bâtiment orienté Sud/Est – Nord/Ouest ; - 45 ° = un bâtiment orienté Sud/Ouest – Nord/Est ; 0° ou - 0° = = un bâtiment orienté Nord – Sud. Sur la maille, on fait une moyenne des orientations des bâtiments pondérées par la surface au sol des bâtiments.	IGN BD Topo
Z_moy (m)	Altitude des bâtiments	Moyenne dans une maille des altitudes données par la BD topo au prorata de la surface au sol du bâtiment. Il s'agit de l'altitude du toit médiane calculée, en prenant en compte les altitudes des contours des bâtiments.  $Z_{moy} = \frac{\sum_i (Z_i \times S_{sol\ i})}{S_{sol\ tot}}$	IGN BD Topo
Nbbat_bloc	Nombre de bâtiment par bloc	Nombre de bâtiment par bloc	IGN BD Topo
Age_maj (5), (7)	Age majoritaire	La base de données INSEE nous donne le nombre de logement par IRIS et par tranche d'âge : avant 1949, de 1949 à 1974, de 1975 à 1989, de 1990 à 2004 et de 2005 à 2007. Nous avons répartit ce nombre de bâtiments par maille, au prorata de la surface de chaque maille se superposant à un IRIS donné. On choisi d'attribuer à la maille l'âge moyen de la tranche présente en majorité : Avant 1949 → 1930 De 1949 à 1974 → 1962 De 1975 à 1989 → 1982 De 1990 à 2004 → 1997 De 2005 à 2007 → 2006	IRIS + Données INSEE

Désignation	Indicateur	Définition / Calcul	Base de données
Usage (9)	Usage du bâtiment	Les usages peuvent être : - Résidentiel - Bureau - Commercial - Industriel - Agricole	IGN BD Topo + IRIS + Données INSEE
Coll_Ind (5), (8)	Pourcentage de collectif et d'individuel	La base de données INSEE nous donne le nombre de logement par IRIS et par type : - Individuel - Collectif Nous avons répartit ce nombre de bâtiments par maille, au prorata de la surface de chaque maille se superposant à un IRIS donné. L'indicateur « Pourcentage de collectif et d'individuel » permet d'évaluer le rapport de logements collectifs par rapport aux logements individuels : $Coll_Ind = \frac{nombre\ de\ logements\ collectifs}{nombre\ total\ de\ logements}$	IRIS + Données INSEE
Chauffage (/) (7)	Type de chauffage majoritaire	La base de données INSEE nous donne le nombre de logement par IRIS et par type de chauffage entre 4 possibilités : - chauffage central collectif (pour la totalité ou la plus grande partie de l'immeuble, pour un groupe d'immeubles ou par l'intermédiaire d'une compagnie de chauffage urbain) ; - chauffage central individuel (chaudière propre au logement) ; - chauffage individuel "tout électrique" ; - autre : poêle, cheminée, cuisinière... Nous avons répartit ce nombre de logement par maille, au prorata de la surface de chaque maille se superposant à un IRIS donné.	IRIS + Données INSEE

Désignation	Indicateur	Définition / Calcul	Base de données
Voit_men (/)	Nombre de voiture personnelle par ménage	La base de données INSEE nous donne le nombre de ménage par IRIS disposant soit : - D'une seule voiture - De deux voiture ou plus. Sont comptabilisées l'ensemble des voitures à la disposition des habitants de la résidence principale (ménage), à l'exception de celles à usage exclusivement professionnel. On calcule une valeur approchée du nombre de voiture dans chaque maille au prorata de la surface bâtie. On divise ensuite par le nombre de ménage dans la maille.	IRIS + Données INSEE
Axe : espaces publics			
S_Route (m²)	Surface de route	On calcule la surface de route sur la maille. Celle-ci est obtenue à partir des polylignes qui représentent les routes dans la BD Topo de l'IGN. On crée un espace tampon autour de ces polylignes avec pour épaisseur la largeur des routes (donnée attributaire de la BD Topo).	IGN BD Topo
Dens_route (/) (2), (3), (4), (5), (8), (9)	Densité surfacique de route	La densité surfacique de route correspond à la surface de route sur la surface de la maille.	IGN BD Topo
S_tr (m2) (9)	Surface de trottoirs et parking	Pour prendre en compte les surfaces imperméabilisées dédiées aux trottoirs et au stationnement on prend en compte un ratio de deux mètres par mètre linéaire de voirie.	IGN BD Topo
Angle_moy (°)	Direction moyenne des routes	Il s'agit de l'orientation en degré des routes par rapport au Nord : - 90° ou – 90° = route dirigée Nord – Sud - 45 ° = route dirigée Sud/Ouest – Nord/Est - - 45 ° = route dirigée Sud/Est – Nord/Ouest - 0° ou – 0° = route dirigée Est – Ouest Sur la maille, on fait une moyenne des angles des routes pondérés par leur longueur. Notons que cet effet de moyenne fausse les résultats. Il aurait était plus juste de calculer l'orientation majoritaire des rues dans une maille mais il n'existe pas, à notre connaissance, d'outil permettant ce calcul dans ArcGIS.	IGN BD Topo

Désignation	Indicateur	Définition / Calcul	Base de données
Angle_EcTy (°) (2)	Écart type des directions des routes	Cet écart type est calculé sur la moyenne ci-dessus. Il caractérise la sinuosité de la voirie.	IGN BD Topo
Long_Route (m)	Longueur route	Cette longueur correspond à la somme des longueurs des brins de route se trouvant dans la maille.	IGN BD Topo
Larg_Route (m) (2), (5), (6)	Largeur moyenne des routes	Moyenne dans une maille des largeurs données par la BD topo au prorata de la longueur des routes. $Larg_{Route} = \frac{\sum_i (Larg_{Route\ i} \times Long_{Route\ i})}{\sum_i Long_{Route\ i}}$	IGN BD Topo
Larg_EcTy (m)	Écart type des largeurs des routes	Cet écart type est calculé sur la moyenne ci-dessus.	IGN BD Topo
Axe : Découpage foncier			
Dens_parce (parcelles/m²) (9)	Densité de parcelles	Il s'agit du nombre de parcelles divisé par la surface de la maille.	IGN BD Topo
Axe : Insertion dans le tissu urbain			
NbBat_Mail (/) (8)	Nombre de bâtiment par maille	Comptabilise le nombre de bâtiments par maille.	IGN BD Topo
Dens_br (/) (2), (3), (4), (6), (9)	Densité bâtie brute de la maille	La densité bâtie brute de la maille se définie comme la surface de plancher divisée par la surface de la maille : $Dens_{br} = \frac{S_{pl\ tot}}{S_{maille}}$	IGN BD Topo
CES (/) (2), (5), (6), (7), (9)	Coefficient d'emprise au sol	Le coefficient d'emprise au sol se défini comme la surface au sol des bâtiments divisée par la surface de la maille : $CES = \frac{S_{sol\ tot}}{S_{maille}}$	IGN BD Topo
S_veg (/)	Surface végétalisée	La surface végétalisée se calcule grâce à la BD Topo de l'IGN en prenant en compte les espaces verts et les stades. Sont pris en compte : - Les bois de plus de 500m² - Les forêts, landes, vignes et vergers de plus de 5000m². - De manière non exhaustive, sont également pris en compte les réseaux denses de haies, les rangées d'arbres, les bosquets et les arbres isolés en zone urbaine et en zone de végétation clairsemée. L'emprise des arbres est prise en compte (surface planimétrique de la projection verticale des houppiers des arbres).	IGN BD Topo
Dens_veg (/) (2), (3), (4), (6), (7), (8), (9)	Densité surfacique de végétation	La densité surfacique de végétation correspond à la surface végétalisée sur la surface de la maille.	IGN BD Topo

Désignation	Indicateur	Définition / Calcul	Base de données
Dens_eau (/) (3)	Densité d'eau	La densité surfacique d'eau correspond aux surfaces en eau sur la surface de la maille.	IGN BD Topo
Dist_Centr (m)	Distance au centre de la commune	Il s'agit de la distance de la maille au centre de la commune sur laquelle elle se trouve. Il s'agit du centre géométrique de chaque commune, et non du centre administratif ou commercial : cela diminue la pertinence de cet indicateur. De plus, il aurait été intéressant de prendre en compte le polycentrisme des communes et de pondérer cet indicateur par l'attractivité du(des) centre(s).	IGN BD Topo
Nb_habitan (/)	Nombre d'habitant par maille	La base de données INSEE nous donne le nombre d'habitant par IRIS. Nous avons réparti ce nombre d'habitant par maille, au prorata de la surface de plancher de bâtiment de chaque maille se superposant à un IRIS donné.	IRIS + Données INSEE
Nb_menage (/)	Nombre de ménage par maille	La base de données INSEE nous donne le nombre de ménage par IRIS. Nous avons réparti ce nombre de ménage par maille, au prorata de la surface de plancher de bâtiment de chaque maille se superposant à un IRIS donné.	IRIS + Données INSEE
D_hab_N (hab/m²)	Densité d'habitants nette (par m² bâti)	On divise le nombre d'habitant par maille par la surface de plancher dans la maille pour obtenir une valeur approchée de la densité de population nette.	IRIS + Données INSEE
D_hab_br (hab/m²) (1), (2), (6), (9)	Densité d'habitants brute (par m² de maille)	On divise le nombre d'habitant par maille par la surface de la maille pour obtenir une valeur approchée de la densité de population brute.	IRIS + Données INSEE
D_hab_mail	Densité d'habitants approchée	Nous avons réparti le nombre d'habitant par maille, au prorata de la surface de maille se superposant à un IRIS donné. Il s'agit d'une valeur approchée destinée a déterminer l'usage de chaque maille (voir chapitre 2.5.1).	IRIS + Données INSEE

2.3.4. Calcul des paramètres

Afin de calculer les valeurs des paramètres, nous utilisons le logiciel ArcGIS. Ce logiciel commercial développé par ESRI est, avec MapInfo, le plus utilisé au niveau mondial. Cette suite logicielle s'organise autour du logiciel ArcMap. Elle permet d'afficher des données sur une carte ou en trois dimensions, de gérer et d'intégrer des données, de réaliser des analyses, d'automatiser des traitements soit en ligne de commande soit via des routines de calcul appelées « ArcToolbox » (ESRI, 2013). Bien qu'il existe un grand nombre de logiciels ayant des fonctionnalités similaires (voir Tableau 23), nous avons sélectionné ArcGIS pour la facilité d'y créer des routines de calcul sans apprendre de langage informatique spécifique. En effet, les « ArcToolbox » sont constituées de différents outils pré-codés que l'on va relier les uns aux autres par des flux de données (voir Figure 79).

Tableau 23 : Comparaison non exhaustive de logiciels SIG - réinterprétation d'après (Koussa, 2011)

Logiciel	Fonctions	Difficulté	Données	Diffusion
ArcGIS	- afficher des données sur une carte - gérer et intégrer des données - réaliser des analyses - automatiser des traitements en créant des routines de calcul ou en créant des "toolbox" - accéder à une large communauté de développeurs	+	Raster / Vecteur	Commerciale
AutoCAD Map 3D	- afficher des données sur une carte - gérer et intégrer des données - réaliser des analyses -	+	CAO raster vecteur 2D et 3D	Commerciale
GRASS	- afficher des données sur une carte - gérer et intégrer des données - réaliser des analyses - automatiser des traitements - accéder à une communauté de développeurs	+++	Raster / Vecteur	Libre
Q-GIS	- afficher des données sur une carte - gérer et intégrer des données - réaliser des analyses - automatiser des traitements - accéder à une communauté de développeurs	+++	Raster / Vecteur	Libre

Logiciel	Fonctions	Difficulté	Données	Diffusion
Mapinfo	- afficher des données sur une carte - gérer et intégrer des données - réaliser des analyses - automatiser des traitements - accéder à une large communauté de développeurs	+	Raster / Vecteur	Commerciale
OrbisGIS	- afficher des données sur une carte - gérer et intégrer des données - réaliser des analyses - automatiser des traitements - accéder à une communauté de développeurs	++	Raster / Vecteur	Libre
WinSTAR	- afficher des données sur une carte - Acquisition, structuration, intégration et maintenance de données vectorielles afin d'élaborer des modèles complexes réaliser des analyses, - automatiser des traitements	+++	Raster / Vecteur	Commerciale

Les routines de calcul d'ArcGIS vont permettent de mailler le territoire d'étude (maille de 250 mètres par 250 mètres) et de calculer les indicateurs pour chaque maille.

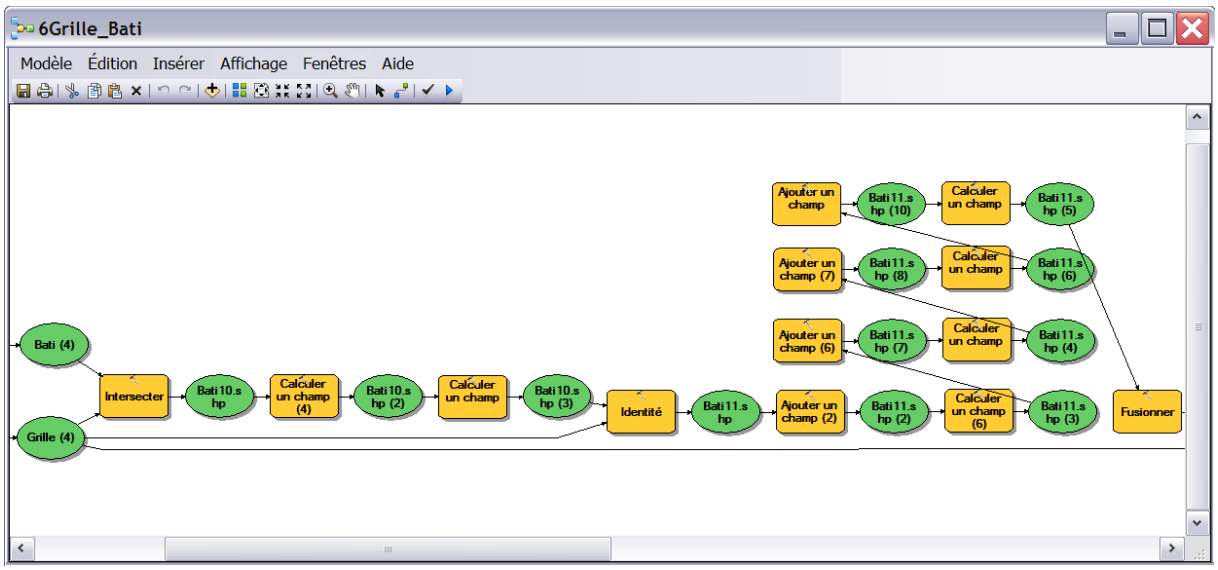


Figure 79 : Exemple de Toolbox

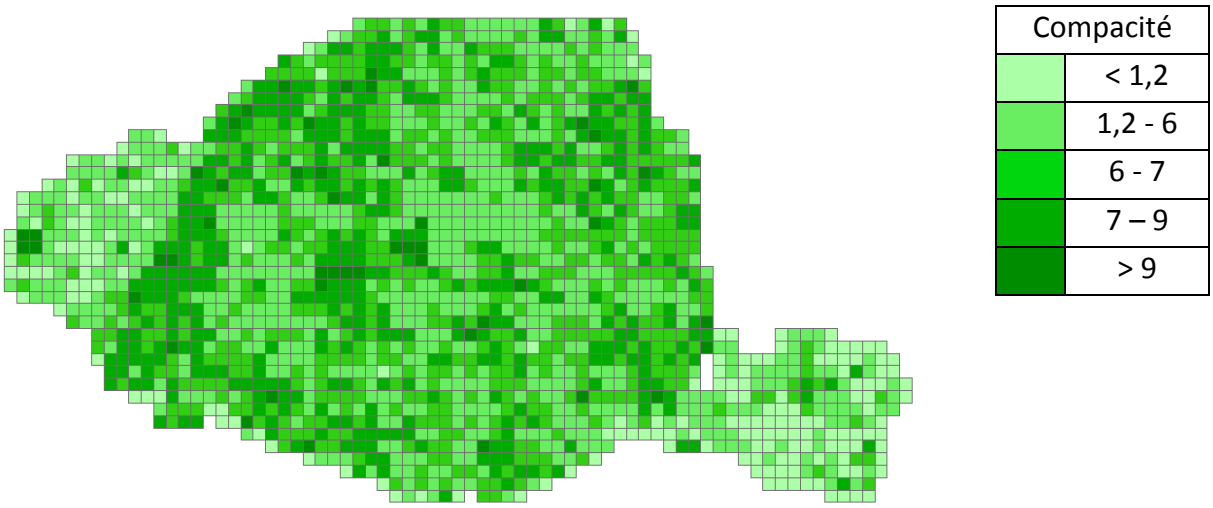


Figure 80 : Exemple du calcul de paramètre « compacité » pour un maillage de 250 mètres pas 250 mètres de la commune de Paris (illustration de l'auteur)

2.4. Classification automatique des mailles

2.4.1. Identification préalable

Certains indicateurs calculés nous permettent d'identifier directement une partie des quartiers types.

Tout d'abord, les bâtiments industriels, agricoles et commerciaux sont déjà identifiés dans la base de données IGN. On considèrera qu'un quartier est de type « bâtiment d'activités » lorsque l'emprise au sol des bâtiments industriels, agricoles et commerciaux est supérieure à 0,6 fois l'emprise au sol des autres types de bâtiment.

On identifie également les immeubles de grande hauteur comme les quartiers où la hauteur moyenne des bâtiments est supérieure à 30 mètres. En effet, aucune autre typologie ne dépasse cette hauteur.

Pour finir, on considèrera que les mailles où le coefficient d'emprise au sol est inférieur à 0,05 sont non bâties.

Par la suite, ces trois types de mailles sont écartés afin de ne pas surcharger l'analyse statistique. La classification portera donc sur les cinq types de quartiers restant : pavillons discontinus ou continus, immeubles discontinus ou continus et centre ancien.

2.4.2. Les différentes méthodes de classifications

La classification est une discipline issue des statistiques qui vise à regrouper entre eux des objets similaires (dans notre cas, des quartiers) en un certain nombre de classes aussi homogènes que possibles. Ces objets sont caractérisés par un certain nombre de variables* qui peuvent être quantitatives ou qualitatives (Carpentier, 2012).

On distingue généralement dans la littérature quatre familles de classification (Carpentier, 2012). La Figure 81 reprend les principales méthodes retenues.

Premièrement, la classification non hiérarchique conduit à la décomposition de l'ensemble des individus en un nombre de classes prédéterminées.

* Voir glossaire

Deuxièmement, la classification hiérarchique consiste à fournir un ensemble de partitions en classes de plus en plus nombreuses obtenues par regroupements successifs de parties.

Troisièmement, l'analyse exploratoire - sans être une méthode de classification à proprement parler - permet de réaliser des classifications. Ce champ des statistiques a pour but de résumer l'information contenue dans les données de façon synthétique et permet de dégager les caractéristiques essentielles du phénomène étudié (par exemple l'appartenance à une classe ou à une autre).

Finalement, on distinguera de ces trois méthodes les méthodes d'analyse dites non linéaires (car les outils mathématiques utilisés ne sont pas linéaires), bien que celles-ci se basent sur des principes de classification similaires. Les méthodes de classification non linéaires comptent principalement les réseaux neuro-mimétiques ou réseaux de neurones.

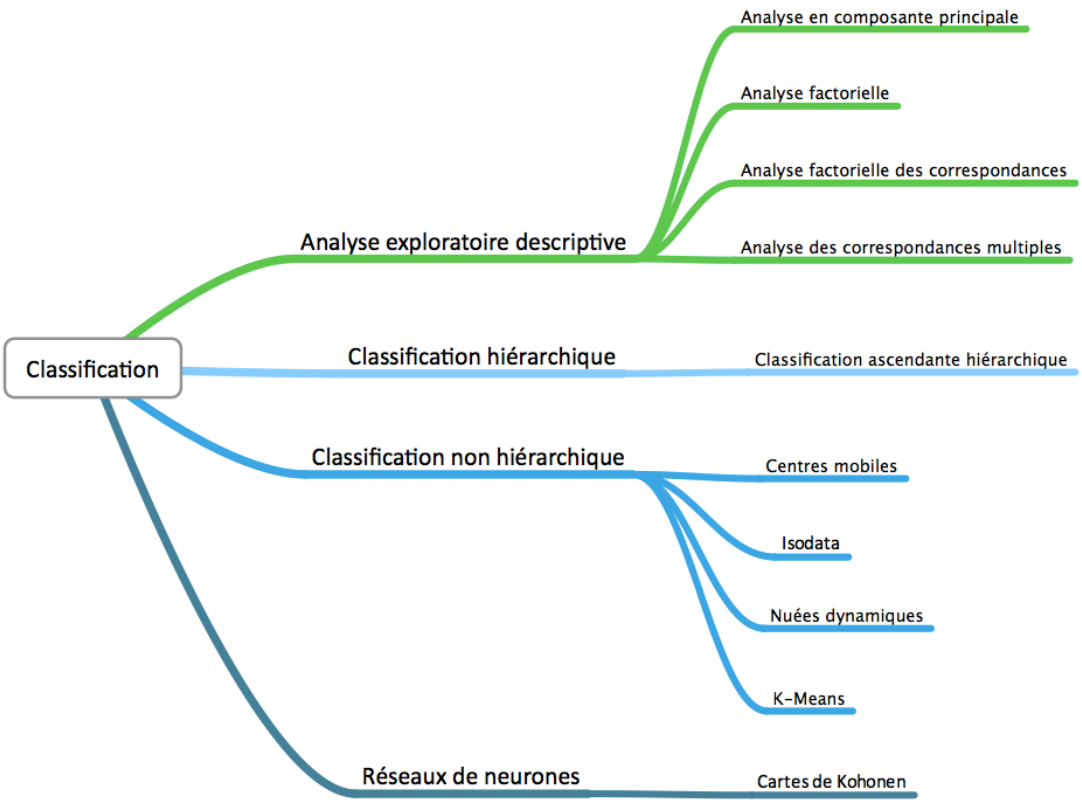


Figure 81 : Différentes méthodes de classification automatiques (illustration de l'auteur)

Critère de choix de la méthode

Le choix de la méthode dépend grandement du type d'observations. Dans notre cas, nous étudions une quarantaine de variables quantitatives (les paramètres morphologiques)

calculées pour 160 000 individus (les 160 000 mailles qui composent notre carte). Ce très grand nombre d'individus sera une contrainte forte pour la classification.

Par ailleurs, nous souhaitons retrouver la typologie urbaine identifiée précédemment. Nous aimerions donc pouvoir déterminer par avance le nombre de classes à obtenir. Ainsi, notre position est de privilégier l'expertise urbaine à la proximité statistique.

Analyse en composante principale (ACP)

Parmi les méthodes d'analyse exploratoire destinées à la classification, la plus utilisée est l'analyse en composante principale (ACP). Cette analyse a pour objectif premier de réduire le nombre de variables observées. On va ainsi passer d'un grand nombre de variables corrélées les unes aux autres à un nombre plus faible de facteurs non corrélés (c'est à dire les composantes principales). On pourra ensuite observer les individus grâce à leur coordonnées sur les composantes principales et réaliser plus facilement une classification (Bailey, 1994; Dunteman, 1989).

Étapes de la méthode :

1. Pour éliminer les effets dus aux choix d'unités, les différentes variables sont centrées et réduites*.
2. Les distances euclidiennes entre les individus sont mesurées.
3. On recherche alors la direction dans laquelle le nuage de points est le plus dispersé : cette direction est le premier axe principal, et l'inertie (dispersion) le long de cet axe est la valeur propre associée à cet axe.
4. On projette alors les points dans le sous-espace orthogonal au premier axe principal, et on cherche de nouveau la direction de plus grande dispersion du nuage projeté. On obtient ainsi le deuxième axe principal, et la seconde valeur propre.
5. On poursuit la méthode, jusqu'à ce que l'essentiel de l'inertie du nuage de points ait été prise en compte.
6. On projette les individus sur le nombre d'axes sélectionnés et on observe si des classes se distinguent dans cette représentation simplifiée (voir Figure 82).

* Voir glossaire

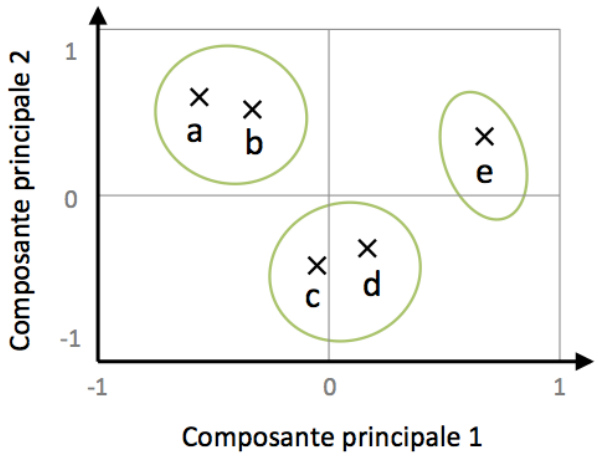


Figure 82 : Principe de la classification par ACP sur deux axes (illustration de l'auteur)

Cette méthode peut être appliquée à notre classification. Nous la retenons donc pour la suite.

Analyse factorielle

Comme l'ACP, l'analyse factorielle s'applique à des individus caractérisés par un certain nombre de variables continues. Cependant, l'analyse factorielle porte plus sur les variables en elles-mêmes que sur les individus. Elle permet notamment de décomposer les variables en un nombre prédéterminé de facteurs (ou variables non observables). L'objectif est d'expliquer les corrélations entre les variables initiales par un minimum de facteurs (Carpentier, 2012; Lawley & Maxwell, 1962; Mardia, Kent, & Bibby, 1980).

Ce n'est pas l'objectif de notre étude, on écarte donc l'analyse factorielle des méthodes à tester.

Analyse factorielle des correspondances (AFC)

L'analyse factorielle de correspondance (AFC) est une méthode d'analyse qui s'applique aux tableaux de contingences. Un tableau de contingence se construit en considérant deux variables nominales X et Y, comportant respectivement p et q modalités. A partir des valeurs de ces deux variables pour une population, on peut construire un tableau de contingence à p lignes et q colonnes donnant les effectifs observés pour chaque combinaison d'une modalité i de X et d'une modalité j de Y.

A partir des fréquences de ces modalités, l'analyse factorielle de correspondance sert à déterminer et à hiérarchiser toutes les dépendances entre les lignes et les colonnes du

tableau. Comme toutes les analyses factorielles, l'information est rassemblée en un nombre réduit de facteurs. Les individus comme les variables peuvent alors être représentés dans un espace commun. In fine, cette méthode peut permettre de regrouper les individus en fonction des correspondances observées entre les deux variables (Carpentier, 2012; Escofier & Pagès, 2008).

Cette méthode n'est cependant pas applicable à notre étude car nous avons bien plus de deux variables et que ces variables sont continues.

Analyse des correspondances multiples (ACM)

Comme nous venons de le voir, l'analyse factorielle des correspondances ne s'applique qu'à des situations où les individus statistiques sont décrits par deux variables nominales. L'analyse des correspondances multiples (ACM) a donc été proposée comme une extension de l'AFC. Le principe est similaire puisque on s'intéresse à la répartition d'une population entre les combinaisons possibles de chaque modalité ainsi qu'aux similitudes et aux oppositions entre ces combinaisons. La méthode permet ensuite de rassembler l'information en un nombre réduit de facteurs et de représenter les individus comme les variables dans un espace commun (Carpentier, 2012).

Cette méthode n'est cependant pas applicable à notre étude car nous avons beaucoup de variables et que ces variables sont continues. Il y aurait donc presque autant de combinaisons que d'individus.

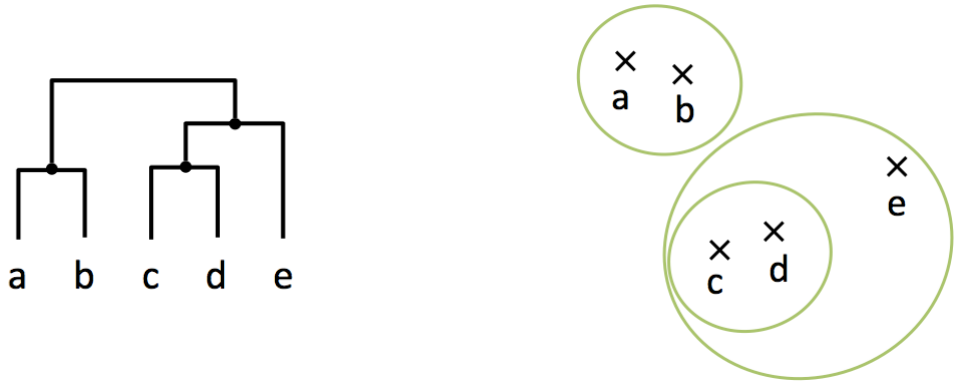
Classification ascendante hiérarchique

Ce type de méthode consiste à déterminer un ensemble de partitions des individus statistiques en classes de plus en plus nombreuses obtenues par regroupements successifs de parties (Lebart, Morineau, & Piron, 1995).

Étapes de la méthode :

1. Pour éliminer les effets dus aux choix d'unités, les différentes variables sont centrées et réduites.
2. Les distances euclidiennes entre les individus sont mesurées.
3. Parmi les n individus de la population, on regroupe d'abord les deux individus les plus proches qui forment un nouveau sommet.
4. Il ne reste plus que $(n - 1)$ objets et on itère le processus jusqu'à un regroupement complet. Les résultats sont souvent présentés sous la forme de dendrogrammes.

5. On sélectionne finalement le nombre judicieux de classes en fonction des inerties inter-classe et intra-classes en « coupant » le dendrogramme.



dendrogramme Distances euclidiennes

Figure 83 : Principe de la classification ascendante hiérarchique (illustration de l'auteur)

Cette méthode ne permet pas de choisir a priori le nombre de classes souhaité. C'est donc un inconvénient pour notre étude. De plus, en présence d'un grand nombre d'individus (plus de mille), il est impossible d'utiliser directement les méthodes de classification hiérarchique. Nous ne retiendrons donc pas cette méthode.

Méthode des centres mobiles

On cherche comme précédemment à réaliser une partition d'un ensemble d'individus caractérisés par des variables numériques. La méthode des centres mobiles permet de regrouper ces individus en un nombre déterminé k de classes de manière à ce que chaque individu appartienne à une classe et une seule (Carpentier, 2012; Lebart et al., 1995).

Étapes de la méthode :

1. Pour éliminer les effets dus aux choix d'unités, les différentes variables sont centrées et réduites.
2. On fixe de façon aléatoire k centres de classes (ou centres de gravité).
3. Les distances euclidiennes entre les individus et ces centres de gravité sont mesurées.
4. Chaque individu est attribué à l'une des k classes en fonction de sa proximité au centre de gravité de cette classe.
5. Chaque centre de gravité est déplacé de façon à être au centre du groupe correspondant qui vient d'être formé.

6. On répète les étapes 3 à 5 jusqu'à ce que l'algorithme converge (c'est à dire jusqu'à ce que les centres de gravité ne bougent plus ou que l'inertie intra-classe soit satisfaisante) ou jusqu'à ce qu'un nombre prédéterminé d'itérations ait eu lieu.

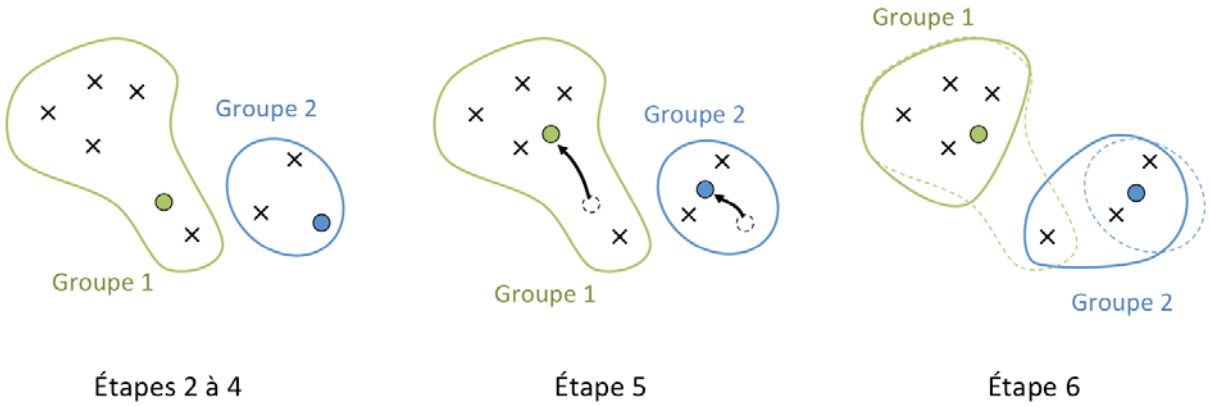


Figure 84 : Principe de la méthode des centres mobiles (illustration de l'auteur)

Isodata

Le principe est le même que celui des centres mobiles. En complément, un certain nombre de contraintes sont imposées pour empêcher la formation de classes d'effectifs trop faibles ou de diamètre trop grand (Ball & Hall, 1965).

Nuées dynamiques

Le principe est très proche de celui des centres mobiles à l'exception du fait que l'on attribue à une classe un représentant différent de son centre de gravité. Ce représentant sera un noyau de points constitué d'éléments représentatifs de la classe de manière à corriger l'influence d'éventuelles valeurs extrêmes sur le calcul du centre de gravité (E. Diday, Celeux, Govaert, Lechevallier, & Ralambondrainy, 1989; Edwin Diday, 1982).

K-mean

Le principe est également le même que celui des centres mobiles si ce n'est que l'on effectue un recentrage dès qu'un objet change de classe. L'algorithme est ainsi plus rapide, mais le choix aléatoire des k centres initiaux n'est pas neutre. Ainsi, plusieurs simulations successives pourrons donner des résultats légèrement différents (MacQueen, 1967).

Parmi les méthodes du type « centres mobiles », celle-ci semble la plus adaptée au très grand nombre d'individus statistiques que nous traitons.

Réseaux de neurones - Les cartes de Kohonen

La méthode de classification des cartes de Kohonen est issue des méthodes de type « réseaux de neurones artificiels ». Les réseaux de neurones sont des méthodes d'apprentissage cherchant à imiter le fonctionnement des neurones dans le cerveau humain. Un neurone biologique utilise des dendrites pour rassembler des données issues d'autres neurones. Il les combine et produit un signal qui va constituer une nouvelle donnée pour d'autres neurones. Par mimétisme, un neurone formel recueille des données (variables). Ces données d'entrée sont combinées pour produire une réponse envoyée à d'autres neurones. Un réseau de neurones formel fonctionne comme un réseau neuronal biologique : il est constitué de plusieurs couches de neurones qui échangent entre elles.

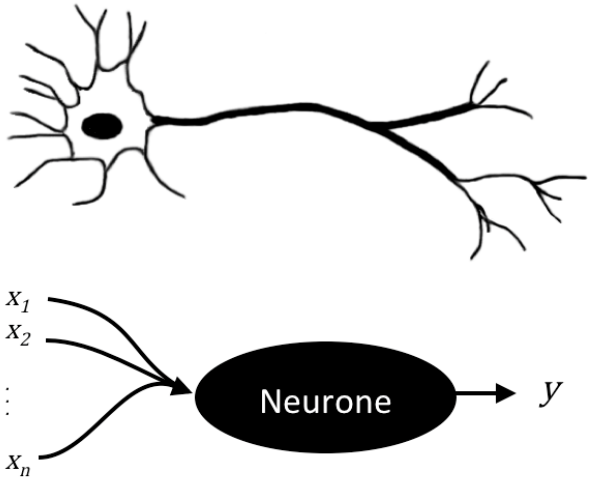


Figure 85 : Schéma d'un neurone réel et d'un neurone formel (illustration de l'auteur d'après (Larose, 2005))

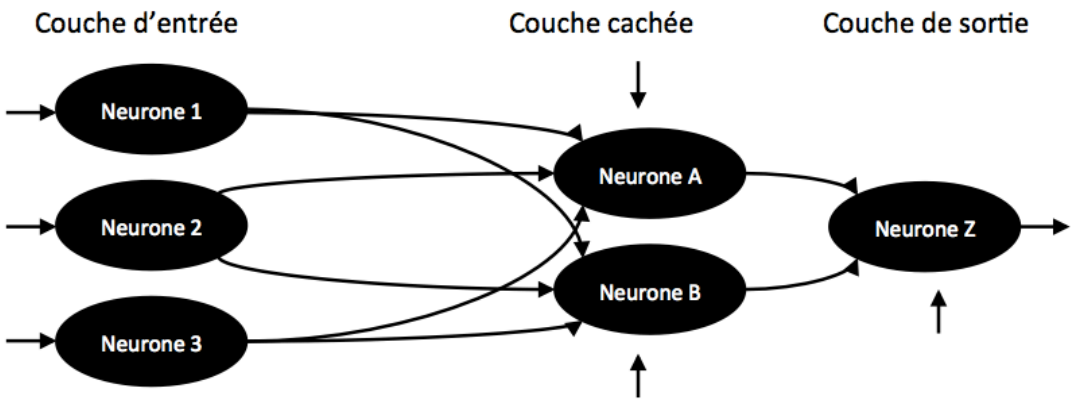


Figure 86 : Exemple d'un petit réseau de neurones (illustration de l'auteur d'après (Larose, 2005))

Les réseaux de Kohonen sont des petits réseaux de neurones constitués de deux couches. Dans la couche d'entrée, les neurones correspondent aux variables décrivant les observations. La couche de sortie, elle, est organisée sous forme de grille (ou carte) de neurones à deux dimensions. Chaque neurone représente un groupe d'observations similaires. L'objectif est de produire un regroupement de manière à ce que les individus situés dans la même case soient semblables, les individus situés dans des cases différentes soient différents. Le réseau de Kohonen est donc une technique de classification automatique. Par ailleurs, les neurones de la couche de sortie sont organisés de manière à ce que deux cellules adjacentes dans la grille correspondent à des groupes d'observations proches dans l'espace de représentation initial. On parle de cartes auto organisatrices (SOM : Self Organisation Map) (Larose, 2005).

La méthode des cartes de Kohonen ne permet pas de déterminer un nombre exact de classes mais un nombre maximal de classes. Cette méthode est particulièrement adaptée pour les fichiers comportant un grand nombre d'observations, elle semble donc intéressante pour notre classification.

2.4.3. Méthodes de classification automatique retenues

Choix de la méthode

En nous basant sur le chapitre précédent, les trois méthodes que nous avons retenues sont : l'analyse en composante principale, la méthode des k-means et les cartes de Kohonen.

Tableau 24 : Récapitulatif des méthodes de classification automatiques

Méthode	Variables continues	Grands nombre d'individus	Choix du nombre de classes
Analyse en composante principale	OK	OK	OK
Analyse factorielle	OK	OK	-
Analyse factorielle des correspondances	Non	OK	OK
Analyse des correspondances multiples	Non	Non	OK
Classification ascendante hiérarchique	OK	Non	Non
Centres mobiles et dérivées (Isodata, Nuées dynamiques et k-means)	OK	OK	OK surtout pour k-means
Réseaux de neurones	OK	OK	OK

Choix du logiciel de traitement des données statistiques

Le Tableau 25 ci-après regroupe la majorité des logiciels de traitement de données statistiques. Ils ont été classés par Tufféry en trois familles en fonction du volume de données qu'ils sont susceptibles de traiter (Tufféry, 2010). Parmi ces logiciels majoritairement commerciaux, TANAGRA et R sont gratuits et ont tous les deux l'avantage de proposer plusieurs algorithmes adaptés à notre sujet. Cependant, tant sur le volume de données que sur la facilité de prise en main, TANAGRA est plus adapté à notre travail.

Nous avons donc choisi d'utiliser ce logiciel pour réaliser les différentes analyses et classifications. Il s'agit d'un logiciel gratuit et librement téléchargeable de traitement des données développé par Rakotomalala à l'Université Lyon II et qui regroupe la majorité des méthodes de classifications automatiques (Rakotomalala, 2005).

Le détail des trois méthodes de classification est présenté en annexe 4. Les chapitres suivants en présentent les résultats essentiels ainsi que l'analyse.

Tableau 25 : Principaux logiciels de statistique et de traitement des données (Tufféry, 2010)

Volume de données	Produit	Spécialité *	Éditeur
Faible (dizaines de milliers d'enregistrements)	NeuralWorks Predict	Réseaux de neurones	Neuralware
	NeuroOne	Réseaux de neurones	Netral
	Wizwhy	Associations	Wizsoft
	WEKA		« open source » (Université de Waikato, Nouvelle-Zélande)
	R		« open source » (initialement à l'Université d'Auckland)
	DataLab	Prétraitement des données	Complex Systems
Moyen (centaines de milliers d'enregistrements)	Alice	Arbres de décision	Isoft
	KnowledgeSEEKER	Arbres de décision	Angoss
	KnowledgeSTUDIO		Angoss
	C5.0 (Unix) See5 (Windows)	Arbres de décision	RuleQuest Research
	Data Mining Suite		Salford Systems
	CART	Arbres de décision	Salford Systems
	Polyanalyst		Megaputer
	TANAGRA		Université de Lyon
	JMP		SAS
	S-PLUS		TIBCO Software
Élevé (millions d'enregistrements)	KXEN		KXEN
	Oracle Data Mining		Oracle
	SPAD		Coheris SPAD
	IBM SPSS Statistics		SPSS (groupe IBM)
	IBM SPSS Modeler		SPSS (groupe IBM)
	Statistica Data Miner		Statsoft
	Insightful Miner		TIBCO Software
	SAS/STAT		SAS
	Entreprise Miner		SAS

* L'absence de spécialité indiquée dans cette colonne signifie que le logiciel est une suite regroupant plusieurs algorithmes.

2.4.4. Analyse en composante principale

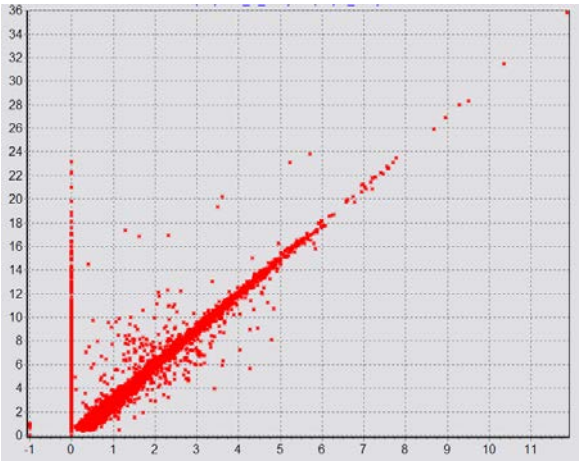
Cette méthode a déjà été utilisée dans d'autres travaux de recherche similaires. On peut citer Wallemarcq, Marique et Reiter (Wallemacq et al., 2011) qui ont réalisé plusieurs ACP afin de classer les ilots urbains de la ville de Liège par typologies de consommations énergétiques.

Matrice de corrélations

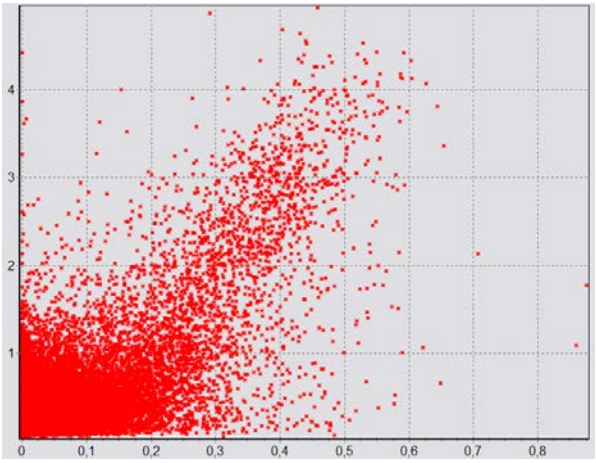
La première étape pour clarifier l'analyse est de déterminer les paramètres réellement significatifs. Dans un premier temps, nous écartons les paramètres directement reliés les uns aux autres. Par exemple, nous éliminons le paramètre « surface de plancher dans la maille » car il est équivalent au paramètre « densité bâtie brute ». Une fois leurs valeurs centrées et réduites, ces paramètres auraient exactement les mêmes valeurs.

Afin de poursuivre la réduction du nombre de paramètres, nous calculons la matrice des coefficients de corrélations à l'aide du logiciel TANAGRA. Nous souhaitons savoir si les paramètres considérés sont statistiquement liés les uns aux autres. Pour cela nous allons rechercher la valeur des coefficients de corrélation entre toutes les variables considérées deux à deux. Le coefficient de corrélation est une mesure statistique destinée à quantifier l'intensité d'un lien linéaire entre deux variables. Nous utiliserons le coefficient de corrélation de Pearson. D'autres types de corrélations existent (comme la corrélation partielle) mais nous ne les utiliserons pas en raison du grand nombre de variables. Le principe de calcul est présenté en annexe 3.

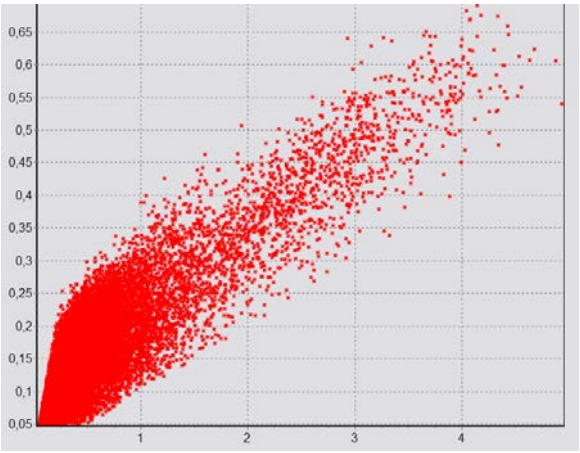
La matrice de corrélation est présentée en annexe 4. On y relève des corrélations parfois très fortes entre certaines variables. Afin d'éviter trop de redondance dans les informations, on décide de ne retenir qu'un seul paramètre chaque fois que les corrélations sont trop importantes. Cependant, pour s'assurer de la pertinence de ces éliminations, on doit examiner les graphiques de corrélation (voir Figure 87).



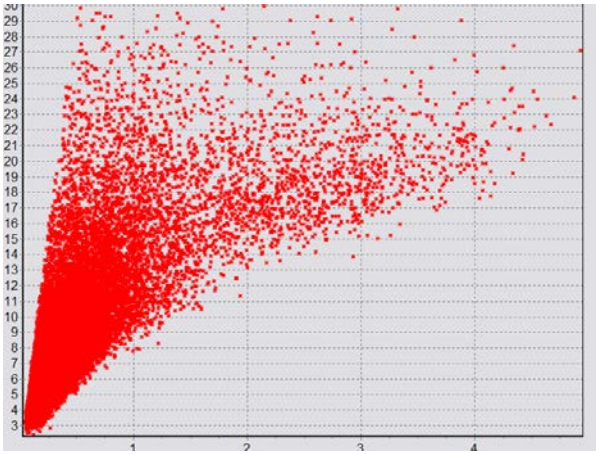
Écart type de la densité nette (abscisse) et écart type de la hauteur de bâtiment (ordonnée)
r = 0,83



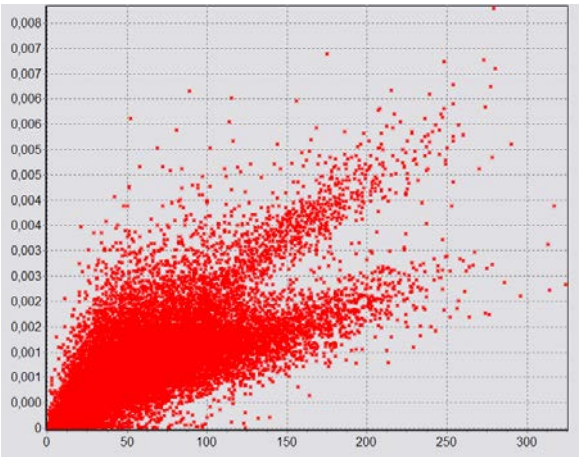
Contigüité du bâtiment (abscisse) et densité brute (ordonnée) et
r = 0,72



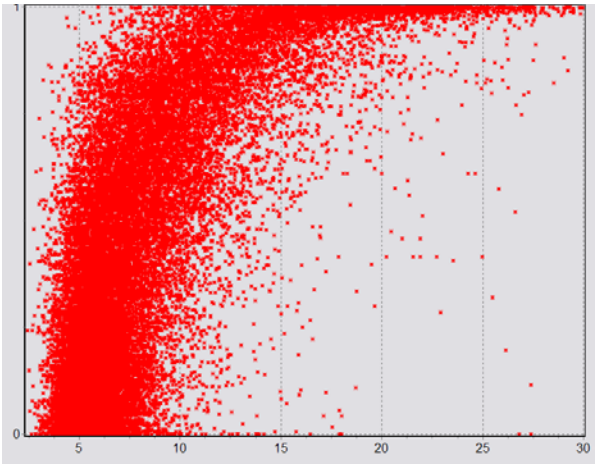
Densité brute (abscisse) et coefficient d'emprise au sol (ordonnée)
r = 0,88



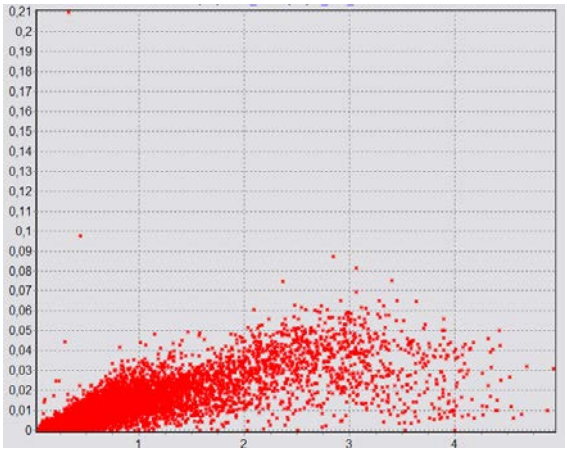
Densité brute (abscisse) et hauteur moyenne des bâtiments (ordonnée)
r = 0,75



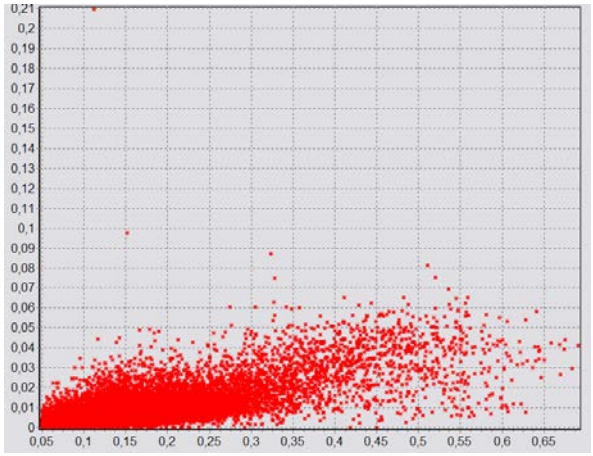
Nombre de bâtiment par maille (abscisse) et densité de parcelle (ordonnée)
r = 0,73



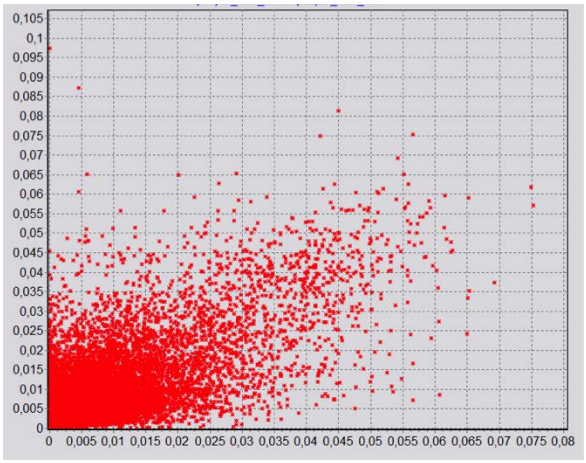
Hauteur moyenne (abscisse) et part de logement collectif (ordonnée)
r = 0,72



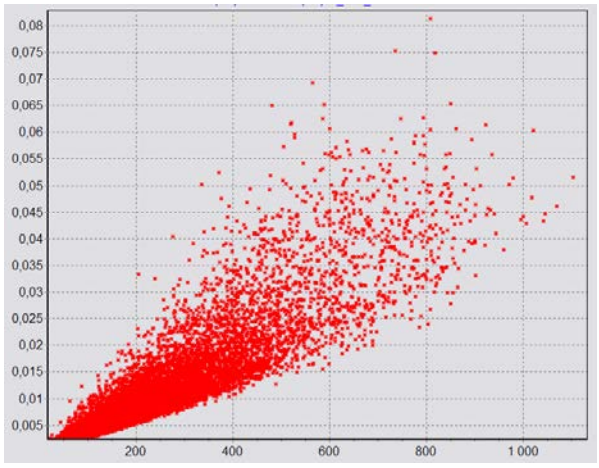
Densité bâtie brute (abscisse)
et densité d'habitants nette (ordonnée)
r = 0,83



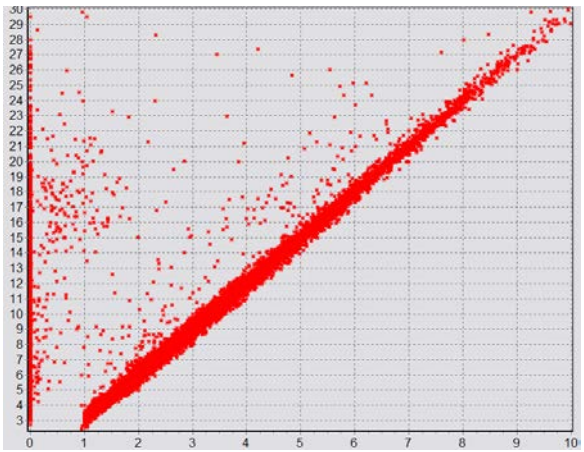
CES (abscisse) et densité d'habitants nette (ordonnée)
r = 0,74



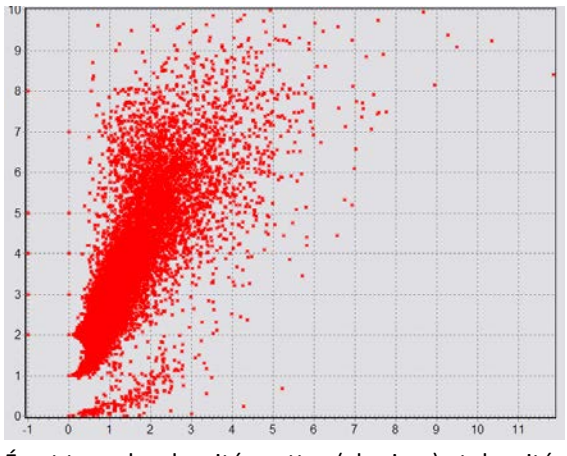
Densité d'habitants nette (abscisse) et densité d'habitant brute (ordonnée)
r = 0,71



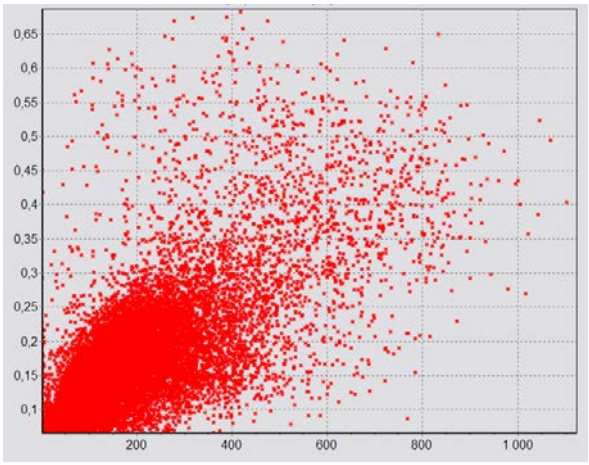
Nombre de voiture (abscisse) et densité d'habitants brute (ordonnée)
r = 0,92



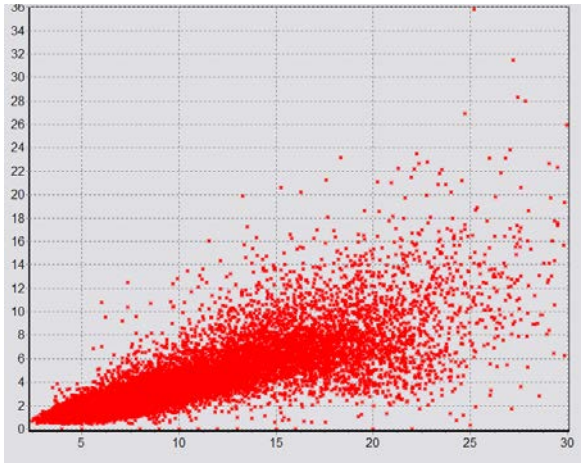
Densité nette (abscisse) et hauteur moyenne des bâtiments (ordonnée)
r = 0,78



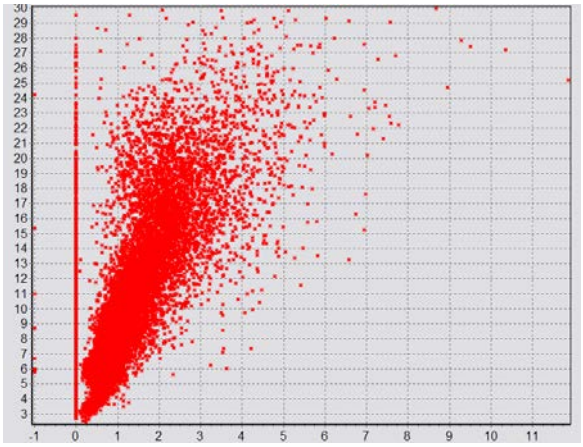
Écart type des densités nettes (abscisse) et densité brute (ordonnée)
r = 0,84



Nombre de voiture (abscisse) et coefficient d'emprise au sol (ordonnée)
r = 0,73



Écart type des hauteurs (abscisse) et hauteur (ordonnée)
r = 0,84



Écart type de la densité nette (abscisse) et hauteur (ordonnée)
r = 0,74

Figure 87 : Graphiques de corrélations

On s'aperçoit que l'écart type de la hauteur des bâtiments et l'écart type de la densité nette sont très fortement corrélés. En effet, celles-ci dépendent de l'hétérogénéité du tissu. On choisi d'éliminer l'écart type de la densité nette.

La densité brute et la contigüité du bâtiment ne sont pas parfaitement corrélées. Cependant, la densité brute est très fortement corrélée au coefficient d'emprise au sol et à la hauteur moyenne. On peut supposer que ces variables sont liées de manière indirecte (la densité brute augmente avec l'action conjointe de la hauteur et du CES). On pourrait donc éliminer la densité brute de l'ACP car l'association des autres indicateurs la remplace. Elle servira cependant de variable de contrôle dans l'établissement de groupes typologiques.

La densité de parcelles et le nombre de bâtiments par maille sont bien corrélés. On choisit de ne conserver que le nombre de bâtiments par maille.

La part de logement collectif et la hauteur moyenne ont un bon coefficient de corrélation mais le graphique nous montre qu'elles ne sont pas suffisamment corrélées pour en supprimer une.

La densité d'habitants brute semble fortement corrélée avec la densité d'habitants nette, le nombre de voitures par ménage, la densité bâtie brute et le coefficient d'emprise au sol. Les graphiques nous confirment cette analyse à l'exception du lien existant entre densité nette et brute. On choisit finalement d'éliminer la variable densité d'habitants brute.

La densité nette et la hauteur moyenne des bâtiments sont très fortement corrélées. Cela est parfaitement logique puisque la densité nette est égale à la surface de plancher sur la surface au sol, elle dépend donc directement du nombre de niveaux et donc de la hauteur des bâtiments. Elle est également assez corrélée à l'écart type des densités nettes. On choisit donc d'éliminer la densité nette de notre système d'indicateurs.

La hauteur moyenne des bâtiments est fortement corrélée à l'écart type des hauteurs et à l'écart type de la densité nette, ces deux indicateurs étant également corrélés entre eux. On choisit de conserver l'écart type des hauteurs et d'éliminer l'écart type de la densité nette.

Finalement, on conserve les paramètres présentés dans le Tableau 26.

Tableau 26 : Paramètres retenus pour la classification automatique des mailles

Paramètres	
H_EcTy	Écart type des hauteurs des bâtiments dans la maille
Comp_EcTy	Écart type des compacités des bâtiments
Cont_EcTy	Écart type des contiguïtés des bâtiments
S_pl_moy_B	Surface de plancher moyenne par bâtiment
Orien_EcTy	Écart type des orientations des bâtiments
NbBat_Mail	Nombre de bâtiment par maille
H_moy_bat	Hauteur moyenne des bâtiments dans la maille
Comp_bat	Coefficient de compacité des bâtiments
Cont_bat	Coefficient de contigüité des bâtiments
S_env_ext	Surface d'enveloppe extérieure des bâtiments chauffés
Dens_br	Densité bâtie brute de la maille
CES	Coefficient d'emprise au sol
H_EcTy_bl	Écart type des hauteurs des bâtiments dans un même bloc bâti.
Spl_Moy_bl	Surface de plancher moyenne par bloc de bâtiment.
Comp_bloc	Coefficient de compacité des blocs
S_cours	Surface moyenne des cours
O_cours	Coefficient d'ouverture des cours
Nbbat_bl	Nombre de bâtiment par bloc
Dens_route	Densité surfacique de route
Angle_EcTy	Écart type des directions des routes
Larg_EcTy	Écart type des largeurs des routes
Long_route	Longueur route
Larg_route	Largeur moyenne des routes
Dens_veg	Densité surfacique de végétation
age_maj	Age majoritaire
Coll_Ind	Pourcentage de collectif et d'individuel
Dist_Centr	Distance au centre de la commune
H_Indus	Hauteur moyenne des bâtiments d'activités
Ssol_indus	Surface au sol des bâtiments d'activités dans la maille
D_hab_mail	Densité d'habitants approchée
D_hab_N	Densité d'habitants nette (par m² bâti)
D_hab_br	Densité d'habitants brute (par m² de maille)
Voit_men	Nombre de voiture personnelle par ménage

Analyse en Composante Principale

La deuxième étape de notre analyse statistique est l'ACP à proprement parler, que nous réalisons avec TANAGRA.

Le tableau des valeurs propres est présenté ci-après (voir Tableau 27). Nous constatons que le premier axe ne restitue que 31,19% de l'information disponible. Cependant, en examinant la courbe de décroissance des valeurs propres on peut repérer que la pente diminue de façon brutale dès ce premier axe. En appliquant la méthode dite « du coude », on pourrait alors retenir uniquement l'axe qui précède ce changement brusque (Carpentier, 2012). Cela reviendrait donc à mener l'étude sur un seul axe. La part d'inertie expliquée n'est pas très importante mais un deuxième axe n'apporterait pas beaucoup plus d'informations.

Tableau 27 : Valeurs propres

Axis	Eigen value	% explained	Histogram	% cumulated
1	6,550026	31,19%		31,19%
2	2,218947	10,57%		41,76%
3	1,809764	8,62%		50,37%
4	1,434667	6,83%		57,21%
5	1,029191	4,90%		62,11%
6	1,011252	4,82%		66,92%
7	0,989407	4,71%		71,63%
8	0,943415	4,49%		76,13%
9	0,877798	4,18%		80,31%
10	0,793688	3,78%		84,09%
11	0,673105	3,21%		87,29%
12	0,521314	2,48%		89,77%
13	0,440785	2,10%		91,87%
14	0,376454	1,79%		93,67%
15	0,345748	1,65%		95,31%
16	0,276522	1,32%		96,63%
17	0,255154	1,22%		97,84%

Tableau 28 : Contribution des variables aux axes

Paramètres	Axe 1		Axe 2	
	Corr.	% (Tot. %)	Corr.	% (Tot. %)
H_EcTy	-0,6868	*47 % (47 %)*	-0,4085	*17 % (64 %)*
Comp_EcTy	-0,3102	*10 % (10 %)*	-0,3246	*11 % (20 %)*
Cont_EcTy	-0,5564	*31 % (31 %)*	0,2208	*5 % (36 %)*
S_pl_moy_B	-0,1343	*2 % (2 %)*	-0,2568	*7 % (8 %)*
Orien_EcTy	-0,008	*0 % (0 %)*	0,1263	*2 % (2 %)*
NbBat_Mail	-0,3816	*15 % (15 %)*	0,7262	*53 % (67 %)*
H_moy_bat	-0,8032	*65 % (65 %)*	-0,4078	*17 % (81 %)*
Comp_bat	-0,0229	*0 % (0 %)*	-0,64	*41 % (41 %)*
Cont_bat	-0,7439	*55 % (55 %)*	0,2299	*5 % (61 %)*
S_env_ext	-0,888	*79 % (79 %)*	0,1997	*4 % (83 %)*
Dens_br	-0,9083	*83 % (83 %)*	0,1014	*1 % (84 %)*
CES	-0,7987	*64 % (64 %)*	0,3954	*16 % (79 %)*
H_EcTy_bl	-0,2086	*4 % (4 %)*	0,0633	*0 % (5 %)*
Spl_Moy_bl	-0,6857	*47 % (47 %)*	-0,2109	*4 % (51 %)*
Comp_bloc	-0,4855	*24 % (24 %)*	-0,0593	*0 % (24 %)*
S_cours	-0,0105	*0 % (0 %)*	0,0097	*0 % (0 %)*
O_cours	-0,21	*4 % (4 %)*	-0,0264	*0 % (4 %)*
Nbbat_bl	-0,2012	*4 % (4 %)*	0,1025	*1 % (5 %)*
Dens_route	-0,6027	*36 % (36 %)*	0,1963	*4 % (40 %)*
Angle_EcTy	-0,1248	*2 % (2 %)*	0,2138	*5 % (6 %)*
Larg_EcTy	-0,2326	*5 % (5 %)*	-0,2749	*8 % (13 %)*
Long_route	-0,4972	*25 % (25 %)*	0,0804	*1 % (25 %)*
Larg_route	-0,3723	*14 % (14 %)*	0,2053	*4 % (18 %)*
Dens_veg	0,2397	*6 % (6 %)*	-0,3351	*11 % (17 %)*
age_maj	0,1582	*3 % (3 %)*	-0,0363	*0 % (3 %)*
Coll_Ind	-0,7524	*57 % (57 %)*	-0,1268	*2 % (58 %)*
Dist_Centr	-0,2142	*5 % (5 %)*	-0,0771	*1 % (5 %)*
H_Indus	-0,2034	*4 % (4 %)*	-0,0727	*1 % (5 %)*
Ssol_indus	-0,1171	*1 % (1 %)*	-0,0716	*1 % (2 %)*
D_hab_mail	-0,209	*4 % (4 %)*	0,1166	*1 % (6 %)*
D_hab_N	-0,8614	*74 % (74 %)*	0,1335	*2 % (76 %)*
D_hab_br	0,2973	*9 % (9 %)*	-0,0772	*1 % (9 %)*
Voit_men	0,8016	*64 % (64 %)*	-0,0401	*0 % (64 %)*

Le Tableau 28 présente les coefficients de corrélation les plus importants entre les variables initiales et les composantes principales. Comme on peut le voir, les paramètres les plus influents pour l'axe 1 sont :

- la densité bâtie brute,
- la surface d'enveloppe extérieure,
- la densité d'habitants nette,
- la hauteur moyenne des bâtiments,
- le coefficient d'emprise au sol,
- le pourcentage d'habitat individuel/collectif,
- la contigüité.

La Figure 88 est obtenue en projetant les mailles sur les deux premiers axes. On remarque qu'il est difficile de distinguer des groupes en raison du très grand nombre d'individus. La méthode de l'analyse en composante principale ne semble donc pas tout à fait satisfaisante pour la classification automatique des morphologies urbaines.

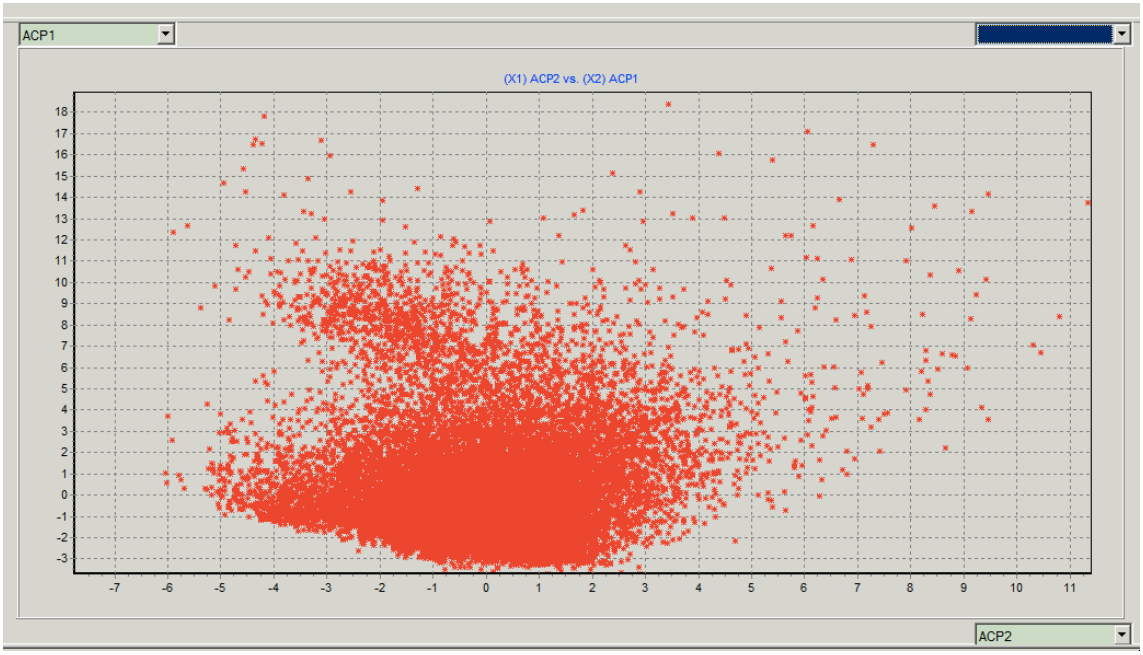


Figure 88 : Projection des mailles sur les deux premiers axes de l'ACP (illustration de l'auteur)

Proposition d'exploitation de l'analyse en composante principale

En revanche, en observant l'ACP couplée à la densité bâtie brute on arrive à distinguer des groupes de manière plus claire (voir Figure 90).

Pour cela, nous nous sommes appuyés sur la bibliographie existante qui nous a permis d'attribuer des bornes de densités en accord avec les typologies que nous recherchions. En particulier, la documentation de l'Institut d'aménagement et d'urbanisme de la Région Ile-de-France nous donne une échelle de densité bâtie brute pour les typologies de la région (voir Figure 89). Finalement, on arrive à distinguer les cinq classes recherchées (voir Figure 90).

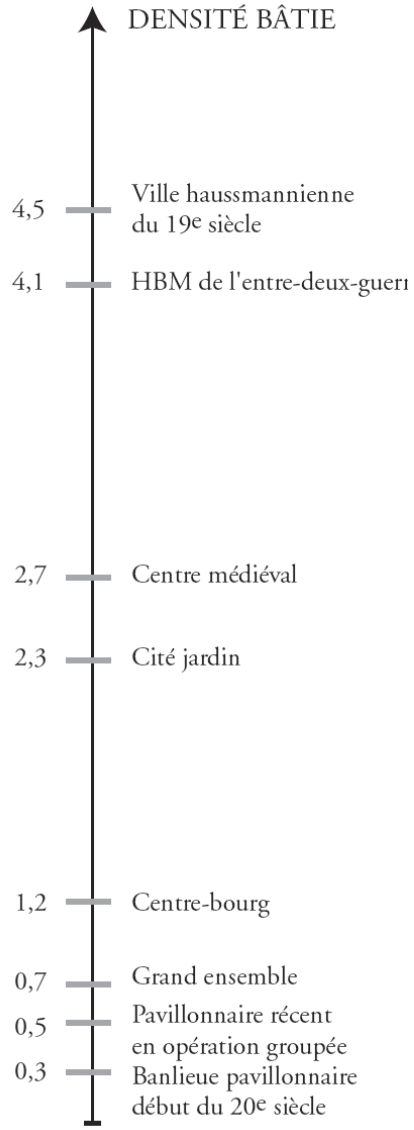


Figure 89 : Échelle de densité bâtie brute pour les typologies de la région (Moulinié & Naudin-Adam, 2005a)

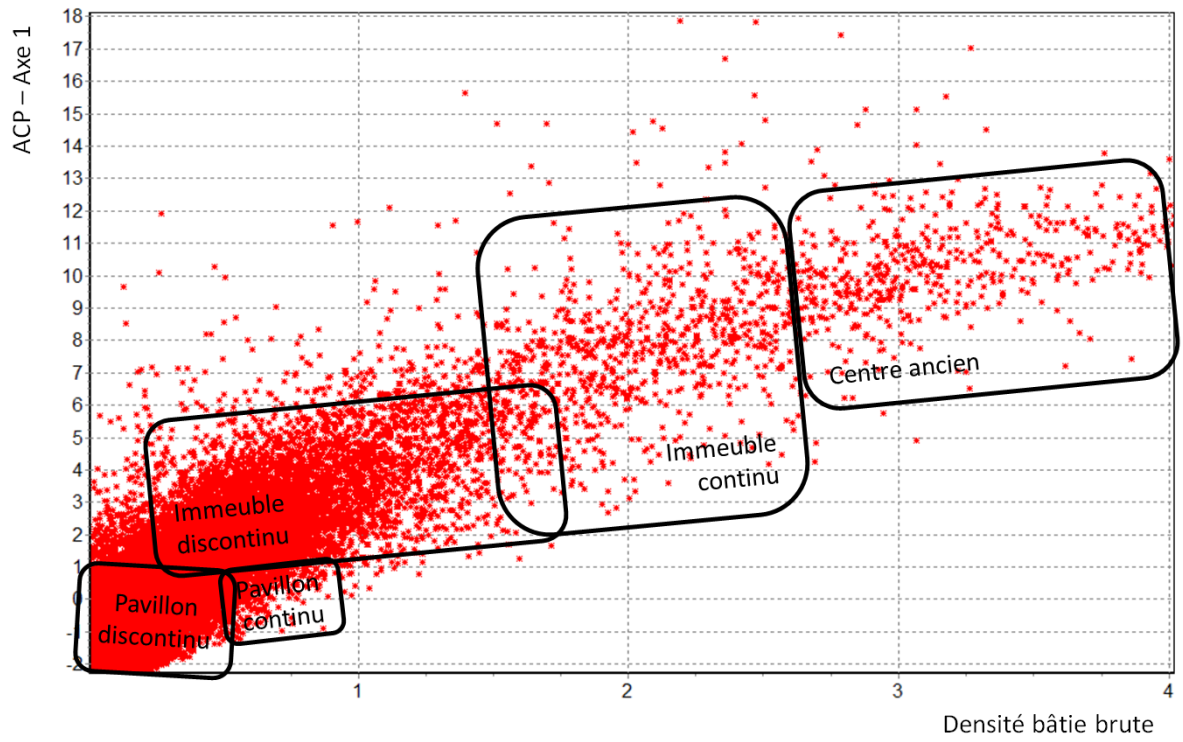


Figure 90 : Projection des mailles sur l'axe 1 et un axe figurant la densité bâtie brute (illustration de l'auteur)

Le Tableau 29 synthétise les critères finalement retenus pour prendre en compte la répartition en groupes typologiques dans ArcGIS.

Tableau 29 : Critères de décimation des groupes d'ilots

Nom de l'ilot	Conditions
Pavillonnaire discontinu	Valeur sur l'axe 1 de l'ACP < 1 Densité brute < 0,6
Pavillonnaire continu	Valeur sur l'axe 1 de l'ACP < 1 Densité brute > 0,6
Immeuble discontinu	Valeur sur l'axe 1 de l'ACP > 1 Densité brute < 1,8
Immeuble continu	Valeur sur l'axe 1 de l'ACP > 1 1,8 < Densité brute < 2,5
Immeuble de grande hauteur	Hauteur moyenne > 30 m
Centre ancien	Valeur sur l'axe 1 de l'ACP > 1 Densité brute > 2,5
Bâtiment industriel ou commercial	Surface au sol indus / Surface au sol > 0,6
Non bâti	CES < 0,05

Finalement, nous obtenons via l'ACP une classification en cinq classes dont les principales caractéristiques sont résumées ci-après dans le Tableau 30 et la Figure 91.

Tableau 30 : Caractéristiques des cinq groupes trouvés par la méthode ACP modifiée

Groupe	Nombre de maille	Densité bâtie brute	Hauteur	Compacité	Contiguïté
Pavillonnaire discontinu	24746	0,27	6,64	4,74	0,03
Pavillonnaire continu	1179	0,70	9,94	4,91	0,04
Immeuble discontinu	6406	0,82	13,91	5,21	0,12
Immeuble continu	646	2,13	18,37	4,65	0,29
Centre ancien	764	3,16	19,92	4,39	0,39

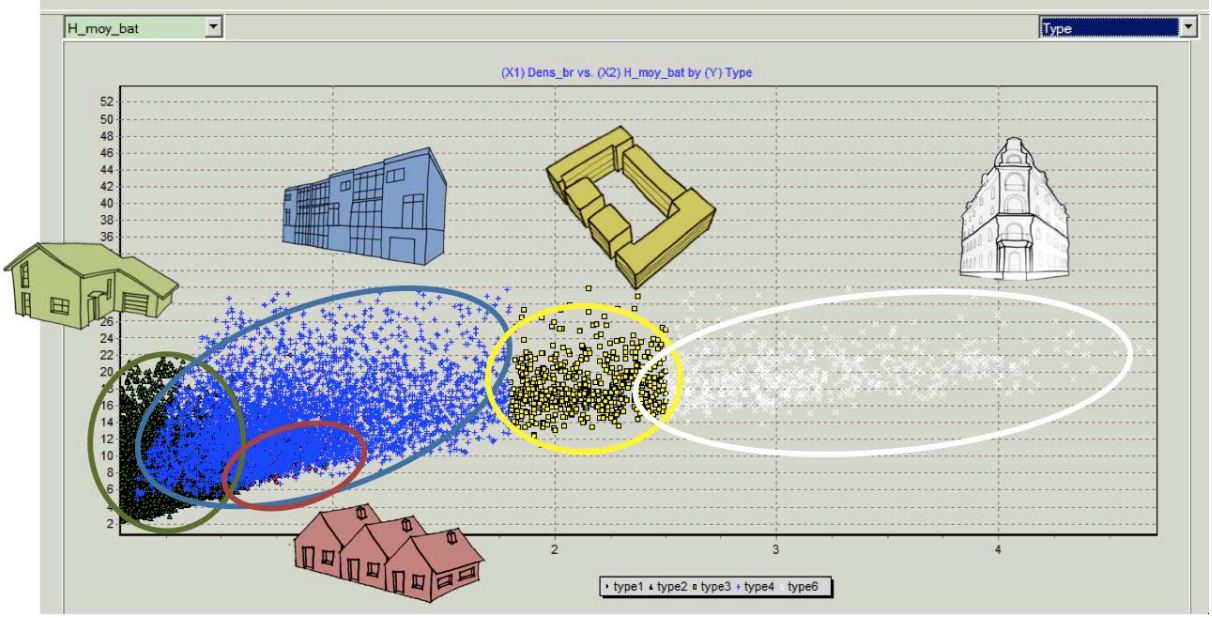


Figure 91 : Répartition des classes de l'ACP en fonction de la densité bâtie brute (abscisse) et de la hauteur (ordonnée) (illustration de l'auteur)

Bien que seul 31% de l'inertie soit traduite dans cette analyse sur un seul axe, les caractéristiques morphologiques de ces groupes correspondent bien aux types que nous avions prédéfinis.

2.4.5. Méthode k-means

La deuxième méthode de classification automatique que nous avions sélectionnée est une méthode du type « centres mobiles », la méthode des k-means. Cette méthode a déjà été utilisée dans d'autres travaux de recherche similaires. On peut citer par exemple l'étude de Long qui a permis une classification typologique de la ville de Marseille en s'appuyant sur la méthode des nuées dynamiques proche de celle des k-means (Long & Kergomard, 2005).

Nous avons lancé cette deuxième étude avec TANAGRA. Cet outil informatique est suffisamment puissant pour pouvoir prendre en compte tous les paramètres morphologiques, nous avons cependant écarté les indicateurs que nous avions identifiés au chapitre précédent comme étant corrélés entre eux.

TANAGRA se charge de centrer et réduire les variables et gère l'algorithme conformément à ce qui a été présenté au chapitre 2.4.1. Finalement, la méthode aboutit à une partition en cinq classes comme spécifié, dont les caractéristiques sont présentées dans le Tableau 31 et la Figure 92.

Tableau 31 : Cinq groupes trouvés par la méthode k-means

Groupe	Nombre de maille	Densité bâtie brute	Hauteur	Compacité	Contiguïté
Groupe k-means n°1	1203	2,60	19,09	4,39	0,35
Groupe k-means n°2	4054	0,82	15,39	5,92	0,11
Groupe k-means n°3	11489	0,37	7,49	5,54	0,04
Groupe k-means n°4	13429	0,13	6,32	5,33	0,01
Groupe k-means n°5	3566	0,38	8,05	0,01	0,07

L'inertie expliquée par le regroupement est de 32,20%, à rapprocher de l'inertie de l'ACP sur un axe. Les deux analyses sont donc cohérentes. Cependant, en observant les caractéristiques morphologiques des groupes et leur répartition sur un graphique densité bâtie brute / hauteur, on s'aperçoit que les classes ne correspondent pas à nos connaissances urbaines. En particulier, les classes de faibles densités qui pourraient correspondre à des pavillons ont des hauteurs trop élevées pour ces types de quartiers. De plus les classes se chevauchent beaucoup et l'on peine à identifier des archétypes urbains.

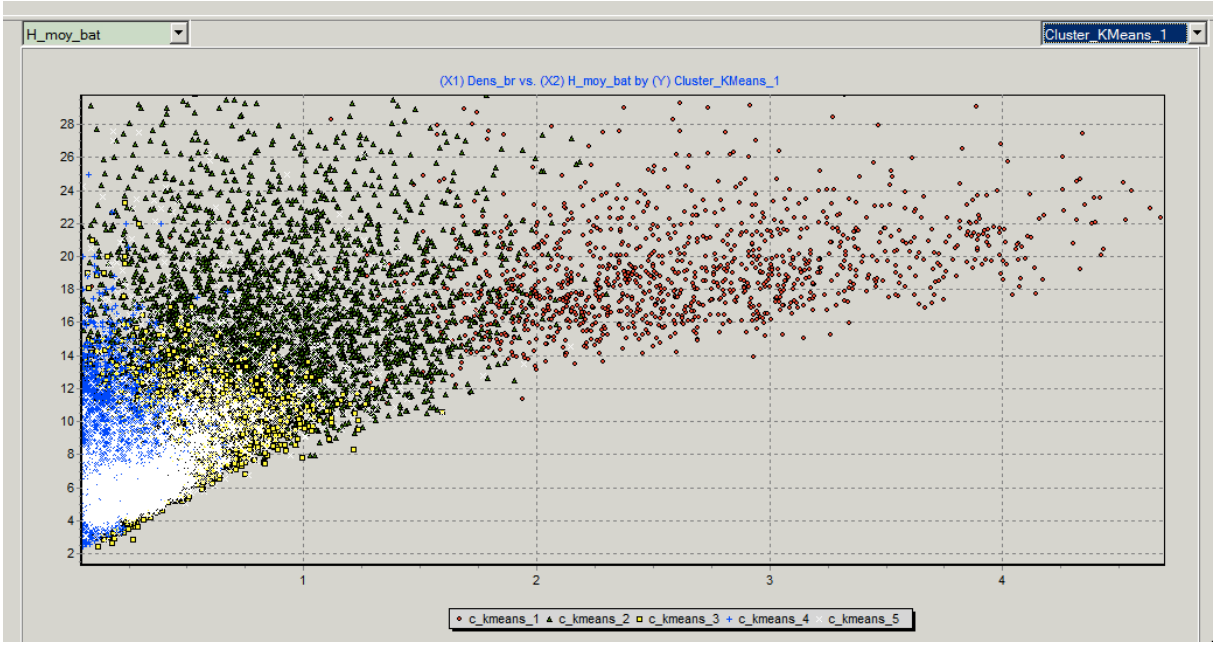


Figure 92 : Répartition des classes k-means en fonction de la densité bâtie brute (abscisse) et de la hauteur (ordonnée) (illustration de l'auteur)

2.4.6. Méthode des cartes de Kohonen

La troisième méthode que nous avions identifiée est celle des cartes de Kohonen. Cette méthode est également très utilisée dans la recherche urbaine. Jianwen et Bagan ont par exemple utilisé cet algorithme pour distinguer différentes classes d'occupations du sol à Pékin (eau, forêts, herbe, cultures, routes, et surfaces urbanisées) (Jianwen & Bagan, 2005).

Nous procédons de la même manière que précédemment pour sélectionner les variables, les centrer, les réduire et lancer l'algorithme avec TANAGRA.

La méthode de Kononen demande de définir une carte de sortie contenant les classes. Nous définitions une matrice de deux par trois cellules ce qui se rapproche des cinq classes que nous souhaitons définir. L'algorithme nous donne pour résultats six classes dont une classe qui est pratiquement vide et que nous négligerons donc. Les caractéristiques des cinq classes retenues sont présentées dans le Tableau 31 et la Figure 92.

Tableau 32 : Cinq groupes trouvés par la méthode des cartes de Kohonen

Groupe	Nombre de maille	Densité bâtie brute	Hauteur	Compacité	Contiguïté
Groupe Kohonen n°1.1	4071	0,4339	7,8331	1,513	0,1
Groupe Kohonen n°1.2	8047	0,5138	9,7695	5,7996	0,0606
Groupe Kohonen n°1.3	2023	0,8943	18,3791	6,0233	0,1182
Groupe Kohonen n°2.1	18401	0,1644	6,2419	5,1265	0,0164
Groupe Kohonen n°2.3	1141	2,6507	19,0766	4,4251	0,3557

L'inertie expliquée par le regroupement est de 31,12%, ce qui est très proche de celle obtenue pour les méthodes de l'ACP et des k-means. Les trois analyses sont donc cohérentes. Comme précédemment, en observant la répartition de ces classes sur un graphique densité bâtie brute / hauteur, on s'aperçoit pourtant que les classes ne correspondent pas à nos connaissances urbaines. En particulier, les classes se chevauchent beaucoup et l'on peine à identifier des types connus.

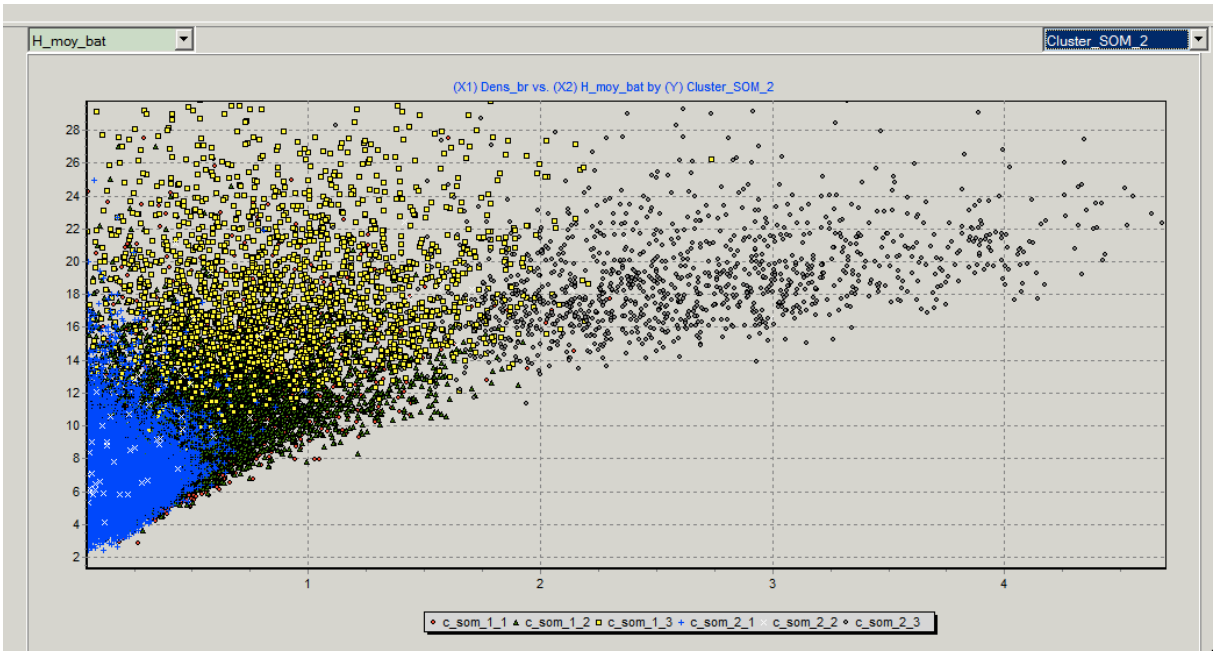


Figure 93 : Répartition des classes des cartes de Kohonen en fonction de la densité bâtie brute (abscisse) et de la hauteur (ordonnée) (illustration de l'auteur)

2.4.7. Discussion

On a pu remarquer que les trois méthodes n'avaient pas le même degré de correspondance aux typologies préétablies. On peut le vérifier en observant les tableaux de contingences entre les effectifs obtenus dans les trois méthodes.

Tous d'abord, par rapport à la méthode de type ACP, la méthode des k-means distingue trois classes qui correspondent plutôt à du pavillonnaire discontinu. Par ailleurs, les classes « pavillonnaires continus » et « immeubles continus » ne se distinguent pas vraiment dans la classification k-means. En revanche, les deux groupes correspondant au centre ancien et aux immeubles discontinus se correspondent bien dans les deux méthodes (voir Tableau 33). On retrouve exactement le même schéma en comparant la méthode de l'ACP et les cartes de Kohonen (voir Tableau 34). A l'inverse, les méthodes des k-means et des cartes de Kohonen semblent donner des résultats concordants (voir Tableau 35).

Tableau 33 : Table de contingence ACP / k-means

	Groupe k-means n°1	Groupe k-means n°2	Groupe k-means n°3	Groupe k-means n°4	Groupe k-means n°5	Somme
Pavillonnaire discontinu	2	434	9889	13391	2816	26532
Pavillonnaire continu	0	50	700	7	189	946
Immeuble discontinu	137	3505	900	31	559	5132
Immeuble continu	452	65	0	0	2	519
Centre ancien	612	0	0	0	0	612
Somme	1203	4054	11489	13429	3566	33741

Tableau 34 : Table de contingence ACP / Kohonen

	Groupe Kohonen n°1.1	Groupe Kohonen n°1.2	Groupe Kohonen n°1.3	Groupe Kohonen n°2.1	Groupe Kohonen n°2.3	Somme
Pavillonnaire discontinu	3160	4780	219	18350	1	26510
Pavillonnaire continu	203	713	3	27	0	946
Immeuble discontinu	699	2548	1735	24	94	5100
Immeuble continu	9	6	65	0	436	516
Centre ancien	0	0	1	0	610	612
Somme	4071	8047	2023	18401	1141	33683

Tableau 35 : Table de contingence k-means / Kohonen

	Groupe Kohonen n°1.1	Groupe Kohonen n°1.2	Groupe Kohonen n°1.3	Groupe Kohonen n°2.1	Groupe Kohonen n°2.3	Somme
Groupe k-means n°1	3	0	51	0	1136	1190
Groupe k-means n°2	52	2018	1963	0	5	4038
Groupe k-means n°3	1	130	6	13269	0	13406
Groupe k-means n°4	1245	5891	0	4347	0	11483
Groupe k-means n°5	2770	8	3	785	0	3566
Somme	4071	8047	2023	18401	1141	33683

Afin de juger de la meilleure classification, nous pouvons nous baser sur trois indicateurs : l'inertie totale, le facteur F et le taux de validation de la classification.

L'inertie totale

L'inertie totale représente la dispersion du nuage de points (Carpentier, 2012). Elle se calcule comme la somme des carrés des distances euclidiennes entre chaque individu et le centre de gravité :

$$I = \sum_{n\ individus} I_n = \sum_{n\ individus} \left(\sum_{i\ variables} p_i \|x_{ni} - g_i\|^2 \right)$$

I_n *est l'inertie associée* à *chaque individu* n
x_{ni} *est la valeur de la variable* i *pour l'individu* n
g_i *est la valeur de la variable* i *pour le centre de gravité*
p_i *est le poids de la variable* i *(si les données sont centrées et réduites,* p *vaut* 1*)*

Selon la méthode de classification utilisée, seule une partie de l'information contenue dans les données initiales est conservée. On traduit ce phénomène par une diminution de l'inertie expliquée (ou variabilité totale). Si l'inertie expliquée diminue de manière trop importante, la classification n'est pas significative.

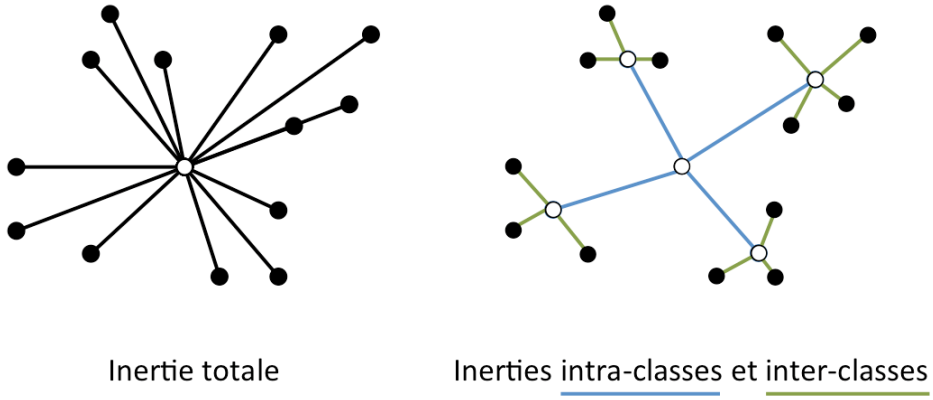


Figure 94 : Illustration des inerties totale, intra-classes et inter-classes (illustration de l'auteur)

Le facteur F

Le facteur F permet de caractériser le fait que la dispersion doit être faible au sein d'une classe et forte entre les classes (Searle, Casella, & McCulloch, 2009). Le principe de base de cette méthode statistique est donc de décomposer la variabilité globale observée dans une population en ses composantes intra-classes (variation à l'intérieur de chaque groupe qui est mesurée par la somme des carrés des écarts de chacune des valeurs à la moyenne de son groupe) et inter-classes (variation qui mesure la somme des carrés des écarts entre l'ensemble des moyennes de chaque groupe et la moyenne générale). On commence donc par calculer le carré moyen au sein des groupes puis entre les groupes. Chaque carré moyen est calculé à partir de la relation suivante :

$$CM_{inter-groupe} = \frac{\sum_{m\ groupes} p_m \left(\sum_{i\ variables} \|x_{mi} - g_i\|^2 \right)}{Nombre\ de\ groupe - 1}$$

$x_{mi}\ est\ la\ valeur\ de\ la\ variable\ i\ pour\ le\ centre\ de\ gravité\ du\ groupe\ m$
$g_i\ est\ la\ valeur\ de\ la\ variable\ i\ pour\ le\ centre\ de\ gravité\ de\ l'ensemble\ des\ données$
$p_m\ est\ le\ poids\ du\ groupe\ m, c'est\ à\ dire\ le\ nombre\ d'individus\ qui\ le\ composent$

$$CM_{intra-groupe} = \frac{\sum_{n\ individus} \left(\sum_{i\ variables} \|x_{ni} - g_{ni}\|^2 \right)}{nombre\ d'individus - Nombre\ de\ groupe}$$

$x_{ni}\ est\ la\ valeur\ de\ la\ variable\ i\ pour\ l'individu\ n$
$g_{in}\ est\ la\ valeur\ de\ la\ variable\ i\ pour\ le\ centre\ de\ gravité\ du\ groupe\ de\ l'individu\ n$

Le rapport du carré moyen inter-classes sur le carré moyen intra-classes donne un F calculé à comparer au F théorique de la table de Fischer (23,8 dans notre cas). Si ce rapport est plus élevé que le F théorique, cela signifie que la variabilité entre les groupes est plus significative que celle présente dans les groupes. Le *F* calculé est obtenu à partir de la relation suivante :

$$F = \frac{CM_{inter-groupe}}{CM_{intra-groupe}}$$

Le taux de validation des quartiers

Le critère qui nous importe le plus demeure la correspondance des classes avec la réalité bâtie. Notre dernier indicateur sera donc le taux de validation des quartiers qui correspond à la surface de notre carte correctement identifiée. Le détail du calcul de cet indicateur est présenté dans le chapitre 2.6.

Tableau 36 : Comparaison des résultats obtenus pour les trois quartiers

Méthode	Inertie expliquée par le regroupement	Facteur F	Taux de validation des quartiers
ACP modifiée	31,19 %	2 475,00	71 %
K-mean	32,21 %	3 767,36	45 %
Carte de Kohonen	31,12 %	3 022,76	52 %

En ce qui concerne l'inertie expliquée par le regroupement, les trois méthodes sont équivalentes. En ce qui concerne le facteur F, c'est la méthode des k-means qui est la plus performante. Cela signifie donc qu'elle construit des groupes homogènes et que les dissemblances entre groupes sont suffisamment importantes. Cependant, quelle que soit la méthode, on est largement au dessus du coefficient de Fischer de référence, l'ensemble de nos méthodes sont donc satisfaisantes.

Pour finir, les méthodes des k-means et des cartes de Kohonen sont bien moins efficaces en termes d'identification des typologies réelles. L'explication vient du fait que nous ne sommes pas en mesure, dans ce type de classification automatique, de mettre en œuvre nos connaissances urbaines pour séparer les classes. Nous avons donc choisi de conserver la méthode de l'ACP pour la classification des différents types de quartiers.

La représentation cartographique de ces cinq groupes d'ilots ainsi que des deux types d'ilots précédemment déterminés nous donne la vision de Paris représentée sur la Figure 95 et la Figure 96. Cette carte prend la forme d'une couche SIG vectorielle composée de carrés de 250 mètres par 250 mètres. La carte est associée à une table attributaire de 52 colonnes

contenant les valeurs des 51 paramètres du Tableau 22 ainsi que le type de quartier pour chacune des 160 000 mailles.

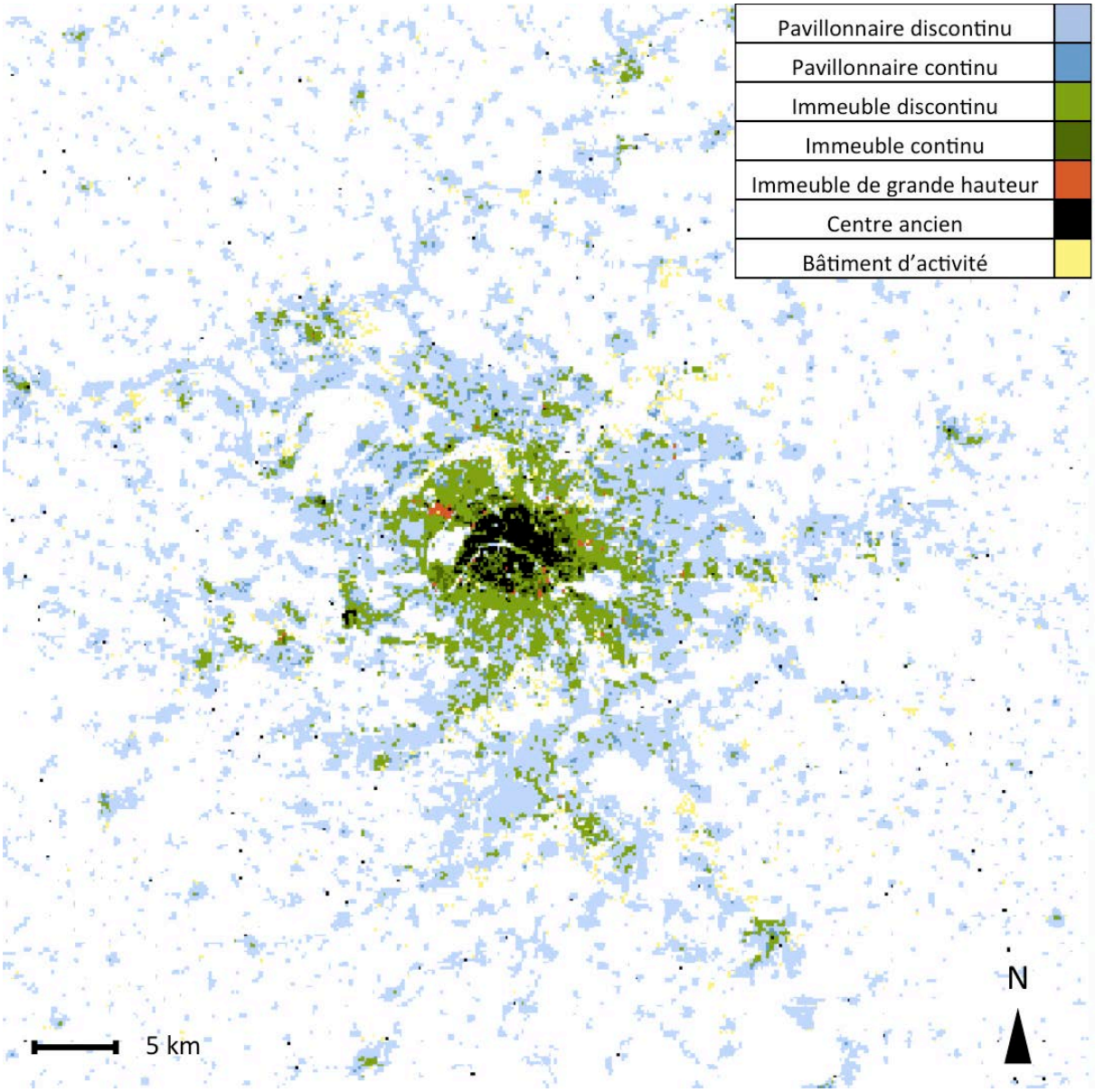


Figure 95 : Carte obtenue pour Paris et son agglomération (illustration de l'auteur)

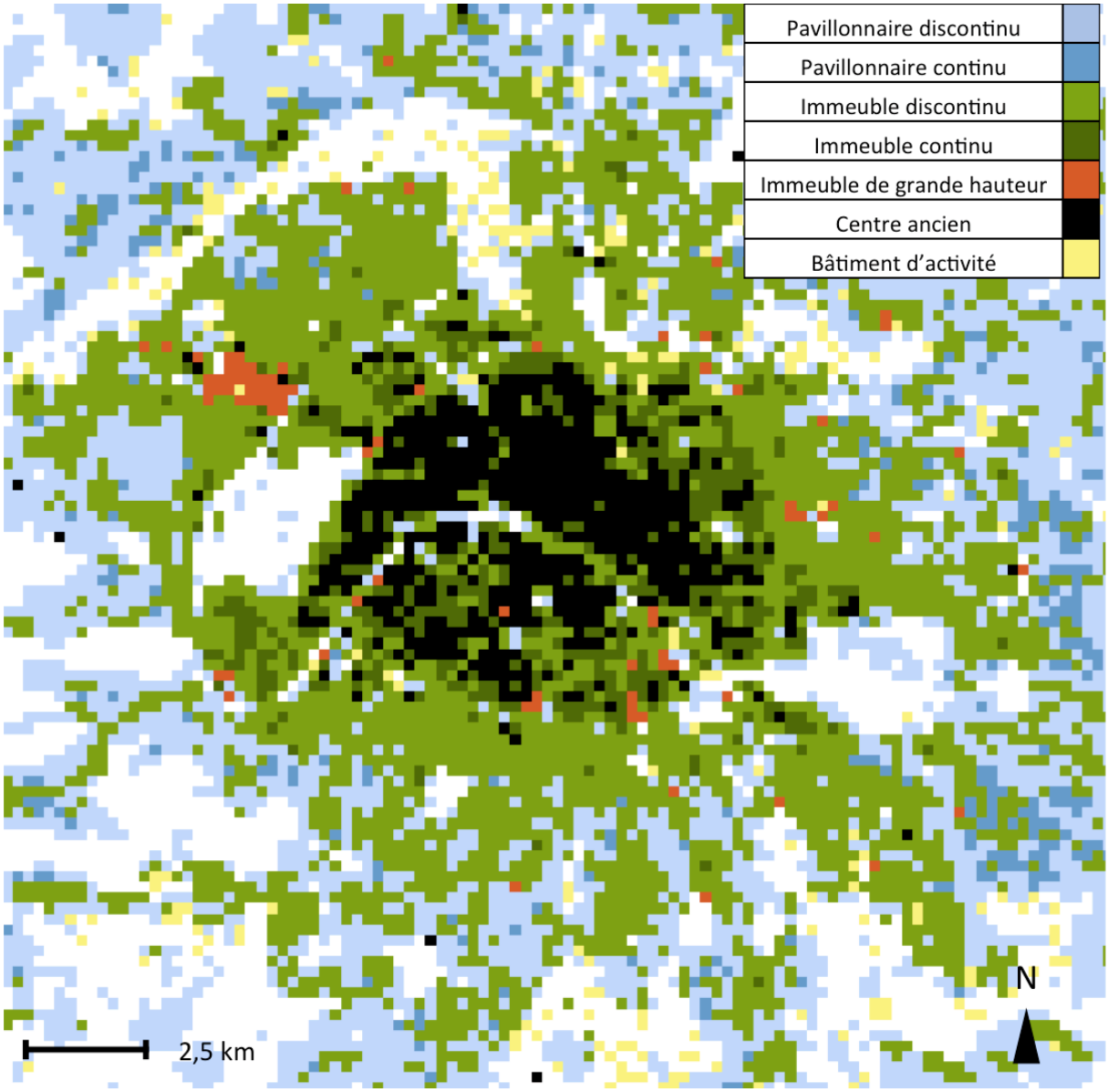


Figure 96 : Carte obtenue pour Paris (illustration de l'auteur)

2.5. Caractérisation des quartiers types

2.5.1. Attribution des usages

Problématique

Au-delà de la morphologie, les usages des différents bâtiments auront une influence primordiale sur l'énergétique du bâtiment mais aussi sur l'énergétique urbaine en général.

D'une part, les apports internes sont très différents selon l'usage. Dans les bâtiments de bureaux en particulier, le taux d'occupation est bien plus élevé durant les jours de semaine. De plus l'équipement en bureautique est plus important et génère des apports de chaleur non négligeables (van Moeseke, 2012).

On sait également que les comportements ont un impact primordial sur les consommations énergétiques liées au bâti (Guerra Santin, Itard, & Visscher, 2009). De nombreuses études se sont intéressées à la façon dont les pratiques et les caractéristiques des résidents interagissent avec la qualité des bâtiments sur les consommations domestiques (Cayla, Allibe, & Laurent, 2010; de Groot, Spiekman, & Opstelten, 2006; Haas, Auer, & Biermayr, 1998; Maresca, Dujin, & Picard, 2009). On peut citer en particulier le projet de recherche Energihab qui a porté sur l'analyse des comportements énergétiques domestiques (LAVUE, CSTB, & EDF, 2012). Cette recherche a permis de mettre en évidence que différents comportements peuvent expliquer des différences de 36 % sur les consommations énergétiques domestiques globales. Par ailleurs, un certain nombre d'études se sont intéressées aux comportements des usagers dans les bâtiments tertiaires (Dujin, Moussaoui, Mordret, & Maresca, 2011). Bien que ce champ de recherche n'ait pas autant été exploré que celui lié aux consommations domestiques, il ressort de ces travaux que les comportements énergétiques au bureau sont très différents des comportements énergétiques au domicile.

Comme nous le verrons dans le chapitre suivant, l'usage aura également un impact sur la matérialité et les équipements du bâtiment. Il est donc primordial de le connaître, en particulier de faire la distinction entre l'habitat et les bureaux.

Il existe des bases de données répertoriant les emplois et / ou les entreprises à différentes échelles :

- La base de données SIRENE (Système Informatisé du REpertoire National des Entreprises et des établissements) répertorie les entreprises situées en France (INSEE, 2012). (1)
- La base de données CLAP (Connaissance Locale de l'Appareil Productif) répertorie les emplois et les rémunérations. Ces informations sont géo-localisées au niveau communal (INSEE, 2012). (2)
- Le MOS (Modèle d'Occupation du Sol) est la base de données de l'Institut d'Aménagement et d'Urbanisme d'Ile-de-France (IAU - IDF, 2008). Cette base de données répertorie les bureaux de plus de 5000 mètres carrés. (3)
- La BD Topo de l'IGN permet d'identifier les bâtiments industriels, commerciaux et agricoles sur tout le territoire français (4).
- Les données statistiques de l'INSEE à l'échelle des IRIS permettent de connaître et de localiser des IRIS d'activité regroupant plus de 1000 salariés et comptant au moins deux fois plus d'emplois salariés que de population résidente (INSEE, 2012). (2)

Cependant, ces bases de données sont : (1) soit non géo-localisées, (2) soit disponibles à un niveau trop agrégé comme celui de la commune ou de l'IRIS, (3) soit circonscrites à une ville donnée et ne peuvent donc être appliquées à notre méthode qui a pour vocation d'être élargie à l'échelle française, (4) soit incomplètes comme c'est le cas de la base de données « Topo » de l'IGN qui ne contient que les industries, les centres commerciaux et les bâtiments agricoles.

Méthode

Nous devons donc nous appuyer sur les bases de données urbaines identifiées en premier lieu (voir chapitre 2.3.1).

Nous considérons que les quartiers pavillonnaires n'accueillent que des logements et pas d'entreprises ni de commerces. Même s'il peut arriver que des commerces de proximité s'y trouvent, cela reste un phénomène marginal tant ce type de quartier est connu pour sa mono-fonctionnalité (Rogers, 2000).

En ce qui concerne les quartiers de bâtiments d'activités, la donnée est directement issue de la base de données de l'IGN (BD Topo, couche « bâtiment industriel ») qui nous donne les différents usages de chaque bâtiment parmi quatre valeurs : silo, agricole, industriel, commercial. Lorsque les bâtiments de type « silo » et « agricole » sont majoritaires dans la maille, nous considérons son usage comme « agricole ». Lorsque ce sont les bâtiments de

type « commercial » ou « industriel » nous considérons l'usage de la maille comme respectivement « commercial » ou « industriel ».

La distinction entre l'usage de bureau et celui de logement est plus délicate. En effet, nous n'avons pas à notre disposition de base de données qui nous indique où sont situés les bureaux. Afin d'identifier les zones où il est probable de rencontrer des bureaux nous allons donc croiser deux types d'information : La surface bâtie et la population. En effet, la surface bâtie nous est donnée avec précision par la BD Topo de l'IGN. Par ailleurs, la densité de population nous est donnée par la base de données de l'INSEE, à l'échelle des IRIS. En croisant ces deux informations localement, on peut identifier des zones où la population n'est pas suffisamment élevée par rapport à la surface bâtie existante. On fait l'hypothèse que dans ces zones, on rencontrera probablement des bâtiments de bureaux.

La base de données de l'INSEE nous donne le nombre d'habitants par IRIS. Grâce au logiciel SIG ArcGIS, nous répartissons ce nombre d'habitants par maille, au prorata de la surface de chaque maille se superposant à un IRIS donné. Nous divisons ensuite le nombre d'habitants par maille par la surface bâtie de cette maille. Cette densité de population n'a pas vocation à être utilisée en l'état, elle sert cependant à identifier des quartiers où la population n'est pas suffisamment nombreuse pour expliquer la quantité de surface bâtie. Dans cet objectif, on classe les mailles par ordre croissant de densité de population. On sélectionne alors les moins denses pour leurs attribuer l'usage de bâtiments de bureaux. Cette sélection se fait dans l'optique de retrouver un ratio logement / bureaux cohérent. En effet, par le biais d'une étude de la base de données MOS de l'IAU – IDF, nous avons pu déterminer la part de territoire occupée par des bureaux (voir Tableau 37).

Tableau 37 : Pourcentage de territoire attribué aux bureaux par rapport au territoire urbanisé total

Type de quartier	Pourcentage de territoire attribué aux bureaux par rapport au territoire urbanisé total
Immeubles continus, discontinus et centre ancien	11 %
Immeuble de grande hauteur	66 %

Résultats

Pour Paris et les communes environnantes on obtient la carte suivante. On y retrouve entre autres les zones de bureaux caractéristiques de Paris : les bords de Seine et La Défense.

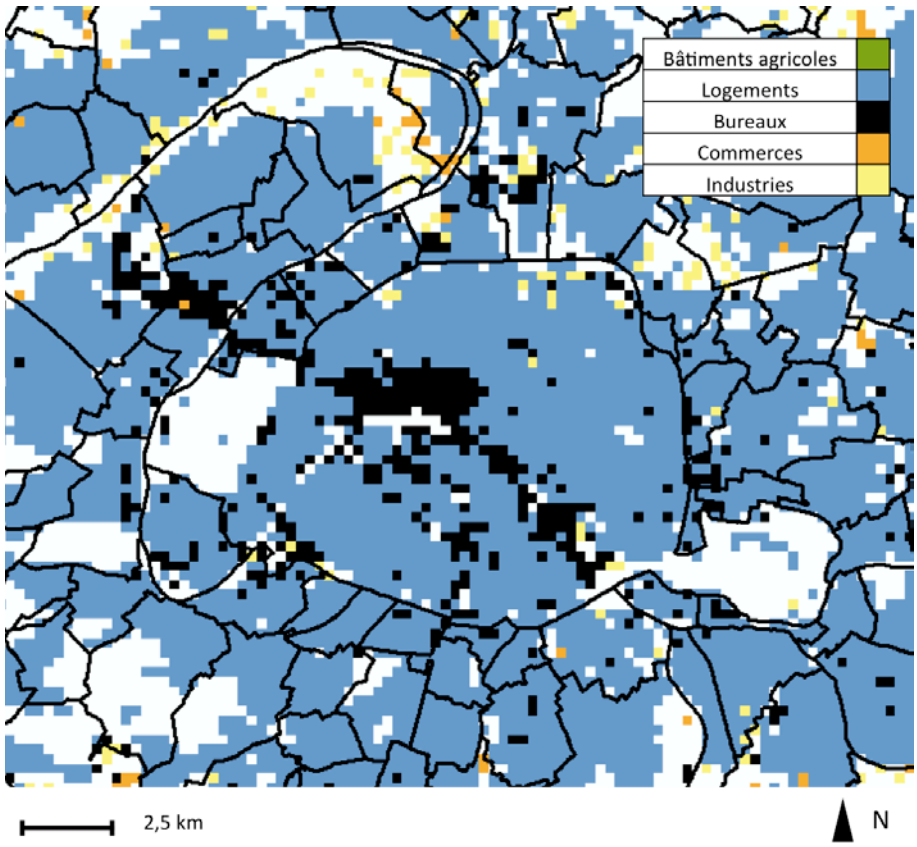


Figure 97 : Répartition des usages dans Paris et les communes environnantes (illustration de l'auteur)

Bien que des imprécisions demeurent (notre méthode n'est pas aussi fiable qu'une base de données), on retrouve de grandes similitudes avec la carte des emplois ci-après (Figure 98) issue des travaux de l'Institut d'Aménagement et d'Urbanisme d'Ile-de-France sur la base de données du CLAP. En prime, notre méthode peut être appliquée à tout le territoire français.

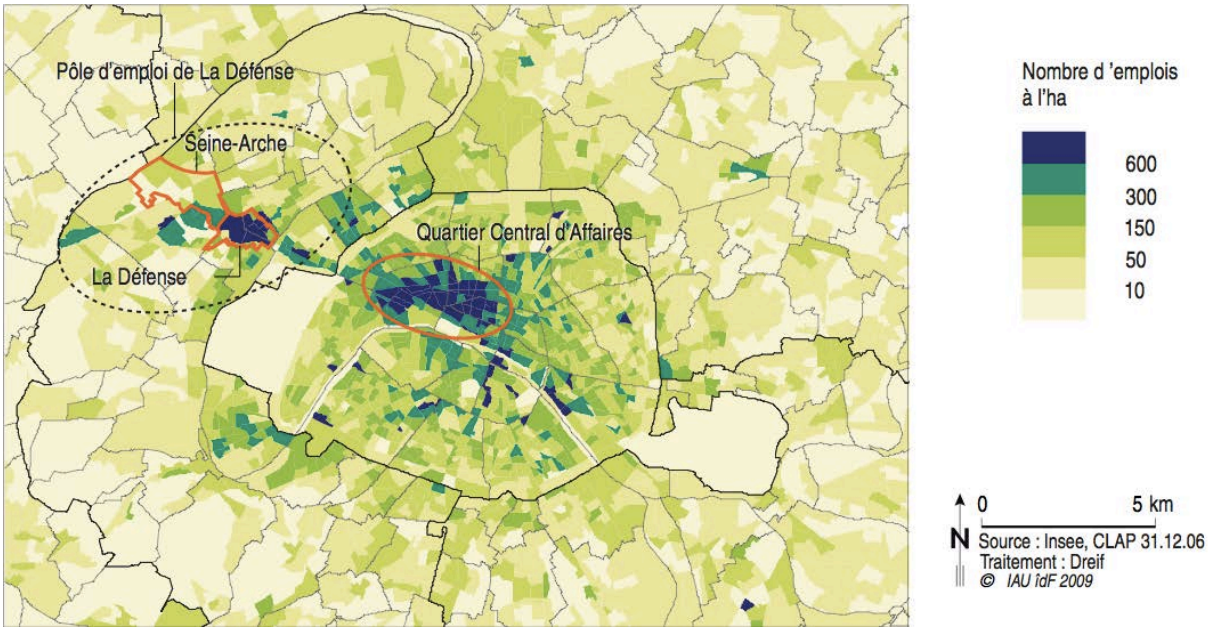


Figure 98 : Répartition des emplois dans Paris et les communes environnantes (INSEE, 2009b)

2.5.2. Attribution de caractéristiques techniques

Problématique

Les caractéristiques techniques, qu'il s'agisse de la matérialité, du pourcentage de vitrage ou encore des équipements de chauffage et de climatisation, sont les grandes absentes des bases de données urbaines. Or, ces données ont une importance capitale pour l'énergétique urbaine.

Il existe une série de travaux qui s'attache à proposer des typologies architecturales des bâtiments d'habitation (Atelier Parisien d'URbanisme, 2007) et des bâtiments tertiaires (Juricic, van den Ham, & Kurvers, 2012). Celles-ci mettent en évidence que la grande variété des matériaux a un impact à la fois sur le confort thermique, la consommation des bâtiments (Santamouris & Dascalaki, 2002), l'îlot de chaleur urbain (Colombert, 2008b) et l'énergie primaire totale des matériaux (Méquignon et al., 2013).

Une seconde thématique porte sur l'influence des équipements de chauffage, de climatisation, de régulation, de ventilation, de rafraichissement passif (protection solaire et ventilation nocturne), etc. sur l'intensité des consommations. En particulier, nous savons que 20% des émissions de gaz à effet de serre sont provoquées par le chauffage des immeubles tertiaires et leur usage de la climatisation, d'ailleurs en évolution continue depuis la canicule de l'été 2003 (Kolokotroni & Aronis, 1999; Sidler, 2002).

Méthode

Pour pallier ce manque de caractérisation des bases de données urbaines, il existe plusieurs méthodes que nous avions évoquées dans le chapitre 3.2.2 de la première partie de ce mémoire. Dans certains travaux, les caractéristiques techniques sont attribuées en fonction de l'âge du bâtiment (Atelier Parisien d'URbanisme, 2007). Dans d'autres, elle le sont en fonction du type de logement (Maïzia, 2007b; J. P. Traisnel, 2001). Une approche similaire mais plus globale a été retenue par les partenaires des projets ACCLIMAT et MUSCADE. L'objectif est de croiser âge et type de quartier pour caractériser les bâtiments de notre base de données. Cette approche a déjà été utilisée dans le projet de recherche VURCA (Hallegatte et al., 2013), qui impliquait une partie des partenaires des projets ACCLIMAT et MUSCADE.

Ainsi, on va associer, en fonction du type de quartier et de sa classe d'âge, des caractéristiques technologiques à chaque maille. Tout d'abord, on distingue des périodes de construction correspondant à des ruptures passées dans les modes de construction et/ou la règlementation thermique. Elles sont au nombre de six comme on peut le voir sur la Figure 99.

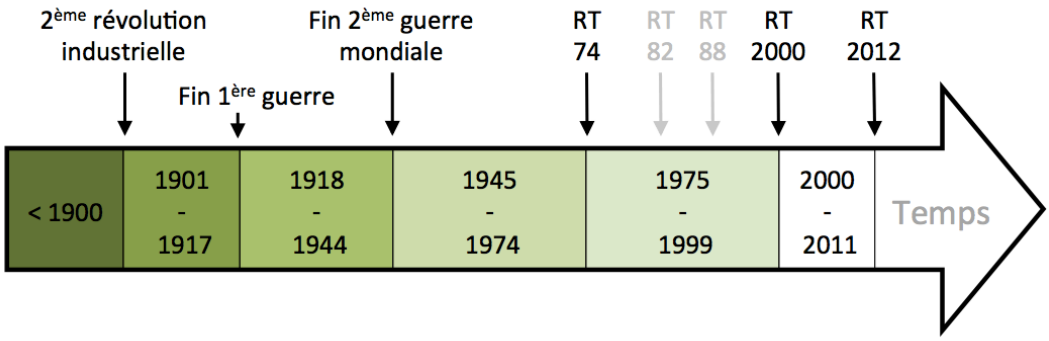


Figure 99 : Les six grandes périodes passées de construction (illustration de l'auteur)

Avant 1900, la construction se fait dans des matériaux traditionnels de bonne qualité. Pierres et briques s'associent généralement à des structures bois pour les différents types de bâtiments.

Durant la fin du 19ème siècle et la première partie du 20ème siècle, c'est la deuxième révolution industrielle. L'Europe connaît de profondes mutations économiques sociales et urbaines. L'évolution de l'industrie (qui se développe maintenant près des villes) et des moyens de déplacements (trains, tramways, automobiles, autobus, métros, etc.) conduisent à une croissance rapide de l'urbanisation qui s'accompagne d'une crise du logement. Un choix politique est fait de répondre à cette crise par la construction de logements collectifs en ville mais aussi de maisons individuelles en banlieue. Malgré la nécessaire économie de construction, une volonté de qualité prédomine dans le choix des matériaux. La brique est souvent choisie car elle est peu chère et facile à entretenir, mais aussi pour son image de modernité. Elle vient compléter des structures porteuses poteau – dalle en béton armé (Weidknnet, 2012).

Après la première guerre mondiale et jusqu'à la fin de la deuxième guerre mondiale, peu de bâtiments sont construits. Cependant, les profonds bouleversements provoqués par la première guerre mondiale amènent des changements dans le secteur du bâtiment. En particulier, les modernistes amènent la question de la technique au premier plan. Si la matérialité des logements change peu, ce sont leurs équipements qui se modernisent : électricité, eau courante, chauffage central, salle de bain, équipement de cuisine, ascenseur, etc. (Weidknnet, 2012).

Après la seconde guerre mondiale, la priorité est donnée à la production de masse de l'habitat et pas à la qualité du bâtiment. Au contraire, le logement est un secteur de l'industrie où l'on recherche l'optimisation des coûts et du temps de mise en œuvre. La priorité n'est donc pas donnée à la qualité thermique du bâtiment. Au contraire, les bâtiments construits durant cette période sont parmi les moins performants du parc de bâtiments français avec une consommation moyenne de près de 350 kWh/m²/an (Arantes et al., 2010).

Afin de répondre rapidement à l'augmentation du prix des énergies, suite au premier choc pétrolier, la première règlementation thermique française voit le jour en 1974. Elle ne concerne que l'habitat neuf mais est rapidement suivie en 1977 d'une réglementation similaire pour le tertiaire neuf. Ces règlementations nécessitent le calcul d'un coefficient G (ou G1 pour le tertiaire) représentant les déperditions globales d'un bâtiment. Une isolation thermique des parois et une bonne gestion des systèmes d'aération sont donc nécessaires (Daliphard, 2001).

En 1982 et 1988, les réglementations thermiques évoluent avec la prise en compte des besoins de chauffage (coefficient B) du bâtiment puis des consommations de chauffage (coefficient C). Il faut alors tenir compte des apports solaires et des équipements. Cependant, c'est en 2000 que la rupture se fait avec la nouvelle réglementation thermique RT2000. En effet, celle-ci vise une réduction de 10 à 15 % des consommations. Pour cela, un travail particulier sur les vitrages et les ponts thermiques est exigé. Pour la première fois, le confort thermique est évalué et l'inertie thermique est prise en compte dans les calculs (Daliphard, 2001).

La rupture suivante dans la réglementation thermique nous est contemporaine. Il s'agit de la RT2012. Cette réglementation va bien au-delà de la précédente (RT2005) puisque son objectif est que toutes les constructions neuves présentent une consommation d'énergie primaire inférieure à 50 kWh/m²/an en moyenne contre 150 kWh/m²/an environ avec la RT2005. Cette réglementation prend en compte les consommations de chauffage, de climatisation, d'eau chaude sanitaire et d'éclairage (coefficient Cep) mais également le confort (coefficient Tic) et les besoins énergétiques (coefficient BBio). Ce dernier coefficient a pour but de rendre compte de la qualité de conception des bâtiments. Il ne suffit donc plus de se concentrer sur l'isolation du bâtiment mais également sur son étanchéité, sa compacité, ses baies vitrées (1/6 de la surface habitable au minimum), son inertie, etc. La morphologie du bâtiment devient un point essentiel de la conception ce qui implique de nouveaux modes de conception du bâti. Par ailleurs, le recours aux énergies renouvelables devient une obligation (Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie, 2013; Morel & Bonneaud, 2012). Cette réglementation concerne également les rénovations en y imposant des exigences thermiques minimales dépendant de la surface rénovée et de l'âge du bâtiment (voir Figure 100).

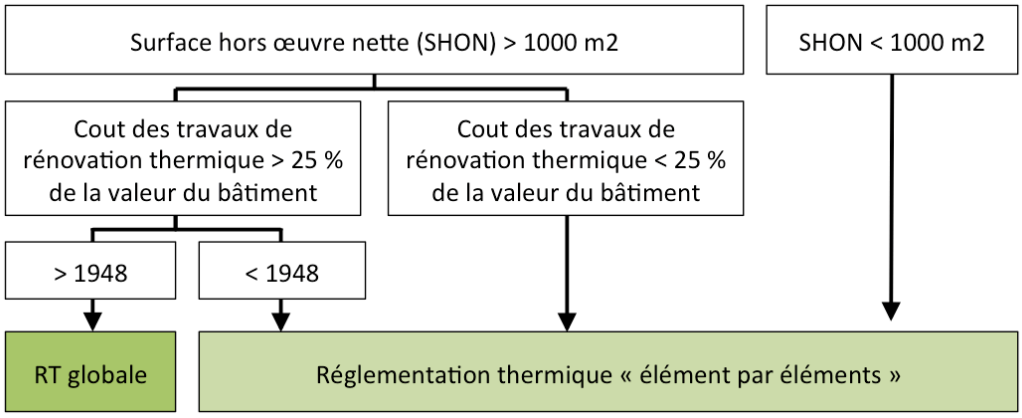


Figure 100 : Rénovation et réglementation thermique (Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie, 2007)

Pour chaque période, les caractéristiques techniques de chaque quartier type ont été définies en collaboration avec les partenaires des projets ACCLIMAT et MUSCADE. En particulier Jean-Luc Salagnac du CSTB est à l'origine de la grande majorité des données concernant la matérialité du bâti (Salagnac, 2013). Le tableau ci-après résume sommairement les principales hypothèses retenues.

Tableau 38 : Principales hypothèses pour les caractéristiques techniques des quartiers types

<table>
<tr><td rowspan="2">Type de quartier</td><td>Centre ancien</td><td>Pavillon continu et discontinu</td><td colspan="2">Immeuble continu et discontinu
Immeuble de grande hauteur</td><td>Bâtiment d'activités</td></tr>
<tr><td>Logement ou bureaux</td><td>Logement</td><td>Logement</td><td>Bureaux</td><td>Industriel, commercial ou agricole</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Murs</td><td>Composé de pierre ou de brique</td><td>Composé de pierre ou de brique avant 1945
-
Composé de béton après 1945</td><td>Composé de pierre ou de brique avant 1945
-
Composé de béton après 1945</td><td>Composé de pierre ou de brique avant 1945
-
Composé de béton après 1945</td><td>Composé de pierre ou de brique avant 1945
-
Composé de béton entre 1945 et 1975
-
Structure métallique après 1975</td></tr>
<tr><td colspan="5">L'isolation augmente graduellement à partir de 1974</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Toit</td><td>En tuile ou en zinc</td><td>Tuile</td><td>Toiture terrasse en béton + étanchéité</td><td>Toiture terrasse en béton + étanchéité</td><td>En tuile avant 1975
-
Structure métallique après 1975</td></tr>
<tr><td colspan="5">L'isolation augmente graduellement à partir de 1974</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Fenêtres</td><td>La fraction de la surface fenêtre sur la surface de façade est fixée entre 0,25 et 0,3</td><td>La fraction de la surface fenêtre sur la surface de façade est fixée à 0,15</td><td>La fraction de la surface fenêtre sur la surface de façade est fixée à 0,4</td><td>La fraction de la surface fenêtre sur la surface de façade est fixée à 0,8</td><td>La fraction de la surface fenêtre sur la surface de façade est nulle.</td></tr>
<tr><td colspan="5">Les performances thermiques augmentent progressivement à partir de 1974</td></tr>
<tr><td>Équipements</td><td colspan="5">Logement :
- VMC simple flux et rafraichissement par ouverture des fenêtres
- Températures de consigne chauffage = 21°
- Pas de climatisation
- Efficacité du système de chauffage selon le combustible (donnée de la carte initiale)
- Protections solaires par fermeture des volets
- Apports internes de 5 W/m^2 de plancher

Bureau et commerce :
- VMC simple flux
- Températures de consigne chauffage = 21°
- climatisation = 23°
- Efficacité des systèmes de chauffage et de climatisation selon le combustible (donnée de la carte initiale)
- Apports internes de 14 W/m^2 de plancher

industriel et agricole :
- ni chauffé, ni climatisé, ni ventilé mécaniquement</td></tr>
</table>

2.6. Validation de la carte initiale

2.6.1. Méthode

Un travail d'analyse s'impose maintenant pour valider la pertinence de la carte archétypale de la métropole parisienne. Dans cet objectif, nous allons utiliser une base de données urbaine apportant des informations précises sur la zone d'étude. Il s'agit du MOS (Modèle d'Occupation des Sols), que nous n'avions pas retenu pour la méthode générale en raison de sa circonscription à l'Ile-de-France. Le MOS a été mis à jour en 2008, il devrait donc être concordant avec la base de données que nous avons générée (IAU - IDF, 2008). Le MOS contient 81 postes, mais seuls les postes ci-dessous vont nous intéresser car ils correspondent à nos quartiers types.

Tableau 39 : Correspondance entre les classes du MOS et les quartiers types (IAU - IDF, 2008)

Poste du MOS et son numéro	Correspondance avec ilots types
14 Parcs ou jardins	Valable quel que soit le type de quartier excepté les bâtiments d'activités
15 Jardins familiaux	Pavillon ou maille non bâtie
16 Jardins de l'habitat	Pavillon ou maille non bâtie
22 Habitat individuel	Pavillon
23 Ensemble d'habitat individuel identique	Pavillon
24 Habitat rural	Pavillon continu
25 Habitat continu bas	Pavillon continu
26 Habitat collectif continu haut	Immeuble continu ou centre ancien
27 Habitat collectif discontinu	Immeuble discontinu
28 Habitat autre	Valable quel que soit le type de quartier excepté les bâtiments d'activités
29 Équipements pour eau, assainissement, énergie	Bâtiments d'activités ou maille non bâtie
30 Zones ou espaces affectés aux activités	Bâtiments d'activités
31 Entrepôts logistiques	Bâtiments d'activités
32 Commerces	Bâtiments d'activités
33 Bureaux (bureaux de plus de 5000 m²)	Immeuble continu, discontinu, immeuble de grande hauteur ou centre ancien accueillants des bureaux
34 à 41 Équipements	Valable quel que soit le type de quartier bâti
42 Emprises de transport ferré 43 Emprises routières 44 Parcs de stationnement	Valable quel que soit le type de quartier
10 Surfaces en herbe non agricoles 13 Vacant rural	Bâtiments d'activités ou maille non bâtie

2.6.2. Analyse

On procède à une intersection de la carte initiale et de la carte du MOS grâce au logiciel SIG ArcGIS. Pour chaque portion de terrain obtenue, on va vérifier si la classe du MOS et le type de quartier sont concordants en se basant sur le Tableau 39. On calcule ensuite le pourcentage de surfaces correctement identifiées.

Comme on peut le voir sur la carte ci-après, on obtient des résultats globaux très bons avec une corrélation surfacique de 91 %. Il est légitime de se demander si ces très bons résultats ne sont pas artificiellement créés par le fait que le GENIUS identifie sans difficulté les ilots non bâtis, ilots largement majoritaires sur la zone d'étude.

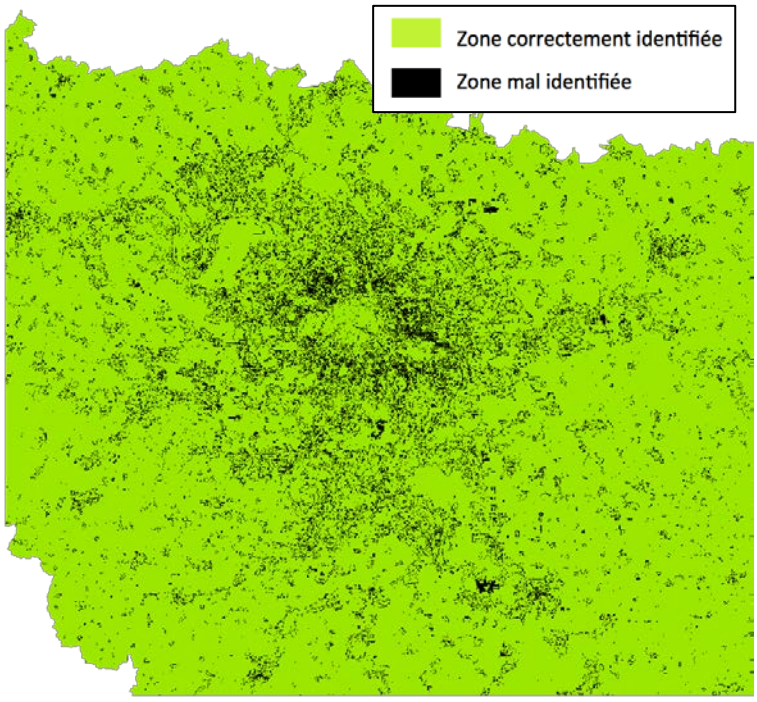


Figure 101 : Carte de validation de la zone d'étude (illustration de l'auteur)

En isolant la zone non construite on observe effectivement un plus fort taux de corrélation de 97%, ce qui conduit à un effet de masse. Cependant, les résultats sur la partie bâtie (Figure 102) restent corrects avec 71% de corrélation.

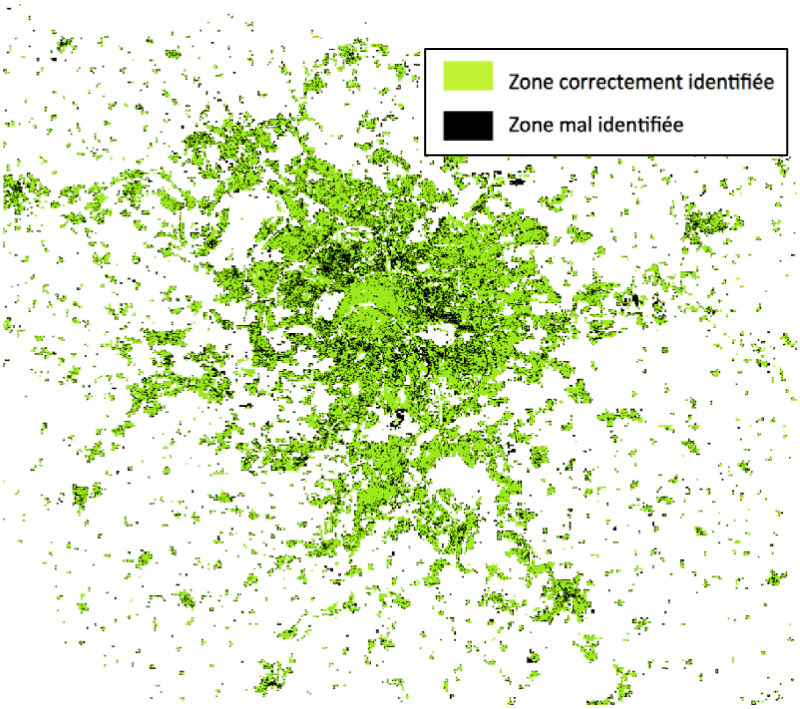


Figure 102 : Carte de validation de la zone bâtie (illustration de l'auteur)

Afin d'affiner notre analyse, nous nous sommes intéressés aux taux de corrélations type par type Tableau 40. Nous avons également observé quelles classes du MOS se trouvaient dans chaque quartier mal identifié (voir de détail de l'analyse en annexe 6).

Tableau 40 : Corrélation par quartier type

Quartier type	Corrélation surfacique
Pavillon discontinu	75,13%
Pavillon continu	76,06%
Immeuble discontinu	56,63%
Immeuble continu	66,54%
Immeuble de grande hauteur	80,53%
Centre ancien	87,28%
Bâtiment d'activités	66,89%

Pour les quartiers pavillonnaires discontinus les erreurs observées proviennent soit de mailles non bâties soit de pavillons continus, c'est à dire des zones relativement proches en termes de morphologie et de densité bâtie. Cette imprécision peut être due au découpage des mailles, mais aussi à de petits écarts entre les bases de données. En effet, on observe que c'est surtout en périphérie de la tâche urbaine que se situent ces erreurs, zones où les

changements sont les plus rapides et où le chevauchement bâti / non bâti est le plus flou. Cependant, le taux de corrélation de 75% reste bon.

Pour les quartiers de pavillons continus, ainsi que d'immeubles continus et discontinus le taux de corrélation surfacique varie de 57% à 76%. Ici aussi, les principales erreurs sont liées à des confusions entre des types de densités très proches. Les immeubles discontinus en particulier sont souvent confondus avec des quartiers pavillonnaires. En effet, en proche périphérie on rencontre beaucoup de zones mixtes entre ces deux typologies discontinues. Ici, c'est donc la taille de nos mailles qui génère des erreurs.

Le taux de corrélation surfacique des immeubles de grande hauteur est très bon (80%). Une partie des erreurs provient de la classe du MOS « commerces ». En effet, nous n'avons pas prévu d'usage « commerce » dans ce type de quartier. Cette hypothèse simplificatrice se révèle donc source d'erreurs. Les zones en eaux sont également mal identifiées lors de la validation. Cela prend tout son sens lorsque l'on sait que les immeubles de grande hauteur sont nombreux en front de Seine. On retrouve donc ici un effet de bord dû à notre maillage.

Pour le centre ancien, les principales sources d'erreurs sont les classes du MOS de type « habitat continu bas » et « habitat collectif discontinu ». On retrouve le phénomène de confusion entre classes de densités proches. Dans le cas de la confusion avec l'habitat continu bas c'est la continuité du tissu qui, traduite en paramètres morphologiques, induit des erreurs d'identification. Cependant, le taux de corrélation de 87% est très bon.

De manière générale, la classe du MOS « zones ou espaces affectés aux activités » apparaît comme une source d'erreur récurrente dans tous les quartiers types. De même, le taux de corrélation surfacique des quartiers d'activité de la carte initiale est de 67%. Sans être mauvais, le taux de corrélation est surprenant car l'identification des quartiers d'activité est directement réalisée via les bases de données de l'IGN. Les principales sources d'erreurs sont les classes du MOS suivantes : « bois ou forêts », « terres labourées », « terrains vacants », « parcs ou jardins » et « habitat individuel ». Le type « bâtiment d'activités » et sa densité globalement faible, est confondu avec les classes du MOS les moins denses. Le taux de corrélation relativement faible peut être expliqué par l'hétérogénéité des surfaces dans les zones d'activités ainsi que par la grande taille de ce type de bâti qui augmente les effets de bords.

De manière générale on constate des erreurs entre des classes d'ilots aux densités proches. Le diagramme ci-après résume ces erreurs.

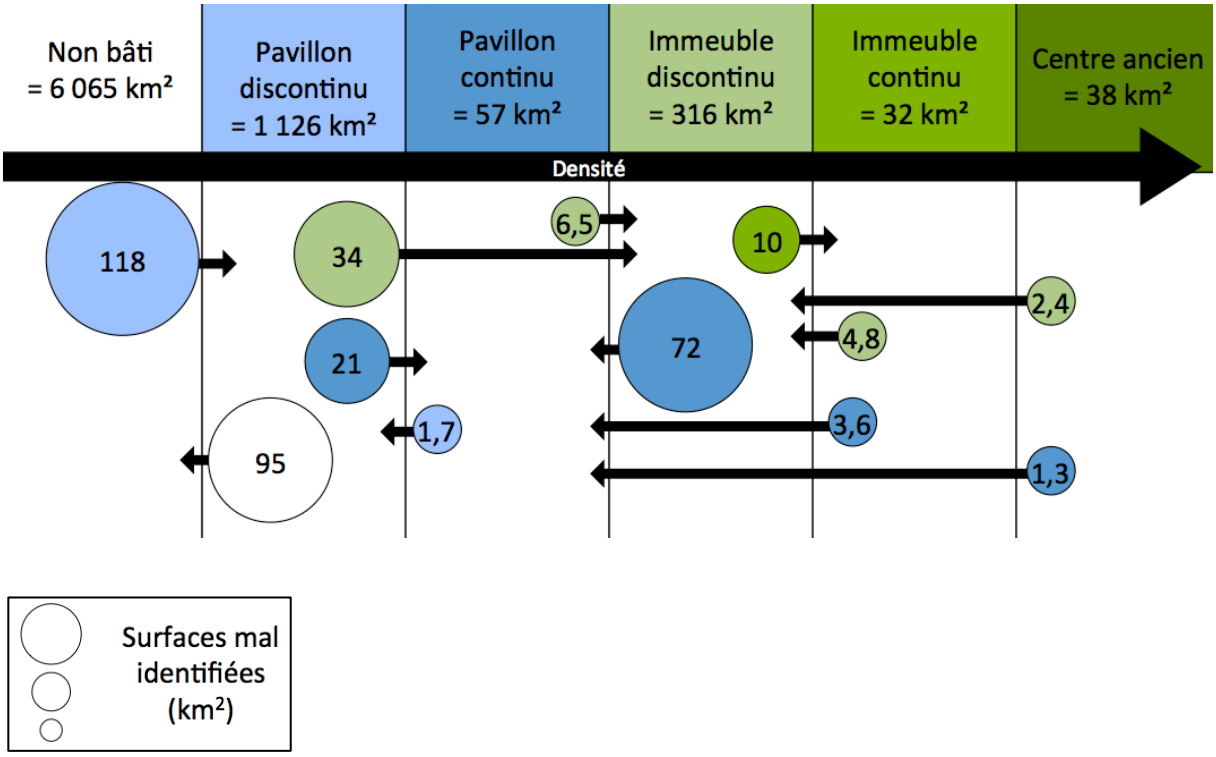


Figure 103 : Diagramme d'analyse croisée des erreurs (illustration de l'auteur)

On constate que globalement c'est le type pavillon discontinu qui a été le plus mal identifié. En effet, il totalise environ 97 kilomètres carrés mal identifiés parmi les 141 kilomètres carrés existants dans la base de données du MOS. Il se trouve que c'est aussi un type de quartier présent en faible proportion sur le territoire. Par conséquent, il est présent de manière plus diffuse dans les mailles et les effets de bords en sont donc accentués.

La précision de cette carte initiale pourrait donc être améliorée en remplaçant le système de maillage orthogonal par un maillage en ilots ou en parcelle qui permettrait de ne pas fractionner les quartiers. Cependant, les résultats sont globalement très satisfaisants et nous permettent de développer la méthode GENIUS.

2.7. Analyse des typologies obtenues

Pour chaque type de quartier obtenu à Paris, nous avons résumé les principales caractéristiques morphologiques dans les tableaux ci-après (voir Tableau 41 page 222). Ainsi, au sein de chaque groupe de quartier, nous observons les valeurs moyennes, minimales et maximales ainsi que les écarts types pour les indicateurs suivants :

- Densité bâtie brute (1)
- Hauteur (1)
- Contigüité (1)
- Compacité (2)
- Coefficient d'emprise au sol (1)
- Largeur de route (2)
- Densité surfacique de route (2)
- Densité surfacique de végétation (2)
- Ratio du nombre de logements collectifs sur le nombre de logements individuels (1)

En effet, les paramètres marqués d'un (1) sont apparus au cours de l'analyse statistique comme les plus significatifs pour distinguer les types de quartiers. Nous avons également ajouté des paramètres liés à la route, à la végétation et à la compacité bâtie (2) qui nous semblaient pertinents pour caractériser les quartiers.

Par ailleurs, nous observons aussi la répartition des quartiers selon les dates de construction afin de comprendre l'histoire de ces typologies.

2.7.1. Pavillon discontinu

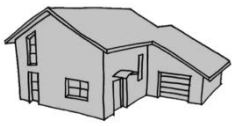


Figure 104 : illustration du type de quartier « pavillon discontinu » (illustration de l'auteur)

Ce type est le plus fréquemment rencontré puisqu'il couvre la majorité de la zone étudiée (plus de 69%), principalement en périphérie de la ville. Cela est cohérent d'un point de vue socio-culturel puisque l'on peut dire que la plupart des ménages souhaitent vivre dans des maisons individuelles. En effet, comme évoqué dans le chapitre 2.1.3 de la première partie du mémoire, selon une enquête menée en France en 2007 par TNS Sofres pour

l'Observatoire de la Ville, 87% des ménages français préfèrent vivre dans des maisons individuelles (TNS Sofres, 2007).

Tous les bâtiments de ce type de quartier sont des bâtiments résidentiels présentant une morphologie homogène. Comme nous l'avions imaginé, la densité bâtie brute des logements individuels est faible (environ 0,3), leur hauteur moyenne est de 6,6 m (soient deux niveaux), et la contiguïté comme la compacité sont faibles (la contiguïté moyenne est de 0,03 et la compacité moyenne est de 4,7). Nous observons des disparités de densité des espaces verts : bien que plus élevée que dans les autres typologies, elle diminue à mesure que la densité surfacique de routes augmente et que l'on se rapproche du centre-ville. L'explication est liée à la forme historique des villes européennes mais elle est aussi d'ordre économique : le prix de l'immobilier augmente à proximité du centre-ville, les ménages ne peuvent donc plus se permettre de grands jardins.

2.7.2. Pavillon continu

Figure 105 : illustration du type de quartier « pavillon continu » (illustration de l'auteur)

Avec 3% des surfaces, les logements individuels mitoyens représentent une transition entre le centre-ville et la périphérie résidentielle. Ces bâtiments de logement sont relativement homogènes dans leur morphologie et similaires au type « pavillon discontinu ». Les principales différences concernent la densité bâtie brute qui est légèrement plus élevé (avec une densité moyenne de 0,7), tout comme la hauteur moyenne (9,9 m, soient trois niveaux) et la contiguïté (environ 0,04). En raison de leur emplacement dans la ville, ce type de logement individuel a une densité de végétation plus faible et une plus grande densité de routes.

Pour les deux types de pavillons continus et discontinus, les âges des bâtiments montrent que ces morphologies ont été construites de manière continue à travers le temps. En effet, le logement individuel a été et est toujours une référence pour les ménages. Dans les deux cas, nous pouvons observer une augmentation dans la construction entre 1949 et 1974, ce qui correspond à la nécessité et à la volonté politique de construire en grande quantité après la guerre.

2.7.3. Immeuble discontinu

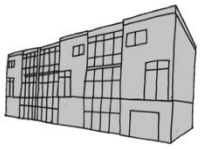


Figure 106 : illustration du type de quartier « immeuble discontinu » (illustration de l'auteur)

Ces quartiers représentent 18% de la zone étudiée. Ils sont principalement résidentiels, mais 11,5% d'entre eux sont des immeubles de bureaux. Les immeubles discontinus sont moins homogènes que les logements individuels. Ils peuvent facilement être caractérisés par de fortes compacités (5,2) et de fortes hauteurs (13,9 m, soit environ 5 niveaux). Malgré cela, leur densité bâtie brute n'est pas très élevée (0,8 pour la densité moyenne de construction), le terrain étant en grande partie occupé par les routes et les espaces verts (parcs ou terrains vagues).

2.7.4. Immeuble continu

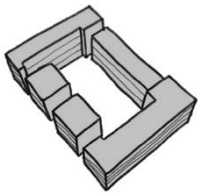


Figure 107 : illustration du type de quartier « immeuble continu » (illustration de l'auteur)

Les immeubles continus sont des typologies fréquemment rencontrées dans les zones denses à proximité du centre-ville ou dans d'autres centralités. Ils représentent moins de 2% de la zone étudiée. Leurs hauteurs ne sont pas très différentes des immeubles discontinus (18,4 m soit 6 niveaux), mais leur densité bâtie brute est deux fois plus élevée (2.1) en raison d'une forte contiguïté (0,29). Ces bâtiments sont souvent des logements, mais peuvent être occupés par des bureaux (11,1%) ou des commerces, en particulier en rez-de-chaussée. Nous pouvons observer qu'un grand nombre de ces bâtiments ont été construits avant 1949 et le mouvement hygiéniste. Il s'agit donc d'un type globalement très proche du centre ancien. Les quartiers de ce type construits à partir des années 2000 demeurent une faible part des quartiers de la ville.

2.7.5. Centre ancien

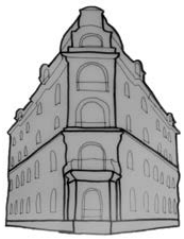


Figure 108 : illustration du type de quartier « centre ancien » (illustration de l'auteur)

Ces ilots types ne représentent que 2% de la zone étudiée, mais ils sont sans doute les plus représentatifs du centre de Paris. On distingue principalement les bâtiments de type médiéval ou haussmannien. Leur plan de masse est donc très facilement reconnaissable, en particulier grâce aux cours qui les composent. Le type « centre ancien » présente la plus forte densité bâtie avec une densité bâtie brute moyenne de 3,1 et une densité bâtie brute maximale de 4,9. Cette morphologie est très proche des immeubles continus mais elle est plus homogène. Ces bâtiments, situés dans le centre de Paris, sont des bureaux (pour 11,4%) ou des bâtiments d'habitation (pour 88,6%). Comme on s'y attendait, la quasi-totalité de ces bâtiments ont été construits avant 1949.

2.7.6. Immeuble de grande hauteur

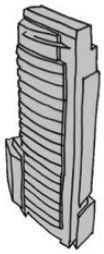


Figure 109 : illustration du type de quartier « immeuble de grande hauteur » (illustration de l'auteur)

Paris est l'une des rares capitales avec peu de gratte-ciels. Par conséquent, les tours de grande hauteur ne représentent que 0,35% de la zone étudiée. Ces bâtiments sont soit des grands ensembles construits dans les années 1960-1970 (dans l'après-guerre, l'industrialisation de la construction est apparue comme une solution à la crise du logement), soit des tours de bureaux. Malgré leur hétérogénéité, ils sont facilement reconnaissables à leurs hauteurs (40 m en moyenne soient 13 niveaux, et jusqu'à 85 m soit 28 niveaux).

Leur compacité n'est pas parmi les plus élevées (5,0) et leur contiguïté est assez faible (autour de 0,2). En effet, l'allongement des tours les éloigne de la sphère, forme la plus compacte qui soit.

La densité bâtie brute est moyenne (environ 2,6), malgré l'influence des grandes hauteurs. En effet, le sol est en grande partie occupé par des espaces verts et des emprises routières. Notons toutefois que la densité bâtie brute maximale dans Paris (9,77) est attribuée à un quartier de tours de grande hauteur.

La répartition des âges des bâtiments montre que, dans leur majorité, ces morphologies n'ont été construites ni avant 1949 (pour des raisons principalement techniques), ni après 1989 (après 1970, la construction de grands ensembles a été arrêtée en raison des problèmes sociaux et urbains causés).

2.7.7. Bâtiment d'activités

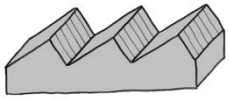


Figure 110 : illustration du type de quartier « bâtiment d'activités » (illustration de l'auteur)

Les bâtiments d'activités, souvent négligés dans les études morphologiques urbaines, représentent plus de 5% de la zone étudiée. Ces bâtiments sont pour la plupart industriels (81,2%), mais aussi commerciaux (15,8%) et agricoles (3%). Ils sont fortement hétérogènes, mais leur principale similitude est leur emprise au sol de grande taille. L'âge des bâtiments montre que ces morphologies ont été construites en continu à travers les temps.

2.7.8. Conclusion

Les différents groupes de quartiers identifiés correspondent bien à nos hypothèses initiales en termes de morphologie. On peut donc dire que notre choix de typologie permet de représenter la ville de Paris dans sa diversité typo-morphologique.

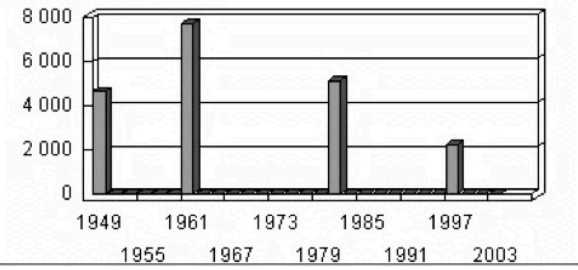
La même méthode a été appliquée à la ville de Toulouse pour des résultats similaires, même si on note que la répartition des types de quartier diffère d'une ville à l'autre (voir le chapitre 2 de la troisième partie de ce mémoire). En effet, comme on a pu le voir précédemment, l'agglomération de Toulouse est moins étendue mais surtout beaucoup moins dense, on y rencontre donc beaucoup plus de quartiers pavillonnaires en proportion.

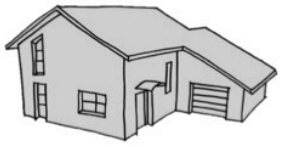
Tableau 41 : Caractéristiques morphologiques des 7 types de quartiers

Pavillon discontinu

Nombre de maille : 69,30 %

Répartition par âge :



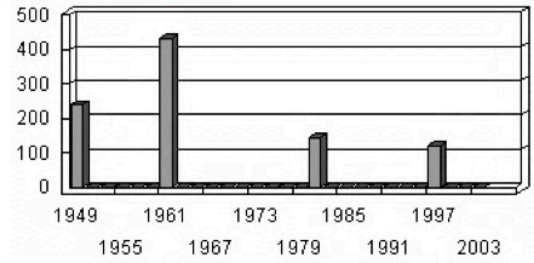


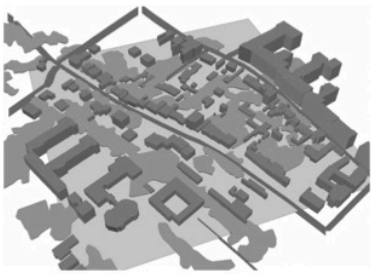
Densité bâtie brute (hors activité)	0,05	0,27	0,60	9,77	Écart type : 0,131
Hauteur	2,00	2,45	6,64	19,64	85,45
	Écart type : 1,951		Écart type moyen dans la maille: 2,056		
Contigüité	0,00	0,03	0,51	1,00	Écart type : 0,050
Compacité	0,00	4,74	13,05	15,92	Écart type : 1,995
CES	0,05	0,12	0,38	1,00	Écart type : 0,049
Largeur route	0,00	3,39	9,41	15,50	Écart type : 0,965
Densité de route	0,00	0,11	0,39	0,60	Écart type : 0,046
Densité de végétation	0,00	0,23		1,00	Écart type : 0,180
Collectif / Individuel	0,00	0,33		1,00	Écart type : 0,255

Pavillon continu

Nombre de maille : 3,30 %

Répartition par âge :



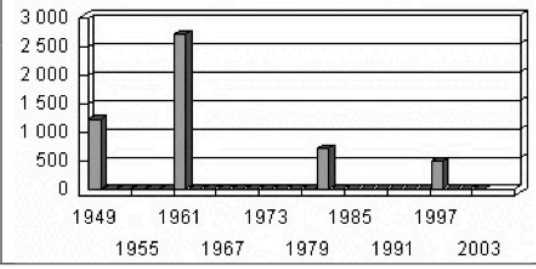


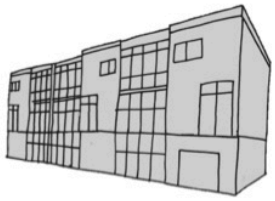
Densité bâtie brute (hors activité)	0,05	0,60	**0,70**	1,17	9,77
	Écart type : 0,093				
Hauteur	2,00	6,09	**9,94**	21,91	85,45
	Écart type : 1,869		Écart type moyen dans la maille: 3,409		
Contigüité	0,00		**0,04**	0,30	1,00
	Écart type : 0,051				
Compacité	0,00		**4,91**	9,20	15,92
	Écart type : 2,514				
CES	0,05	0,10	**0,22**	0,35	1,00
	Écart type : 0,039				
Largeur route	0,00	0,48	**3,49**	6,70	15,50
	Écart type : 0,763				
Densité de route	0,00	0,01	**0,13**	0,30	0,60
	Écart type : 0,036				
Densité de végétation	0,00		**0,18**	0,91	1,00
	Écart type : 0,137				
Collectif / Individuel	0,00			**0,56**	1,00
	Écart type : 0,215				

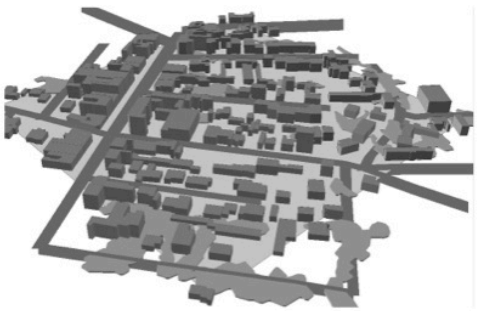
Immeuble discontinu

Nombre de maille : 17,94 %

Répartition par âge :





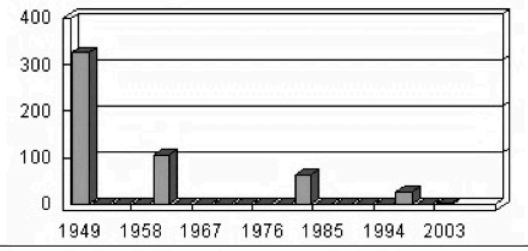


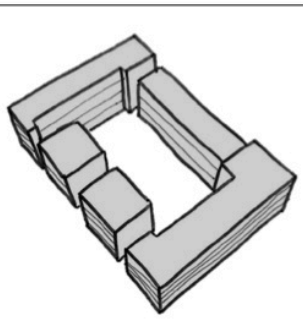
Densité bâtie brute (hors activité)	0,05 — 0,11 — **0,82** — 1,80 — 9,77 Écart type : 0,358
Hauteur	2,00 — 4,46 — **13,91** — 29,83 — 85,45 Écart type : 4,388 Écart type moyen dans la maille: 6,230
Contigüité	0,00 — **0,12** — 0,88 — 1,00 Écart type : 0,107
Compacité	0,00 — **5,21** — 15,92 Écart type : 2,265
CES	0,05 — **0,19** — 0,51 — 1,00 Écart type : 0,076
Largeur route	0,00 — **4,01** — 15,50 Écart type : 1,43
Densité de route	0,00 — **0,18** — 0,58 — 0,60 Écart type : 0,071
Densité de végétation	0,00 — **0,18** — 0,85 — 1,00 Écart type : 0,121
Collectif / Individuel	0,00 — **0,84** — 1,00 Écart type : 0,172

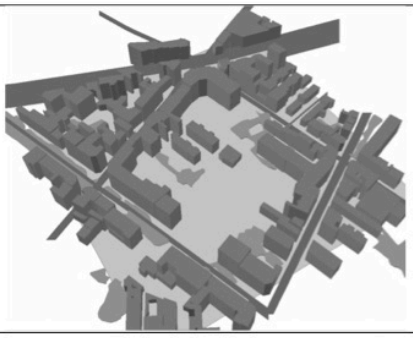
Immeuble continu

Nombre de maille : 1,81%

Répartition par âge :





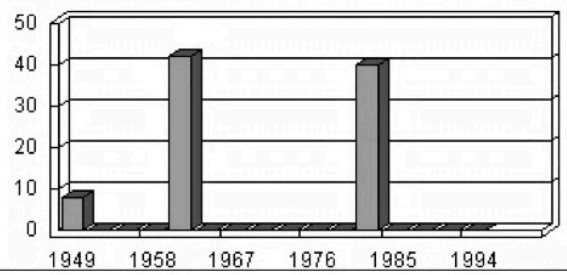


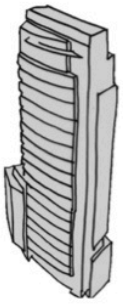
Densité bâtie brute (hors activité)	0,05 — 1,80 — **2,13** — 2,50 — 9,77 Écart type : 0,201
Hauteur	2,00 — 11,36 — **18,37** — 29,95 — 85,45 Écart type : 2,988 Écart type moyen dans la maille: 7,481
Contigüité	0,00 — **0,29** — 0,71 — 1,00 Écart type : 0,112
Compacité	0,00 — **4,65** — 15,16 — 15,92 Écart type : 1,935
CES	0,05 — 0,21 — **0,36** — 0,54 — 1,00 Écart type : 0,059
Largeur route	0,00 — 0,60 — **4,47** — 10,35 — 15,50 Écart type : 1,400
Densité de route	0,00 — 0,02 — **0,19** — 0,53 — 0,60 Écart type : 0,068
Densité de végétation	0,00 — **0,14** — 0,43 — 1,00 Écart type : 0,083
Collectif / Individuel	0,00 — 0,12 — **0,97** — 1,00 Écart type : 0,071

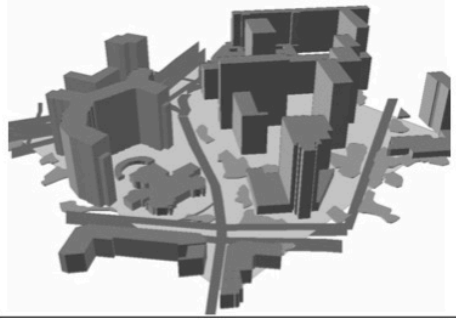
Immeuble de grande hauteur

Nombre de maille : 0,35 %

Répartition par âge :





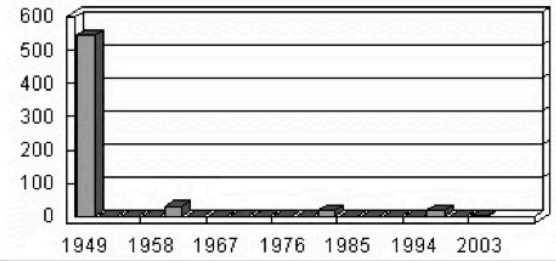


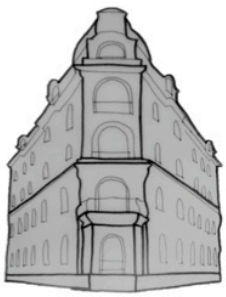
Densité bâtie brute (hors activité)	0,05 — 0,58 — **2,64** — 9,77 Écart type : 1,943
Hauteur	2,00 — 20,84 — **40,13** — 85,33 Écart type : 13,483 Écart type moyen dans la maille: 23,211
Contigüité	0,00 — **0,18** — 0,67 — 1,00 Écart type : 0,161
Compacité	0,00 — **5,08** — 9,51 — 15,92 Écart type : 2,527
CES	0,05 — 0,06 — **0,21** — 0,51 — 1,00 Écart type : 0,11
Largeur route	0,00 — **4,02** — 9,24 — 15,50 Écart type : 1,684
Densité de route	0,00 — **0,22** — 0,60 Écart type : 0,114
Densité de végétation	0,00 — **0,14** — 0,47 — 1,00 Écart type : 0,106
Collectif / Individuel	0,00 — 0,69 — **0,97** — 1,00 Écart type : 0,049

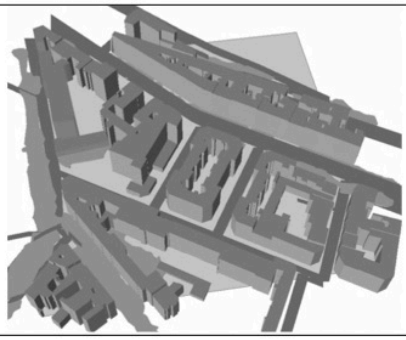
Centre ancien

Nombre de maille : 2,14 %

Répartition par âge :





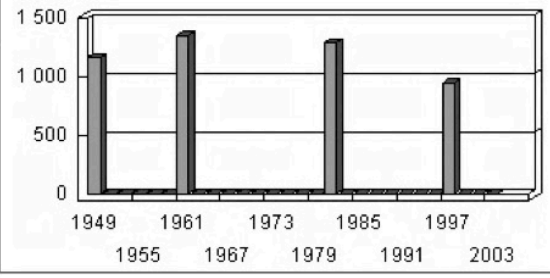


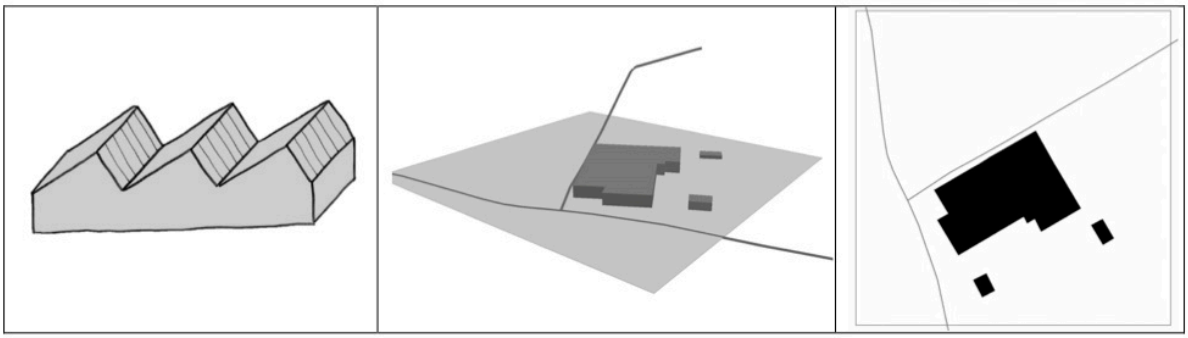
Densité bâtie brute (hors activité)	0,05 — 2,50 — **3,16** — 4,93 — 9,77 Écart type : 0,505
Hauteur	2,00 — 13,88 — **19,92** — 29,81 — 85,45 Écart type : 2,793 Écart type moyen dans la maille: 6,039
Contigüité	0,00 — **0,39** — 0,64 — 1,00 Écart type : 0,105
Compacité	0,00 — 0,13 — **4,39** — 12,99 — 15,92 Écart type : 1,362
CES	0,05 — 0,27 — **0,48** — 0,69 — 1,00 Écart type : 0,078
Largeur route	0,00 — 2,32 — **4,89** — 9,11 — 15,50 Écart type : 1,286
Densité de route	0,00 — 0,08 — **0,21** — 0,44 — 0,60 Écart type : 0,063
Densité de végétation	0,00 — **0,10** — 0,55 — 1,00 Écart type : 0,064
Collectif / Individuel	0,00 — **0,99** — 1,00 Écart type : 0,042

Bâtiment d'activité

Nombre de maille : 5,16 %

Répartition par âge :





Densité bâtie brute (hors activité)	0,00 **0,05** 2,30 — 9,77 Écart type : 0,101
Hauteur	2,00 **10,37** — 85,45 Écart type : 4,826 Écart type moyen dans la maille: 1,357
Contigüité	0,00 **0,03** — 1,00 Écart type : 0,085
Compacité	0,00 **3,05** 11,18 — 15,92 Écart type : 2,780
CES	0,05 **0,13** — 1,00 Écart type : 0,109
Largeur route	0,00 **3,81** 14,74 — 15,50 Écart type : 1,963
Densité de route	0,00 **0,10** 0,51 — 0,60 Écart type : 0,075
Densité de végétation	0,00 **0,10** 0,89 — 1,00 Écart type : 0,136

2.8. GENIUS synchronique : discussion

Comme nous l'avons vu dans le chapitre 3.2 de la première partie du mémoire, il n'existe actuellement que très peu de bases de données urbaines contenant l'ensemble des informations nécessaires aux différentes disciplines de l'énergétique urbaine (en particulier en ce qui concerne la matérialité et la typologie des bâtiments). En ce sens, la méthode synchronique de GENIUS et les base de données générées sont des contributions concrètes à la recherche en énergétique urbaine.

La méthode en elle-même est générique et peut s'appliquer à d'autres cas d'études. En particulier, nous avons déterminé les indicateurs les plus significatifs pour identifier une typologie, la taille de maille la plus adaptée pour diviser le territoire et avons proposé une première méthode de classification automatique des quartiers.

Nous avions également identifié dans le chapitre 3.2 de la première partie le vide méthodologique entre l'échelle du bâtiment et celle de la ville. Un des objectifs décrit dans le chapitre 4 de la première partie était de faire le lien entre les problématiques d'énergétique urbaine traitées à ces deux échelles. La méthode synchronique de GENIUS nous a permis d'atteindre cet objectif : la base de données urbaine produite recouvre un vaste territoire tout en fournissant des données précises et localisées à l'échelle du quartier et du bâti qui composent la ville (matérialité, équipement de chauffage, forme architecturale, etc.). Certes, l'agrégation de ces données au sein de mailles de 250 mètres par 250 mètres induit quelques erreurs et approximations, mais elle permet de réaliser des simulations à l'échelle de l'agglomération comme à celle du quartier. Cette méthode permet donc de faire un lien entre la morphologie d'un quartier, sa localisation dans la ville et, comme nous le verrons par la suite, ses performances énergétiques.

Cependant, il est utile de préciser que des améliorations peuvent être envisagées pour consolider la méthode synchronique de GENIUS.

En ce qui concerne le choix des typologies, celles que nous avons proposées sont valables pour Toulouse et Paris mais ne rendent pas forcement compte de la diversité architecturale que l'on rencontre en France et dans le monde, tant du point de vue des formes urbaines que de la matérialité des bâtiments. Bien que d'après Salat ces archétypes urbains soient partagés par la plupart des grandes villes (Salat, 2011a), il pourrait être utile de s'intéresser à une architecture plus locale dépendant de la région, du climat et de la taille des communes. En particulier, le comportement thermique de l'architecture vernaculaire pourrait nous apprendre beaucoup sur les liens entre ville, climat et énergie. En effet, dans l'habitat

traditionnel, le climat conditionne en partie la forme et le choix des matériaux au travers de savoirs qui se transmettent de générations en générations (Griffiths, 1976).

En ce qui concerne l'identification automatique des types de quartiers, l'une des améliorations possibles de notre méthode pourrait être d'explorer des procédés statistiques d'affectation (ou classification supervisée). Jusqu'à présent, notre travail se basait sur une méthode de classification non supervisée. L'analyse statistique était donc menée sur l'ensemble des quartiers et permettait de les répartir en classes. A l'inverse, les méthodes de classification supervisée sont caractérisées par une phase d'apprentissage qui consiste à établir des règles de classification à partir des connaissances disponibles a priori. On peut ensuite affecter tout nouvel individu à une classe ou à une autre. Ces méthodes n'ont pas pu être explorées dans cette thèse. Cependant, elles feront l'objet du projet de recherche MApUCE (Modélisation Appliquée et droit de l'Urbanisme : Climat urbain et Énergie), suite et développement des projets MUSCADE et ACCLIMAT (voir chapitre 2 de la troisième partie). Un des objectifs de ce projet est de tester plusieurs méthodes de classification supervisée des quartiers (k plus proches voisins, arbres de décisions, réseaux de neurones, etc.). Le but est d'augmenter la précision de la classification tout en prenant en compte des règles expertes issues des entretiens menés auprès de professionnels de l'urbanisme. De plus, nous avons fait le choix dans ce travail de favoriser l'expertise urbaine par rapport à l'expertise issue du travail statistique (notamment sur le choix du nombre de classe et sur le choix de la méthode de classification). Au vu des résultats, ce choix semble valide. Cependant, une méthode d'apprentissage supervisée permettrait d'associer les avantages des deux méthodes : connaissances des urbanistes et rigueur des outils statistiques.

Par ailleurs, le travail de classification que nous avons mené a dû être répété deux fois, pour Paris et Toulouse. Une des perspectives du projet MApUCE est de le généraliser à une partie du territoire français. Cependant, l'analyse statistique est longue et complexe à généraliser sur plusieurs villes. Lors de l'analyse des méthodes de classification supervisée qui sera menée dans le projet MApUCE, une étude comparative permettra de déterminer si cette méthode est applicable à l'ensemble des villes françaises ou si des seuils différenciés doivent être appliqués au cas par cas. Une méthodologie sera alors proposée pour établir les seuils d'attribution des typologies quelle que soit la ville.

L'une des autres améliorations que nous jugeons nécessaire est d'établir cette typologie non plus sur un maillage orthogonal mais sur l'emprise au sol des parcelles existantes ou des ilots urbains. Cela permettrait plus d'homogénéité dans les quartiers types et éviterait les effets de bord dans le calcul des paramètres. En effet, la trame urbaine est un élément fondamental de l'évolutivité de la ville. D'après (Darley & Zunino, 2010) les tracés des voies qui déterminent cette trame sont les éléments les plus stables dans l'histoire urbaine. De même, les découpages en lots de propriétés sont des éléments fondamentaux car leur

héritage demeure sur de longues périodes. Ce découpage conditionne d'ailleurs en partie la constructibilité et donc les formes urbaines possibles. Jusqu'à présent, la prise en compte de ce découpage n'avait pas été envisageable car l'IGN n'avait pas finalisé la vectorisation des parcelles sur tout le territoire : en 2012, seul 76 % du territoire français était couvert par la vectorisation du parcellaire (IGN, 2012b). L'avancée de ce travail nous permet désormais une amélioration de notre maillage.

Enfin, les bases de données générées grâce à GENIUS font l'objet de perspectives d'utilisation en dehors du contexte de cette thèse. Les données produites sur Toulouse et Paris sont actuellement utilisées par des étudiants de l'ENSA (École Nationale Supérieure d'Architecture) et de l'INSA (Institut National des Sciences Appliquées) afin de réaliser des diagnostics « énergie / climat » pour des projets d'aménagements urbains. Par ailleurs, les données concernant le bâti, les routes et les espaces verts dans Paris et son agglomération ont été utilisées dans le cadre d'une thèse visant à simuler la faisabilité et les effets microclimatiques de différentes stratégies de verdissement de la ville (de Munck, 2013).

3. Modélisation diachronique – Une base de données urbaines évolutive

3.1. Problématique

Nous avons vu dans le chapitre 3.3 de la première partie que l'une des difficultés des études d'énergétique urbaine réside dans le manque de données disponibles sur un horizon temporel lointain. Notre objectif est donc de proposer des bases de données urbaines évolutives.

Dans cette perspective, on va donc s'appuyer sur un modèle prospectif d'expansion urbaine de manière à faire évoluer la base de données synchronique de GENIUS.

Il est avant tout nécessaire de comprendre les mécanismes qui gouvernent les évolutions urbaines. En effet, les villes ne cessent d'évoluer au gré des pratiques architecturales et urbaines, des cultures, des usages, etc. Cependant, ces évolutions se distinguent d'une ville à l'autre aussi bien que d'un quartier à l'autre.

Plusieurs raisons peuvent expliquer ces différences dans les rythmes et les modes d'évolution urbaine.

Il y a avant tout, d'après Darley et Zunino, une raison économique. De nombreux auteurs analysent l'existence même des villes comme un phénomène économique. La ville permet par exemple de mettre en contact l'offre et la demande (de biens, de services, d'emplois, etc.) (Rogers, 2000). L'emplacement des villes dans un territoire donné résulte d'ailleurs souvent de critères économiques (ressources, voies et échanges commerciaux, etc.). Leur développement est également très largement influencé par des dynamiques de marché économique. Dans les années 1950, des chercheurs développent la théorie que la structure de la ville résulte des variations des prix de l'immobilier, eux même dépendant de l'accessibilité en transport des différents secteurs (Alonso, 1964; Clark, 1958; Hansen, 1959). D'une part, les ménages choisiraient l'emplacement de leur logement en réalisant un arbitrage entre la proximité au centre-ville (emplois, aménités*), les prix de l'immobilier (plus élevés au centre où il y a plus de demande) et les prix des transports. D'autre part, les investisseurs immobiliers construiraient plus dense là où le prix du mètre carré de terrain est plus cher de manière à rentabiliser l'investissement. Bien que cette théorie ait des limites, elle est à la base de nombreux modèles prospectifs d'expansion urbaine actuels et montre l'importance du facteur économique dans le développement urbain (Viguié, 2012). En terme

* Voir glossaire

de rythme d'évolution, Darley et Zunino rappellent que « les mutations urbaines sont d'autant plus rapides que la rentabilité du nouvel usage du foncier et/ou de l'immobilier est élevée » (Darley & Zunino, 2010).

Les évolutions démographiques (naissances, décès, solde migratoire, etc.) vont aussi conditionner le développement urbain en lien avec les évolution sociales (taille des ménages) et économiques (attractivité de la ville ou du quartier) (Viguié, 2012).

La volonté politique ainsi que sa traduction dans les projets d'aménagement et/ou les documents d'urbanisme joue également un rôle important sur les rythmes d'évolution d'un tissu urbain (Viguié, 2012).

Pour finir, la typologie du tissu urbain, à travers son découpage et le type de bâti, rend plus ou moins évidente les transformations (reconversions, extensions, destruction et reconstruction, etc.) (Darley & Zunino, 2010).

Si les trois premiers facteurs - économique, démographique et politique - ont largement été abordés au travers des modèles prospectifs d'expansion urbaine (voir chapitre 3.3.2 de la première partie), ce n'est pas le cas de la typologie du tissu urbain. Notre approche sera donc centrée sur l'influence du tissu urbain existant sur l'évolution locale de la ville avec comme hypothèse principale que le tissu urbain futur dépendra en grande partie du tissu urbain existant à proximité. On peut ici trouver un parallèle avec la première loi de la géographie telle que l'a énoncée Tobler en 1970 : « Everything is related to everything else, but near things are more related than distant things » - tout est lié, mais les choses proches sont plus liées que les choses éloignées (Tobler, 1970).

3.2. Choix d'un modèle prospectif d'expansion urbaine

3.2.1. Comparaison des modèles existants

Une analyse bibliographique réalisée précédemment (voir chapitre 3.3.2 de la première partie) nous a permis d'identifier le type de modèle le plus adapté à notre problématique. Il s'agit des modèles dynamiques qui présentent plusieurs avantages tels que la prise en compte d'une vaste gamme de mécanismes et de leurs interactions mais surtout la prise en compte des différentes temporalités de ces mécanismes ce qui les rend pertinents sur le long terme.

Nous avons sélectionné des logiciels susceptibles de correspondre à nos attentes parmi les plus fréquemment utilisés en prospective urbaine et les avons comparés afin de choisir un modèle compatible avec nos bases de données.

TRANUS

Le modèle TRANUS est développé par De la Barra et Perez depuis 1982 (De la Barra & Rickaby, 1982). Il peut être appliqué à l'échelle urbaine ou régionale et permet de simuler les impacts des politiques de transport et d'urbanisation et de les évaluer du point de vue social, économique et financier.

TRANUS est composé d'un premier module d'urbanisation qui estime la localisation des ménages et des entreprises dans les différentes zones selon des mécanismes de marché économique. Ce module distingue les activités d'export en dehors de l'aire d'étude et les activités répondant à des besoins locaux. Cela permet une plus grande précision dans la localisation des ménages et des entreprises les uns par rapport aux autres.

Le modèle simule ensuite les flux, les modes et les coûts de transport. L'hypothèse principale est que la demande de déplacement découle des interactions économiques entre les différentes activités (le transport et l'occupation du sol sont considérés comme des marchés où l'interaction entre l'offre et la demande détermine le prix du transport et du sol).

Les disponibilités foncières et le réseau de transport sont modifiés à chaque horizon temporel et le modèle calcule la localisation des ménages et des emplois, le prix du foncier et les déplacements avec leur affectation par mode sur le réseau.

Même si on trouve de nombreuses applications du modèle TRANUS, il est considéré comme un modèle difficile à calibrer, nécessitant de très grosses bases de données pour pouvoir être mis en œuvre (Deymier & Nicolas, 2005).

MEPLAN

Le modèle MEPLAN a été développé par Echenique (Marcial H. Echenique et al., 1990). Il est utilisé dans de nombreuses études de planification, à l'échelle urbaine ou régionale. Echenique et son équipe ont fait évoluer ce modèle vers MENTOR, qui possède la même structure de MEPLAN, mais qui fonctionne à un niveau plus désagrégé de segmentation des activités.

La base du modèle, très proche de TRANUS, contient plusieurs modules interconnectés. Un premier module d'usage du sol modélise la localisation spatiale des activités (l'emploi et les ménages) et génère les déplacements entre les zones.

Un second module de transport affecte les flux aux différents modes de transport et itinéraires. Comme dans le cas de TRANUS, ces modules fonctionnent sur la base de rétroactions entre transport et usage du sol d'une période de temps à la suivante (modèle dynamique).

Pour finir, un module d'évaluation fournit des indices tels que la vitesse moyenne, les émissions de gaz à effet de serre, la consommation d'énergie, etc.

Ce modèle comme le précédent, ne peut être utilisé dans notre étude. En effet, les modèles de ce type sont extrêmement complexes et nécessitent de nombreuses données de calibration. En particulier, le niveau de détail attendu sur la localisation et le type d'activité semble incompatible avec le manque de base de données sur les entreprises et les emplois que nous avons constatés dans le chapitre 2.5.1. Nous allons donc nous intéresser à des modèles prospectifs d'évolution urbaine plus simples, bien que toujours dynamiques.

NEDUM

NEDUM est un modèle développé par Gusdorf, Hallegatte et Viguié (Gusdorf, Hallegatte, & Lahellec, 2008; Gusdorf & Hallegatte, 2007; Viguié, 2012) dans le laboratoire CIRED (Centre International de Recherche sur l'Environnement et le Développement (CIRED, 2013)). Comme les modèles cités précédemment, NEDUM se base sur l'hypothèse que le transport

et l'occupation du sol sont des marchés économiques où l'interaction entre l'offre et la demande détermine le prix du transport et du sol.

Cependant, ce modèle a la particularité de se centrer sur la localisation des ménages et de faire l'hypothèse que la ville concentre son attractivité au centre (ville mono-centrique). Ainsi, ce modèle se libère de la contrainte de localiser précisément les types d'entreprises. Le mécanisme principal qui gouverne l'évolution de la ville dans NEDUM est donc l'arbitrage que font les ménages entre coût des transports, coût des loyers et attractivité du centre-ville.

NEDUM présente également l'avantage de prendre en compte différents scénarios de politiques urbaines. Par exemple il prend en compte des contraintes telles que des zones non constructibles, des zones protégées pour leur patrimoine historique ou naturel, des zones où la densité est limitée par des plans locaux d'urbanisme, etc.

Il est cependant nécessaire de noter que NEDUM présente des inconvénients. D'une part, comme on vient de l'évoquer, il ne fait pas évoluer la localisation des entreprises. Cependant, dans le cas de notre problématique, cet inconvénient n'est pas retenu puisque nous ne sommes pas en mesure de localiser la position initiale des entreprises en l'état actuel des bases de données urbaines.

D'autre part, et cela est plus problématique, la mono-centralité de NEDUM nous contraint dans les perspectives d'évolution de la ville (même s'il elle correspond à la situation actuelle de beaucoup de villes françaises). Or, nous avons pu voir dans le chapitre 1.2.3 de la première partie que la structure plus ou moins polycentrique d'une ville avait un impact primordial sur les consommations liées aux transports.

Finalement, NEDUM étant un modèle économique et non pas un modèle géographique, il ne prend que peu ou pas en compte les contraintes d'occupation du sol comme la pente du terrain, la présence de bâti existant, la présence d'axes routiers, l'ensoleillement, etc.

Afin de pallier ces inconvénients, les concepteurs de NEDUM se sont rapprochés du laboratoire de géographie toulousain GEODE (GEOgraphie De l'Environnement (GEODE, 2013) afin de développer un nouveau modèle : SLEDUM.

SLEDUM

SLEDUM résulte du croisement de deux modèles : SLEUTH et NEDUM. Le coupage de ces deux modèles a été réalisé par les laboratoires CIRED et GEODE dans le cadre des projets de recherches ACCLIMAT et MUSCADE.

SLEUTH n'est pas un modèle dynamique au sens de ce que nous avons présenté dans le chapitre 3.3.2 de la première partie, mais un modèle géographique (Clarke et al., 2007). Ce modèle permet de répartir les zones nouvellement urbanisées selon trois modes : (1) en continuité du bâti existant (selon un algorithme du type agrégation limité par diffusion), (2) à proximité des routes (selon un algorithme similaire) ou (3) par mitage* (selon une répartition aléatoire). La part relative de ces trois modes d'occupation des sols est définie en entrée et permet de traduire une politique urbaine forte (urbanisation en continuité) ou au contraire la prévalence de la demande des ménages (mitage). En complément, des zones d'exclusions peuvent être définies (zones de risque inondation, secteurs sauvegardés, etc.) et une carte topographique permet de favoriser les zones correctement ensoleillées avec un dénivelé faible. Cependant, ce modèle ne permet pas de prendre en compte des critères socioéconomiques ni de définir des niveaux de densité bâtie comme NEDUM. Il est donc difficile de l'utiliser seul dans le cas de notre problématique.

Lors du couplage, il a donc été décidé de tenter de conserver les avantages des deux modèles. A chaque pas de temps, un module « NEDUM libre » fonctionne de manière classique. Il fournit au module SLEUTH une quantité correspondant à la surface de sol à urbaniser qui prend en compte les mécanismes de marchés. SLEUTH fonctionne ensuite de manière classique et produit une carte d'occupation du sol en tenant compte des contraintes géographiques. Un module « NEDUM contraint » fonctionne alors à nouveau en utilisant cette carte comme une carte des zones constructibles pour y définir la répartition des densités de population et de bâti. Grâce à ce couplage, il est également possible de simuler une ville multipolaire en autorisant le développement urbain uniquement dans les communes polarisantes (Houet et al., 2014).

* Voir glossaire

Figure 111 : Extension multipolaire de Toulouse avec SLEDUM entre 2010 (en gris) et 2100 (en noir)

SLEDUM, conçu spécifiquement pour les études pluridisciplinaires d'énergétique urbaine semble donc être le meilleur compromis en complexité et pertinence du modèle.

3.2.2. Limites du modèle

Le modèle SLEDUM fournit, pour chaque pas de temps, des mètres carrés de logements sur une maille dont la résolution est d'un kilomètre carré. Ces données géolocalisées seront celles échangées avec notre modèle.

Cependant, il manque à cette information tous les mètres carrés des bâtiments n'accueillant pas du logement : bureaux, administrations, commerces, industries, bâtiments agricoles, monuments, etc. Nous ajoutons donc ces surfaces au prorata de ce qui a été identifié sur la carte initiale (c'est à dire en utilisant des ratios entre les mètres carrés bâti de la carte initiale et les mètres carrés de logement simulés par SLEDUM en 2008 pour chaque type de quartier).

Par ailleurs, cette densité bâtie n'est pas suffisante pour déduire les formes urbaines. En effet, comme nous l'avions déjà évoqué, des formes urbaines très différentes existent pour des densités similaires. Une des contributions de GENIUS sera donc de prendre en compte les évolutions typologiques et morphologiques des quartiers.

Par ailleurs, nous intègrerons au modèle des évolutions technologiques telles que la matérialité du bâti, les équipements de chauffage, de climatisation, de production d'énergies renouvelables, les usages, etc.

3.3. Contribution aux modèles prospectifs actuels : prise en compte des évolutions typologiques, morphologiques et techniques

3.3.1. Différentes méthodes de prise en compte des évolutions urbaines

L'analyse des méthodes prospectives actuelles nous enseigne qu'il existe quatre grands types de méthodes pour imaginer des futurs possibles (Morice et al., 2004).

Fil de l'eau

La première consiste en la construction de scénarios d'évolution à partir d'extrapolations tendancielles. Il s'agit donc de reproduire ce qui été observé dans le passé. Cette méthode que l'on appelle parfois « fil de l'eau » ou « business as usual » est utilisée dans cette étude. Le chapitre 3.3.2 en établit les bases théoriques qui seront ensuite traduites dans les règles d'évolution typologiques et morphologiques.

A titre d'exemple on peut citer le travail du CERNA en collaboration avec ENERDATA pour le ministère de l'Économie, des Finances et de l'Industrie. L'objectif de ce travail est de fournir un scénario de référence au regard des consommations énergétiques françaises par secteur d'activité et par vecteur énergétique (gaz, nucléaire, etc.). En se basant sur les évolutions des 25 dernières années et sur le modèle prospectif de demande énergétique MEDEE-ME (Lapillonne & Chateau, 1981), la méthode a permis de construire un scénario à l'horizon 2020 (Giraud, 1999).

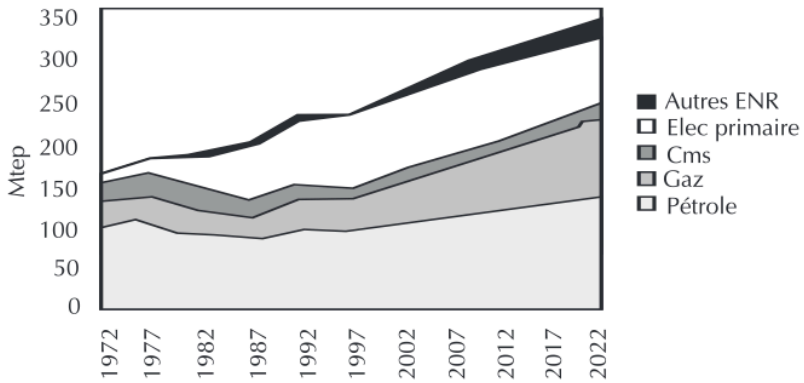


Figure 112 : Évolution des consommation d'énergie primaire entre 1972 et 2020 d'après un scénario tendanciel (Giraud, 1999)

Back-casting

La deuxième méthode est appelée back-casting. Cette méthode de prospective consiste à définir des objectifs à long terme (par exemple la réduction par 4 des émissions de gaz à effet de serre), puis, par «projection à rebours», à construire plusieurs scénarios contrastés permettant de les atteindre. Nous n'avons pas retenu cette méthode que nous jugeons trop contraignante pour les futurs possibles.

Pour illustrer les méthodes de back-casting, on peut citer le projet EST (Environmentally Sustainable Transport) piloté par l'OCDE. Ce travail consiste à construire des scénarios permettant d'atteindre des objectifs fixés pour l'horizon 2030 : réduction du bruit des transports (30% à 50% des niveaux de bruit observés en 1990), réduction de la pollution atmosphérique liée aux déplacements (1% à 50% des concentrations de polluants observées en 1990 et 20% à 50% des émissions de GES observées en 1990) et réduction de l'espace dédié aux infrastructures de transport. L'étude a ainsi mis en avant les leviers d'actions nécessaires pour atteindre ces objectifs : améliorations des technologies, changement des usages (transfert modal, covoiturage, etc.,), … De nombreuses mesures sont proposées et hiérarchisées en fonction de leur efficacité potentielle (Wiederkehr, Gilbert, Crist, & Caïd, 2004).

Forecasting

La troisième méthode permet d'étudier les futurs possibles à partir de prévisions conditionnelles (forecasting). Cette méthode de prospective consiste à définir un scénario de référence (par prolongement de tendances passées ou par assertion de certaines évolutions en cours), ainsi que plusieurs scénarios contrastés (construits en supposant des ruptures volontaristes ou contraintes), puis à déduire de leur comparaison des interprétations sur les futurs possibles et les stratégies envisageables.

Le travail proposé par Bauquis permet d'illustrer les méthode de forecasting (Bauquis, 2004). L'objectif de ce travail est d'imaginer quelles pourraient être les énergies alimentant les véhicule à l'horizon 2100. L'auteur propose une analyse prospective reposant sur des prévisions économiques et technologiques conditionnelles, en continuité ou en rupture avec les tendances passées.

Consultation d'experts

Pour finir, des scénarios prospectifs peuvent être construits par consultation d'experts. Un ou plusieurs scénarios sont alors issus d'une recherche de consensus entre plusieurs personnalités reconnues d'une ou de plusieurs disciplines.

On peut citer les travaux de Crozet, Orfeuil et Massot pour un projet de recherche piloté par la DRAST et qui porte sur les secteurs de l'énergie, des transports et de l'habitat. Ce travail, fondés sur la recherche d'un consensus entre experts a conduit à la construction de quatre scénarios volontairement « caricaturaux » et d'un cinquième plus réaliste. Ces scénarios ont été traduits en récits faisant intervenir des variables qualitatives, voir subjectives. L'objectif est en effet de susciter des réactions et de faire avancer le débat public. Une partie de ces scénarios sont traduits en résultats chiffrées, notamment sur les évolutions des distances de déplacements par mode (Crozet, Orfeuil, & Massot, 2001).

Méthode sélectionnée

Dans le cadre de ce travail, des scénarios contrastés ont été construits par un croisement des deux dernières méthodes, pour traduire les évolutions possibles des typo-morphologies urbaines et des caractéristiques techniques des bâtiments à l'échelle du siècle.

Le chapitre 3.3.2 présente les bases théoriques de la méthode de forecasting traduite dans le modèle GENIUS diachronique. Le travail prospectif est ici centré sur les évolutions typo-morphologiques.

La construction de scénarios par consultation d'experts est présentée dans le chapitre 0. Cette méthode prospective est ici centrée sur les évolutions politiques, démographiques et technologiques.

3.3.2. Analyse bibliographique des tendances passées : les évolutions urbaines constatées types par types

L'objectif de ce chapitre est de recenser les effets contrastés des différentes formes urbaines sur les évolutions de la ville. En se basant sur une analyse bibliographique, nous avons tenté de dégager les grandes tendances d'évolution liées à chaque type de quartier.

Centre ancien et immeuble continus

D'après Salat, les évolutions des trames urbaines traditionnelles sont plus aisées et se produisent fréquemment depuis leur création par le biais de redécoupages par la voirie (tracés haussmanniens par exemple), de densification des cœurs d'îlots et de réaménagements parcellaires (Salat, 2011a). La raison de cette facilité réside en partie dans la finesse du découpage parcellaire : les petits lots de propriété peuvent être densifiés individuellement sans bouleverser la trame urbaine. De plus, les structures à cours permettent des comblements plus aisés qui ne bouleversent pas la vie des habitants. Dans une étude pour le compte de l'Institut d'Aménagement et d'Urbanisme d'Ile-de-France, Darley et Zunino ont mené une série d'enquêtes auprès de différents acteurs de l'urbanisme qui ont conduit aux mêmes conclusions (Darley & Zunino, 2010). Les auteurs ajoutent que la régularité de ces tissus (constructions continues, alignées sur la rue et de hauteurs homogènes) facilite l'évolutivité car elle permet de « s'inscrire en continuité de l'existant plus facilement, en prolongeant la taille, la forme et l'alignement des ilots ».

On peut donc conclure que les tissus urbains continus, s'ils se transforment, conservent une organisation similaire sans bouleversement de la typologie. A l'inverse, les trames urbaines discontinues évoluent moins facilement. Le développement urbain dans ces zones aura donc plutôt tendance à induire un changement de typologie.

Grands ensembles et immeubles discontinus

Le cas le plus contrasté est celui des grands ensembles. Comme le révèle une étude rétrospective sur les évolutions des tissus urbains en Ile-de-France, les grands ensembles ont peu évolué dans les dernières décennies (Darley & Zunino, 2010). Cependant, sous l'effet des politiques de renouvellement urbain et des évolutions de la réglementation thermique, leur réhabilitation devrait être de plus en plus fréquente. D'après Darley et Zunino, l'objectif des opérations de rénovation des grands ensembles est de redécouper la trame urbaine, « de retrouver un maillage et des continuités urbaines, pour faciliter l'évolution du tissu à long terme » (Darley & Zunino, 2010). Le tissu aura donc tendance à évoluer par un changement de typologie.

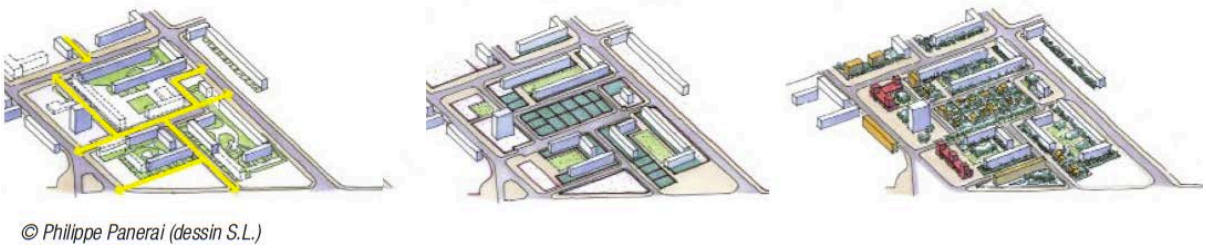


Figure 113 : Principe de transformation d'une trame urbaine de grands ensembles (Darley & Zunino, 2010)

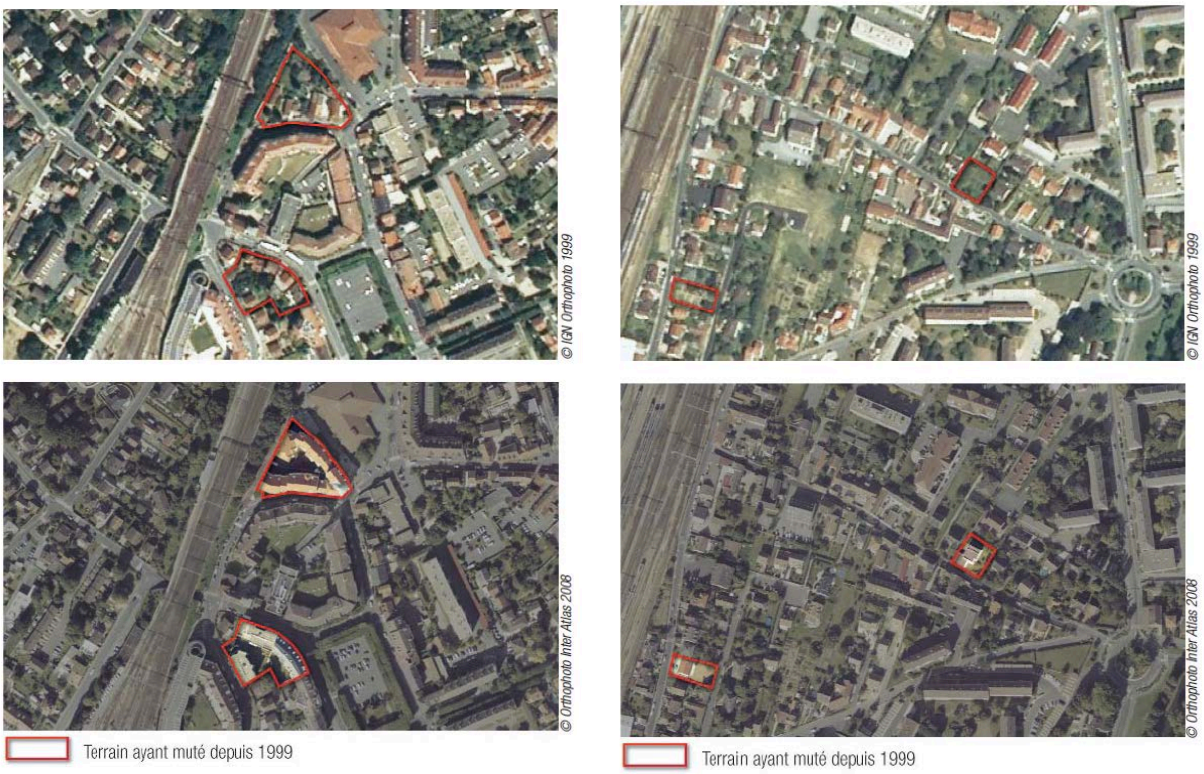
Pavillons

Les auteurs notent également des évolutions dans les tissus pavillonnaires. Dans une première étape spécifique au logement individuel, la densification se fait sous l'influence des habitants eux-mêmes : surélévation, construction d'extensions latérales des logements, ajouts de garages, de cabanes de jardin, etc. (Darley & Zunino, 2010). Ce type d'évolution ne se fait cependant pas sans conséquences sur le voisinage qui peut percevoir ces modifications comme sources de nuisances (vue, proximité, bruit, perte de valeur des biens) (Léger, 2010).

La deuxième étape de la densification est un redécoupage du foncier qui permet la construction de nouvelles maisons individuelles et donc une densification des quartiers sans changement typologique important (Darley & Zunino, 2010). Léger fait cependant remarquer que cette étape est actuellement très délicate. D'une part, il est fréquent que les logements soient situés au centre de la parcelle, en partie pour des raisons de bon voisinage. « Un terrain, fut-il de 2000 m^2, au centre duquel une maison est ouverte sur quatre côtés, laisse peu de possibilité à l'édification d'une deuxième construction ». D'autre part, le redécoupage foncier pose les mêmes problèmes de nuisance que les extensions. Elle sont vécues comme des intrusions par les riverains (Léger, 2010). Cependant, ce type d'évolution a déjà été observé par le passé (voir Figure 115).

Figure 114 : Principe de transformation d'une trame pavillonnaire (Darley & Zunino, 2010)

Dans une troisième phase, si la pression foncière est trop importante, les terrains peuvent être rachetés pour bâtir des immeubles collectifs ou de l'habitat en bande plus dense (Léger, 2010). C'est ce qui a été observé ces dernières décennies, en particulier dans les quartiers à proximité des centres urbains. Darley et Zunino présentent par exemple le cas d'un quartier à proximité de la gare de Brétigny-sur-Orge dans lequel de l'habitat individuel a été détruit puis remplacé par des logements collectifs, augmentant ainsi la densité de la zone (voir Figure 115).



Mutation d'habitat individuel vers du collectif

Densification de l'habitat individuel par redécoupage parcellaire

Figure 115 : Exemples de mutations des tissus urbains pavillonnaires (Darley & Zunino, 2010)

Zones d'activités

Cette même étude rétrospective sur les évolutions des tissus urbains en Ile-de-France a mis en avant que les zones d'activités évoluaient peu (Darley & Zunino, 2010). Cependant, d'après Panerai, ces zones d'activités économiques aujourd'hui relativement figées sont susceptibles d'évoluer dans le futur par un changement de découpage foncier (Panerai, 2010). Le chercheur évoque alors une mutation des zones d'activités vers des quartiers mixtes (activités, bureaux et logements) qui requalifieraient ces morceaux de ville. Bien que ponctuelles, des évolutions de ce type ont déjà été recensées en Ile-de-France. Darley et Zunino cite par exemple le cas d'une zone d'activité à Deuil-la-Barre qui a été transformée en zone d'habitat collectif (Darley & Zunino, 2010).

Conclusion

Une étude réalisée par Leveillier permet de confirmer ces tendances (Leveiller, 2011). Ce chercheur a observé les évolutions de typologies d'habitat entre 1982 et 2008 en se basant sur les bases de données MOS (Modèle d'Occupation du Sol) de l'IAU-IdF pour cinq communes représentatives de la région Ile-de-France. Il en ressort que l'habitat individuel discontinu a tendance à évoluer (1) plutôt vers des pavillons continus dans les zones ou la pression foncière est faible (grande couronne) et (2) plutôt vers de l'habitat collectif continu ou discontinu lorsque la pression foncière est plus forte (petite couronne et commune de Paris). L'habitat individuel continu, présent en petit couronne et dans Paris, évolue vers de l'habitat collectif. En ce qui concerne l'habitat collectif discontinu, il a tendance à évoluer plus facilement vers le centre de la ville et plutôt vers des formes d'habitat collectif continu.

De l'ensemble de ses travaux, on peut retenir une logique globale de mutation entre types de logement représentée par la Figure 116.

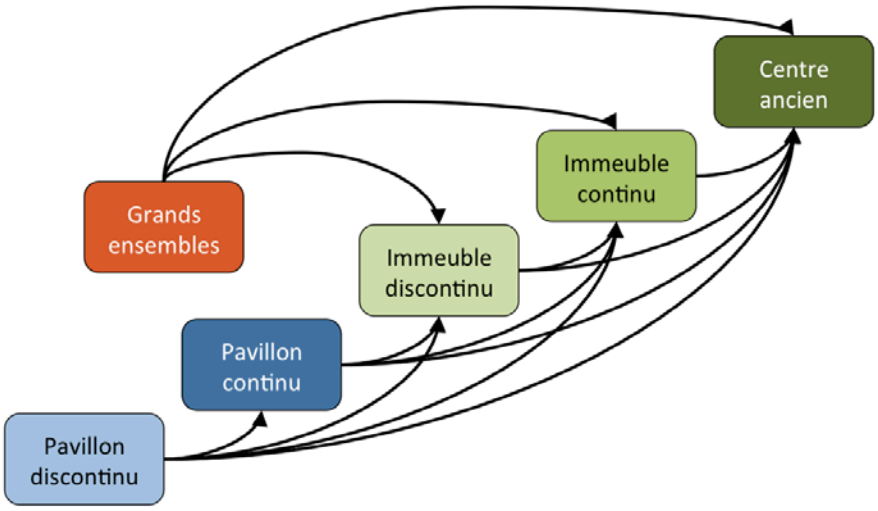


Figure 116 : Résumé des mutations possibles entre types de logement (illustration de l'auteur)

3.3.3. Construction de scénarios par entretiens avec des experts

A l'échelle du siècle, il est difficile d'imaginer se limiter à la poursuite des tendances passées, l'objectif même de la prospective étant de définir plusieurs futurs possibles. Ainsi, il était important de combiner plusieurs hypothèses : des scénarios « fil de l'eau » mais également des scénarios construits par consultations d'experts. Ces scénarios experts sont destinés à marquer des ruptures volontaristes dans les politiques urbaines et les règlementations thermiques mais également des contraintes et des moteurs externes (crise économique, choc pétrolier).

Ainsi, dans le cadre du projet ACCLIMAT, des consultations d'experts de l'urbanisme et de l'énergie ont été menées (Marchadier et al., 2012). Celles-ci ont conduit à la mise au point de scénarios d'aménagement du territoire et d'adaptations technologiques. Notons que ce travail n'a pas été réalisé dans le cadre de la thèse mais par des membres des projets MUSCADE et ACCLIMAT. Il nous semblait cependant important de le présenter dans ce mémoire car ces scénarios ont servi à la définition de GENIUS.

Les experts consultés étaient le CETE (Centre d'Eudes Technique de l'Équipement), CONTINENTAL (en tant qu'expert sur la prospective des transports), la mairie de Toulouse, l'ARPE Midi-Pyrénées (Agence Régionale du développement durable) et le LISST (Laboratoire Interdisciplinaire Solidarités, Sociétés, Territoires) ainsi que les partenaires du projet ACCLIMAT : le GAME (Groupe d'étude de l'Atmosphère Météorologique de Météo-France), l'AUAT (Agence d'Urbanisme et d'Aménagement Toulouse aire urbaine), le CIRED (Centre

International de Recherche sur l'Environnement et le Développement), GEODE (GEOgraphie De l'Environnement) et le LRA (Laboratoire de Recherche en Architecture).

Les scénarios d'aménagement du territoire se déclinent au nombre de quatre :

1. La mégalopole non contrôlée : dans ce scénario l'extension urbaine de la ville se poursuit sans beaucoup de contraintes réglementaires et les formes urbaines peu denses et peu compactes sont majoritairement construites.
2. La mégalopole contrôlée : dans ce scénario l'extension urbaine de la ville se poursuit mais, au fur et à mesure, ce développement est géré à l'échelle régionale et répond à un véritable projet intégré d'agglomération. En particulier, des formes urbaines compactes sont encouragées par la réglementation.
3. La mégalopole économique : ce scénario se rapproche du précédent si ce n'est que le développement économique est le principal moteur d'évolution de la ville. Les quartiers doivent par conséquent témoigner d'une certaine densité de population afin de maintenir le tissu économique local. Les petits et grands collectifs sont privilégiés.
4. Ville multipolaire : l'extension incontrôlée de la ville est interrompue par la mise en place d'une véritable politique cohérente en matière d'aménagement territorial. Le modèle de ville visé est celui d'une ville archipel, où les espaces non urbains conservent une fonctionnalité écologique. Des formes urbaines compactes sont encouragées par la réglementation.

En ce qui concerne les scénarios technologiques, les entretiens avec les experts ont mis en avant des grands principes d'évolution. D'une part, sous l'influence de la réglementation thermique, il est très probable que le niveau d'isolation des bâtiments augmente progressivement. Les experts consultés imaginent la généralisation des isolants sous vide à partir de 2070. Finalement, cette augmentation de l'isolation de l'enveloppe va vraisemblablement s'accompagner de mesures ayant pour objectif la réduction de l'effet d'ilot de chaleur urbain (albédo, végétalisation du bâti, etc.). Trois variables ont été définies pour prendre en compte ces évolutions. Chacune d'entre elles se décompose en plusieurs niveaux d'exigence dont les combinaisons ont conduit à la définition de quatre scénarios (voir Tableau 42).

Ces éléments prospectifs ont été traduits dans des règles d'évolution intégrées au modèle GENIUS que nous allons détailler par la suite.

Tableau 42 : Scénarios technologiques

Scénario / Variable	Ville énergétiquement vertueuse	Ville individualiste	Ville fil-de l'eau	Ville climatiquement néfaste
Évolution des usages	- Usage économe de la climatisation et du chauffage - Température de consigne de la climatisation « modérée » - Température de consigne du chauffage « modérée »		- Usage intensif de la climatisation et du chauffage - Température de consigne de la climatisation « basse » - Température de consigne du chauffage« élevée »	
Équipements & Performances	- Forte introduction de nouvelles technologies - Déclenchement automatique d'une surventilation - Protection solaire hors volets - Végétalisation des toits - Panneaux solaires - Bouquet énergétique a plus faibles émissions de CO2		- Faible introduction de nouvelles technologies - Pas de surventilation automatique - Pas de protection solaire hors volets - Pas de végétalisation des toits - Pas de panneaux solaires - Pas d'évolution du bouquet énergétique	
Déploiement des réglementations	- Déploiement rapide des réglementations - Le temps de diffusion des exigences et des techniques est plus court que par le passé.	- Déploiement lent des réglementations - Le temps de diffusion des exigences et des techniques est le même que par le passé		- Pas de rénovation énergétique

3.4. Évolution typologique des quartiers

3.4.1. Méthode retenue pour prendre en compte les mécanismes d'évolution de la ville liés aux typologies urbaines existantes

La base de notre travail est la continuité dans la forme urbaine. Comme l'explique Pannerai, la ville garde une trace de son histoire (Panerai et al., 1999). Ainsi, il est très probable que la forme future d'un quartier dépende de sa forme passée. Nous allons donc prendre en compte, chaque année, le type de quartier préexistant et croiser cette information avec les données disponibles : la densité bâtie brute de la maille (issue de SLEDUM) et l'âge des bâtiments (cette donnée étant déduite des changements successifs dans les cartes de GENIUS).

A priori, tant qu'elle reste dans un intervalle de densité compatible avec son type, la maille conserve la même typologie. Le type change si deux conditions sont réunies :

1. le bâtiment existe depuis un certain nombre d'années,
2. la densité bâtie brute dépasse la limite supérieure du type.

(1) Le bâtiment existe depuis un certain nombre d'années

Dans une autre étude réalisée pour le compte de l'institut d'aménagement et d'urbanisme d'Ile-de-France, Darley fait remarquer que l'âge du tissu urbain influe sur la probabilité que ce tissu évolue. Elle illustre ce phénomène ainsi : « A Villiers par exemple, les opérations de constructions réalisées en diffus dans le tissu urbain durant les années 1990 se sont faites en renouvellement d'un tissu pavillonnaire ancien datant de la première moitié du vingtième siècle. Ce processus s'est amorcé en raison des évolutions démographiques et de l'arrivée de jeunes ménages créant de nouveaux besoins en termes d'habitat. A l'inverse, à St Germain-lès-Corbeil, où domine un habitat individuel groupé construit durant les 30 dernières années, l'époque de construction de ce parc fait que le renouvellement des tissus d'habitat n'est pas encore à l'ordre du jour dans les années 1990 ni même encore aujourd'hui (Darley, 2007).

Ainsi, nous considèrerons qu'il ne peut y avoir de changement typologique si le bâtiment n'existe pas depuis suffisamment d'années. Ce nombre d'années prend en compte la « durée de vie minimale d'un quartier ». En effet, on ne peut concevoir une ville où les bâtiments sont rasés et reconstruits tous les ans, même si la pression foncière est importante. La durée de vie minimale d'un quartier va dépendre de son type.

Comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent, certains quartiers évoluent plus facilement que d'autre. C'est le cas par exemple des tissus traditionnels qui peuvent se densifier sans qu'il y ait de destruction majeure et de changement typologique. Nous nous sommes donc fixés pour ce type de quartier une durée de vie de 100 ans. Sur notre période d'étude, cela signifie que ces quartiers ne sont pas détruits mais évoluent seulement par densification.

Pour les autres types de quartier, nous nous sommes fixés une « durée de vie minimale » de 50 ans. En effet, L'EUROCODE 0 - la norme européenne qui traite des bases de calculs pour le dimensionnement des structures - donne pour référence une durée de vie des bâtiments de 50 ans. D'après Méquignon, bien qu'il s'agisse d'une donnée « de nature statistique visant les probables défaillances et non la stricte durée de vie », elle est en passe de devenir un « objectif de conception » pour l'industrie du bâtiment (Méquignon et al., 2013). Une enquête menée dans le cadre de cette thèse auprès des adhérents de l'APUMP (Association des Professionnels de l'Urbanisme de Midi-Pyrénées), et présentée en annexe 1, confirme cette répartition des durées de vie minimale. Cependant, il est important de préciser qu'il s'agit bien là d'une condition nécessaire mais pas suffisante au changement typologique et que la plupart des bâtiments conçus auront une durée de vie supérieure à 50 ans.

(2) La densité dépasse la limite supérieure du type

On considère que la densité peut évoluer dans une maille. Tant que cette évolution est faible, le type ne change pas. C'est ce que l'on peut observer dans l'étude rétrospective de Darley et Zunino sur les évolutions des tissus urbains en Ile-de-France (Darley & Zunino, 2010). Par exemple, les pavillons se densifient d'abord par extension du logement ou par redécoupage du parcellaire. Cependant, cette étude fait également apparaître qu'au-delà de certaines limites, lorsque la pression foncière devient trop importante, on passe d'un type de quartier à un autre.

Afin de fixer les limites de densité au-delà desquelles les types de quartiers changent, nous nous sommes basés sur l'étude des villes de Toulouse et Paris et sur les différentes densités qu'on y rencontre dans différents quartiers. La Figure 117 résume ces intervalles de densité bâtie brute. Notons que nous avons fixé des intervalles de densité se chevauchant afin de prendre en compte le fait que différentes formes urbaines peuvent exister pour une même densité. Dans la pratique, ces chevauchements permettent aussi de prendre en compte l'inertie de la ville dans les grands changements typologiques.

Règles pour l'expansion urbaine

Pour les parties de la ville nouvellement générées par SLEDUM, on se base sur l'évolution des surfaces bâties calculée par le modèle et traduites en densité bâtie brute. A chaque intervalle de densité on fait correspondre un type de quartier qui est le plus susceptible d'apparaître contenu de la pression foncière. La Figure 117 résume ces intervalles de densité.

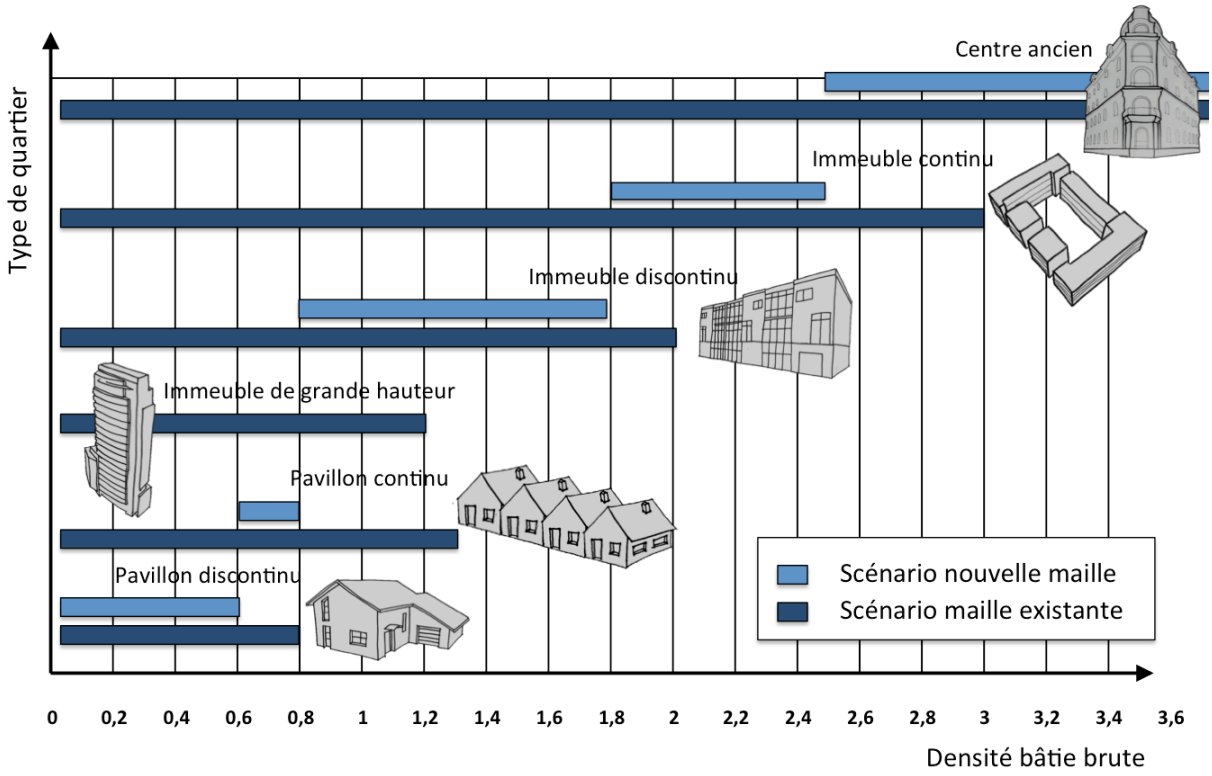


Figure 117 : Attribution des types de quartier en fonction de la densité (illustration de l'auteur)

Limites de la méthode

Une des limites de ce travail est que les quartiers entièrement dédiés aux bureaux ou aux activités industrielles, commerciales ou agricoles n'évoluent pas. En effet, SLEDUM, le modèle prospectif choisi, ne prend en compte que les évolutions des logements.

On notera qu'il n'est pas prévu que des immeubles de grande hauteur soient construits dans le futur. En effet, les grands ensembles ont montré leurs limites sociales, urbaines et techniques. Après la fin des années 70, il n'en a donc plus été construit. De plus, comme

nous ne pouvons recréer de quartiers entièrement dédiés aux bureaux, il n'y a pas de raison de prévoir la création de tours.

3.4.2. Méthode retenue pour prendre en compte les mécanismes d'évolution de la ville liés aux politiques urbaines

Les entretiens avec les experts et les scénarios qui en ont découlé nous permettent d'imaginer que dans le futur, des réglementations urbaines plus restrictives contraignent les formes urbaines, en particulier pour favoriser des formes urbaines plus compactes.

Nous avons donc prévu deux scénarios supplémentaires qui pourront se substituer au scénario « fil de l'eau » présenté sur la Figure 117.

Un premier scénario « formes urbaines compactes » va permettre, pour une densité donnée, de favoriser des formes urbaines plus compactes. En lieu et place d'individuel isolé on construira donc des maisons en bande, à la place d'immeubles discontinus on construira des immeubles continus, etc. La Figure 118 résume les intervalles de densité associés à ce scénario.

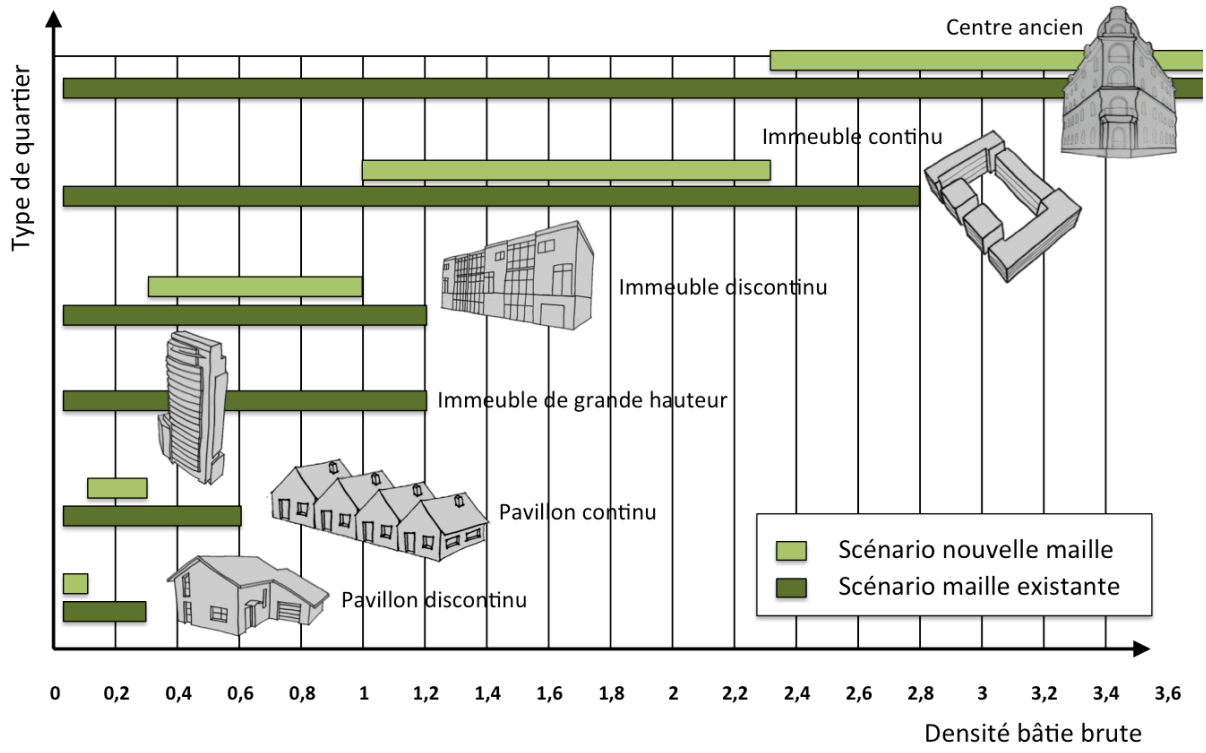


Figure 118 : Attribution des types de quartier en fonction de la densité – Scénario « formes urbaines compactes » (illustration de l'auteur)

Un deuxième scénario part à contrepied du scénario « fil de l'eau » et prévoit la construction d'immeubles de grande hauteur en cas de fortes densités bâties. L'objectif serait de libérer le sol pour laisser plus de place au végétal. La Figure 119 résume les intervalles de densité associés à ce scénario « formes urbaines verticales ».

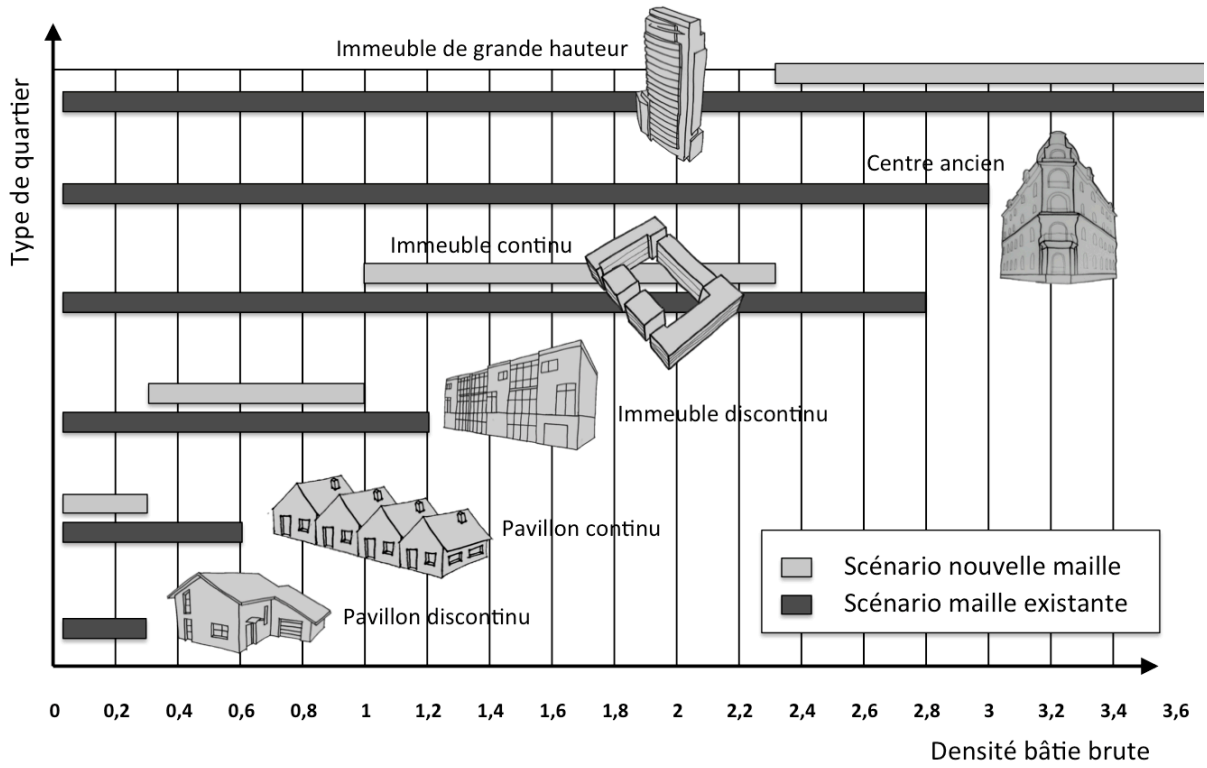


Figure 119 : Attribution des types de quartier en fonction de la densité – Scénario « formes urbaines verticales » (illustration de l'auteur)

En prenant en compte ces évolutions de typologie, GENIUS produit des cartes pour chaque pas de temps considéré. Ces cartes reprennent le format de la carte initiale présentée dans le chapitre 2 c'est à dire une couche SIG composée de mailles carrées de 250 mètres par 250 mètres.

3.5. Évolution morphologique des quartiers

3.5.1. Principes généraux

L'objectif est de paramétrer chaque maille afin de l'adapter à la réalité construite. Si on considère l'exemple du type « pavillon discontinu », on peut rencontrer des bâtiments très différents : petits pavillons très denses ou grandes villas isolées. Pour définir une géométrie précise, nous avons recherché des liens entre les informations déjà connues pour chaque maille (surface de plancher habitable et type) et les valeurs des attributs géométriques. Pour cela, nous nous sommes basés soit sur des analyses statistiques des mailles existantes, soit sur des liens géométriques simples. Par ailleurs, certains paramètres vont dépendre directement de scénarios reflétant des politiques urbaines volontaristes.

Les règles d'évolution des ilots sont récapitulées dans le tableau ci-après. Notons que tous les attributs définis précédemment ne sont pas conservés car tous ne sont pas utiles aux modèles d'énergétique urbaine.

La Figure 120 explicite l'enchainement des calculs des différents attributs.

Tableau 43 : Évolution morphologique des quartiers

Indicateur	Loi d'évolution
Hauteur moyenne des bâtiments dans la maille	Règles issues de l'analyse statistique et du scénario
Écart type des hauteurs	Règles issues de l'analyse statistique
Coefficient d'emprise au sol	Indicateur recalculé : $$CES = \frac{S_{sol\ tot}}{S_{maille}}$$
Densité bâtie brute	Extrait de SLEDUM
Compacité des blocs	Indicateur recalculé : $$Compacité = \frac{Surface\ d'enveloppe\ extérieure\ bati\ (mur + toit)}{(Volume\ bati)^{2/3}}$$
Contiguïté	Règles issues de l'analyse statistique et des scénarios.
Orientation des blocs	Invariant
Altitude des bâtiments	Indicateur recalculé : $$Z_moy_{\ i} = Z_moy_{\ i-1} + \Delta\ hauteur/2$$
Age majoritaire	Invariant sauf s'il y a un changement de type
Usage du bâtiment	Invariant
Densité surfacique de route	Règles issues de l'analyse statistique
Direction moyenne des routes	Invariant
Longueur route	Règles issues de l'analyse statistique
Densité surfacique de surface en eau	Invariant
Densité surfacique de végétation	Règles issues de l'analyse statistique et du scénario
Nombre d'habitant par maille	Extrait de SLEDUM
Type de chauffage majoritaire	Règles issues de l'analyse statistique

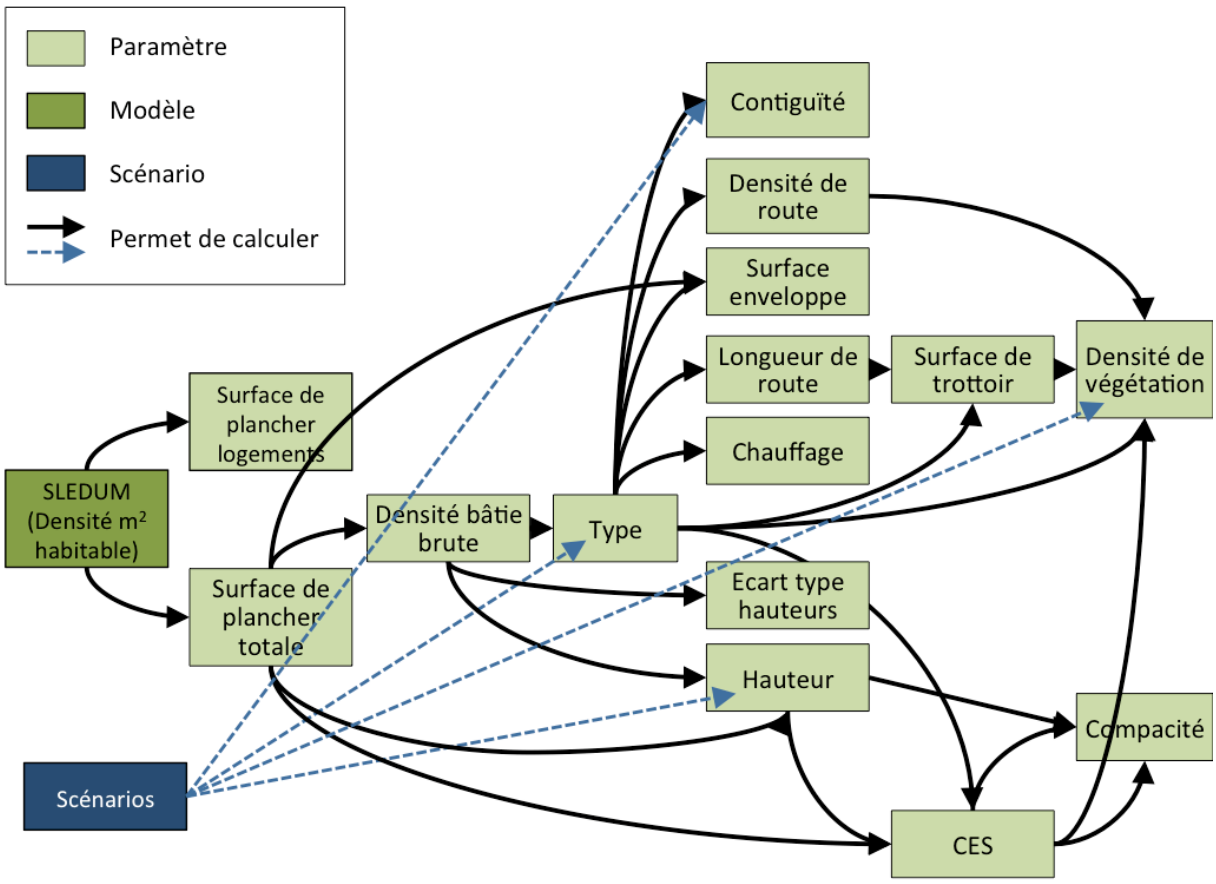


Figure 120 : Organigramme simplifié de calcul des paramètres (illustration de l'auteur)

3.5.2. Exemple de l'évolution de la hauteur moyenne des bâtiments

Afin d'illustrer la manière dont ces règles d'évolutions ont été établies, nous présentons ici l'analyse de la hauteur des bâtiments, qui est le paramètre descriptif le plus critique dès que l'on s'intéresse à la forme urbaine (Salat, 2011a). En effet, lorsque la densité bâtie est fixée, la hauteur va déterminer l'emprise au sol. Les conséquences de cette combinaison de paramètre sur l'énergétique urbaine sont primordiales : compacité, ombres portées, espace libre pour du végétal ou des surfaces en eau, etc.

Afin de déterminer un lien entre densité bâtie, type et hauteur, nous avons étudié en détail l'agglomération de Paris (soit 423 397 bâtiments dans la base de données Topo de l'IGN) à l'aide du logiciel SIG ArcGIS.

Pour les quartiers pavillonnaires ainsi que les immeubles continus et les quartiers de centre ancien, on constate que les hauteurs moyennes des bâtiments dans une maille se répartissent de manière croissante en fonction de la densité bâtie brute (voir Figure 121 à Figure 124). Nous approximons cette relation à une fonction linéaire.

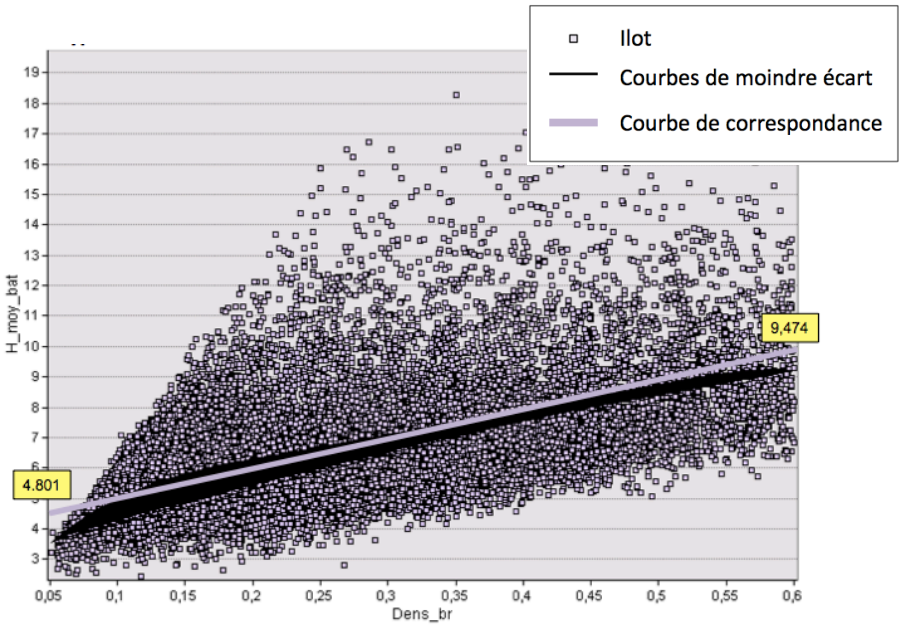


Figure 121 : Hauteur moyenne des bâtiments en fonction de la densité bâtie brute – Pavillons discontinus (illustration de l'auteur)

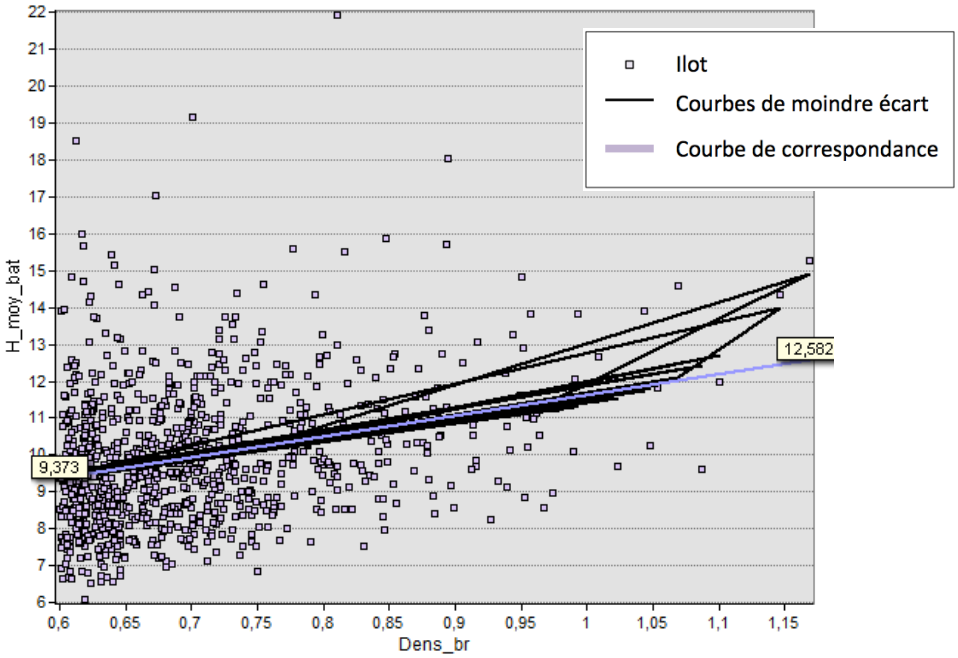
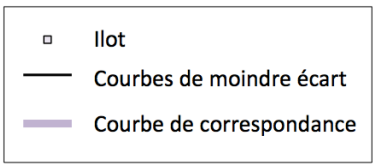


Figure 122 : Hauteur moyenne des bâtiments en fonction de la densité bâtie brute – Pavillons continus (illustration de l'auteur)



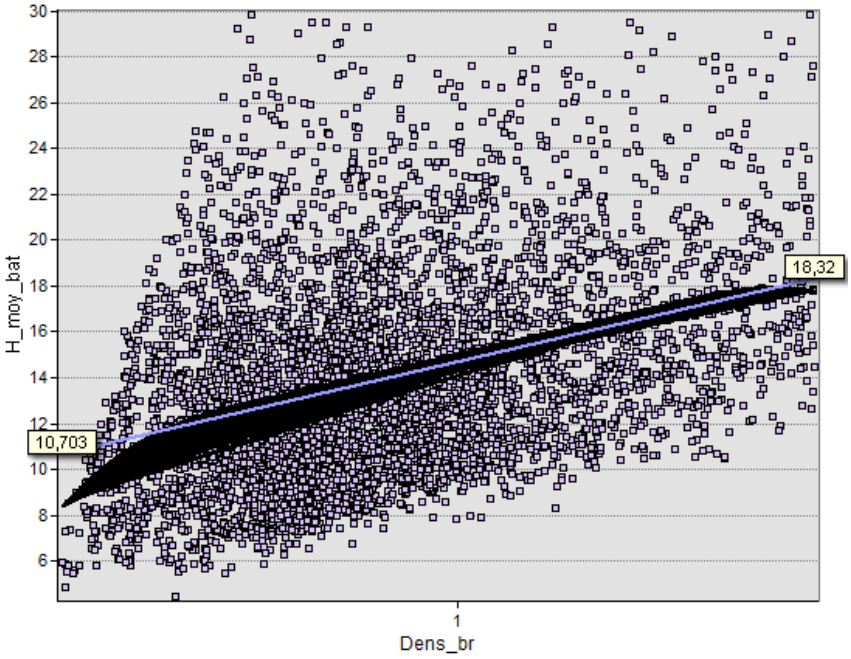


Figure 123 : Hauteur moyenne des bâtiments en fonction de la densité bâtie brute – Immeubles discontinus (illustration de l'auteur)

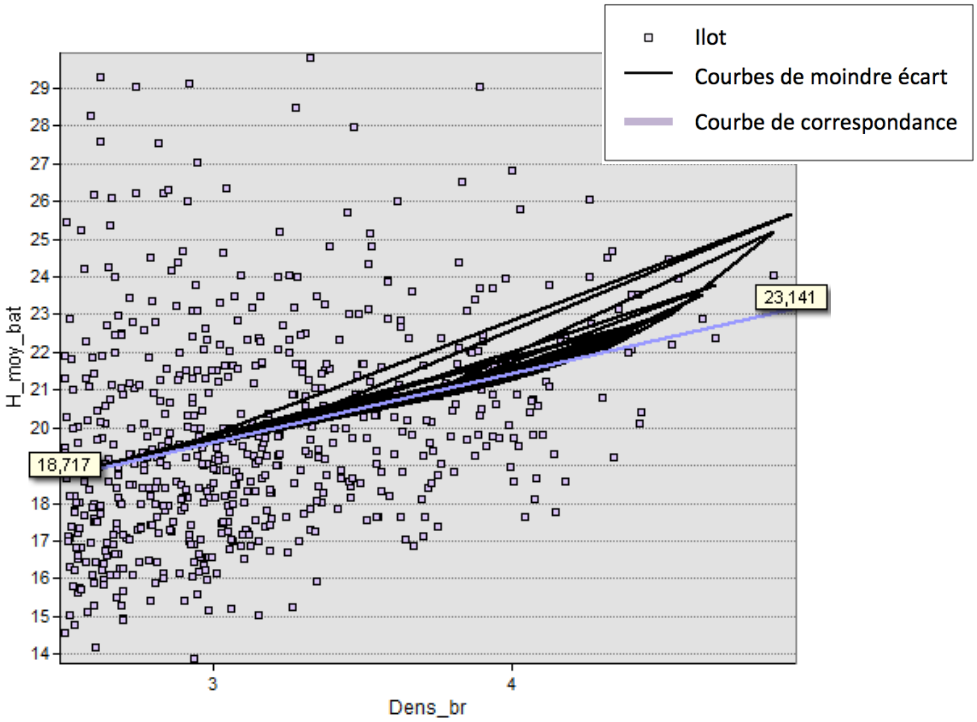


Figure 124 : Hauteur moyenne des bâtiments en fonction de la densité bâtie brute – Centre ancien (illustration de l'auteur)

Pour le type « immeuble continu » il n'y a pas de corrélation entre hauteur et densité bâtie (voir Figure 125). Malgré la forte dispersion, nous conservons la hauteur moyenne de six niveaux, qui est cohérente avec la réglementation urbaine parisienne. La hauteur moyenne

des immeubles continus peut donc augmenter jusqu'à 18 m (les immeubles ayant une hauteur supérieure à 18 m la conserve). Une fois atteint ces six niveaux, on considère que la densification se fait systématiquement par augmentation de la surface au sol.

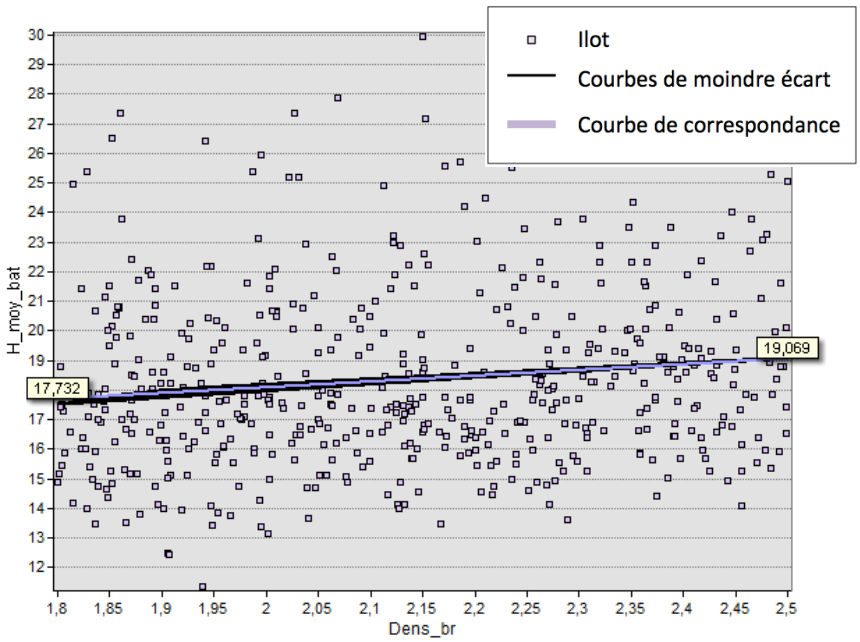


Figure 125 : Hauteur moyenne des bâtiments en fonction de la densité bâtie brute – Immeubles continus (illustration de l'auteur)

Pour le type « immeuble de grande hauteur », il est peu probable qu'une augmentation de densité se traduise par une augmentation du nombre de niveaux. Nous conservons donc la hauteur de la maille. La densification se fait alors systématiquement par augmentation de la surface au sol. Il est cependant intéressant de constater qu'il existe une corrélation entre hauteur moyenne et densité bâtie brute (voir Figure 126).

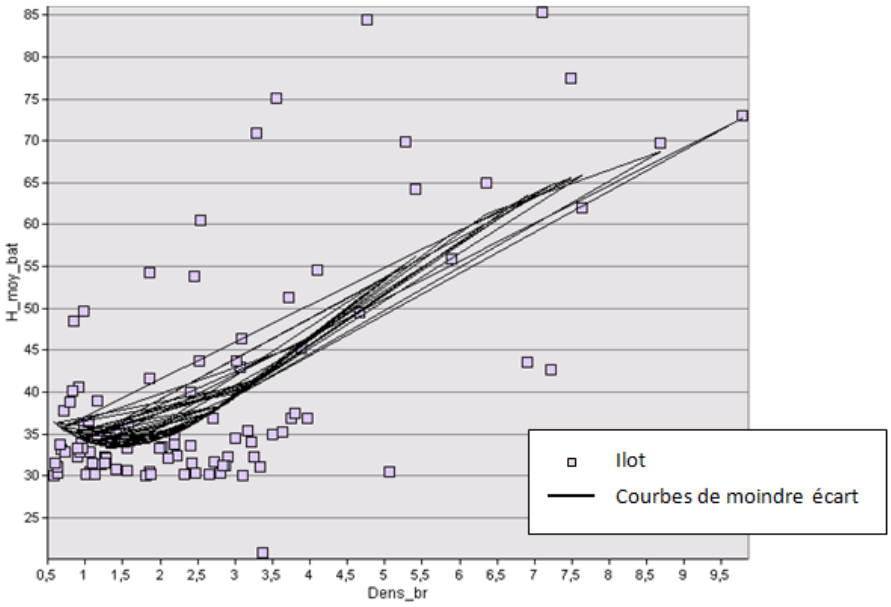


Figure 126 : Hauteur moyenne des bâtiments en fonction de la densité bâtie brute – Immeubles de grande hauteur (illustration de l'auteur)

Pour le type « bâtiments d'activités », nous constatons qu'il n'existe aucune corrélation entre la hauteur et la densité bâtie brute (voir Figure 127). Nous conserverons donc la hauteur de la maille en cas d'augmentation de la densité.

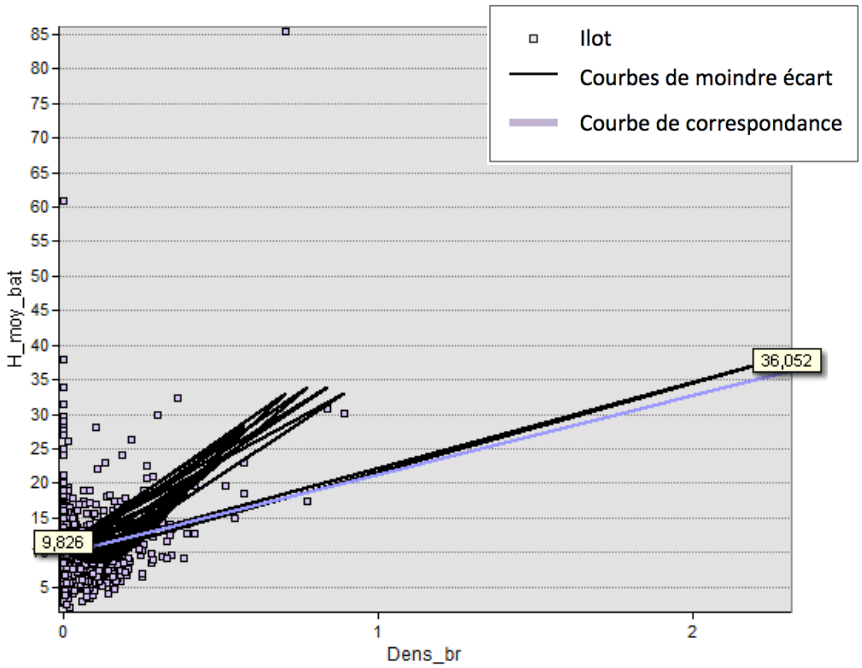


Figure 127 : Hauteur moyenne des bâtiments en fonction de la densité bâtie brute – Bâtiments d'activités (illustration de l'auteur)

Pour résumer, nous considérons que pour un type de quartier donné, la hauteur dépend de la densité bâtie brute. A chaque nouvelle itération, si la densité a évolué on utilise la relation linéaire suivante pour connaitre sa nouvelle hauteur :

$$Hauteur\ moyenne\ du\ quartier\ =\ a\ \times\ densité\ bâtie\ brute\ +\ b$$

Où a et b sont des coefficients dépendant des type de quartier et du scénario de politiques urbaines (voir Tableau 44 ci-après).

Nous prévoyons deux scénarios permettant de prendre en compte les politiques urbaines. Le premier « fil de l'eau » poursuit les tendances actuelles et suit donc les règles issues de l'analyse de la ville existante. Le deuxième scénario « architecture verticale » décrit un urbanisme où la libération des sols serait recherchée ce qui conduirait obligatoirement à une augmentation des hauteurs pour une même densité bâtie brute. Pour ce scénario, nous avons donc modifié les coefficients a et b (voir Tableau 44).

Tableau 44 : Coefficients a et b pour le calcul des hauteurs moyennes des quartiers

Type	Scénario « fil de l'eau »		Scénario « architecture verticale »	
	a	b	a	b
N°1 Pavillon continu	5,6	6	0	13
N°2 Pavillon discontinu	8,5	4,4	8,5	7,4
N°3 Immeuble continu	0	18,0	0	24
N°4 Immeuble discontinu	4,5	10,2	4,5	19,2
N°5 Immeuble de grande hauteur	Pas de variation de hauteur		4,3	30,4
N°6 Centre ancien	1,8	14,1	1,8	17,1
N°7 Bâtiment d'activités	Pas de variation de hauteur		Pas de variation de hauteur	

Si une augmentation de la hauteur est envisagée sans changement de type de quartier, on considère qu'il n'y a pas de destruction. Cette augmentation de la hauteur ne peut donc être concrétisée que si elle n'entraine pas une diminution de la surface au sol par rapport à l'itération précédente.

Ce type d'analyse a été réalisé pour cinq autres paramètres. Les indicateurs morphologiques évoluent donc dans les cartes produites par GENIUS, permettant une utilisation pour des simulations de microclimat urbain ou d'énergétique du bâtiment. Ces informations sont ensuite traduites en données attributaires dans les cartes produites par GENIUS.

3.6. Évolution technologique des bâtiments

Afin de faire évoluer les caractéristiques technologiques des bâtiments, nous allons procéder de la même manière que dans la partie « modélisation synchronique » de la méthode. Ainsi, on va associer, en fonction du type de quartier et de sa classe d'âge, des caractéristiques technologiques à chaque maille.

Tout d'abord, l'horizon temporel est découpé en périodes pouvant correspondre à des ruptures dans les modes de construction. Elles sont au nombre de cinq, comme on peut le voir sur la Figure 99. En effet, un regard rétrospectif sur l'évolution des règlementations thermiques et des modes constructifs passés nous laisse à penser que celles-ci ne seront significatives que tous les vingt ans environ (voir chapitre 2.5.2).

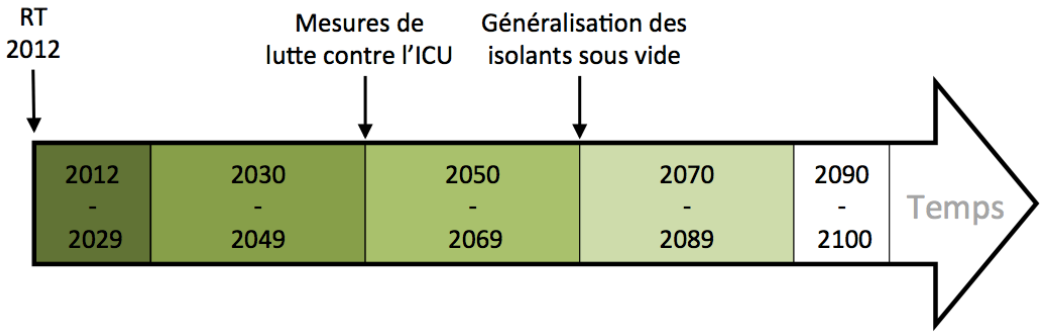


Figure 128 : Les grandes périodes de construction envisagées (illustration de l'auteur)

En se basant sur les scénarios établis par les experts, des caractéristiques techniques ont été attribuées à chaque combinaison de type de quartier et d'âge de construction. Par ailleurs, un temps de latence a été pris en compte pour rendre compte de l'inertie qui peut exister dans l'intégration de nouveaux procédés constructifs. Cette période dépend des scénarios, des types de bâtiments mais surtout du fait que les bâtiments soient neufs ou anciens. Comme précédemment, il s'agit ici du travail des partenaires des projets ACCLIMAT et MUSCADE (Marchadier, 2012; Salagnac, 2013).

3.7. Codage de GENIUS

Bien que ses bases scientifiques soient l'objet de ce travail, GENIUS a été codé par Valéry Masson, chercheur au CNRM (Centre National de Recherches Météorologiques), il s'agit donc d'un modèle conjoint au LRA et au CNRM.

Le langage adopté est le Fortran. Ce langage très répandu a permis de coder rapidement et de modifier le code simplement, quelque soit l'intervenant. En revanche, le modèle ne possède pas à l'heure actuelle d'interface homme-machine.

Les données d'entrée du modèle GENIUS sont :

- la carte des quartiers types en 2008 (telle que générée dans le chapitre 2) pour initialiser le modèle,
- les cartes issues de SLEDUM pour chaque pas de temps considéré (1 ans, 10 ans, etc.) qui donnent les mètres carrés de logement et le nombre d'habitants dans des mailles d'un kilomètre carré,
- les scénarios retenus pour les variations typologiques, morphologiques et technologiques.

Les sorties sont des cartes GENIUS exploitables par n'importe quel logiciel SIG et contenant, pour chaque pas de temps, les quartiers types et leurs paramètres pour chaque maille.

Une des perspectives de ce modèle est un portage vers un logiciel plus ergonomique. Ce portage doit être pris en charge par le bureau d'étude de Météo-France pour une exploitation ultérieure.

3.8. Validation de GENIUS

Afin de valider GENIUS, nous avons choisi de faire une simulation sur le passé et de comparer les résultats à la réalité de la ville existante. Il ne s'agit pas ici d'un calibrage comme on peut le voir dans certains modèles prospectifs, mais bien d'une validation puisque nous ne changeons pas les paramètres du modèle. Nous avons choisi de mener cette validation sur le pôle urbain parisien car c'est sur cette zone que nous disposons du plus de données, tant dans le passé que dans le présent.

3.8.1. Mise au point des cartes passées

Comme nous souhaitons valider le fonctionnement de GENIUS seul (SLEDUM ayant fait l'objet d'une validation individuelle), nous allons reconstituer les informations habituellement produites par SLEDUM pour alimenter GENIUS. Ces informations prennent la forme de cartes de densité bâtie brute et de population, et la génération de ces cartes fait l'objet du présent chapitre.

Bases de données passées disponibles à Paris

Nous avons à notre disposition deux types de données. Tout d'abord, l'INSEE propose gratuitement les évolutions de densité de population à l'échelle de la commune à partir de 1962. Notons que ces informations existent pour des dates antérieures (à partir de 1901) mais à l'échelle du département.

Afin de préciser la localisation de ces données communales, on dispose également de l'emprise de la ville en 1900 et 1960 (données prêtées par l'Institut d'Aménagement et d'Urbanisme d'Ile-de-France dans le cadre du projet MUSCADE).

Création d'une carte initiale en 1960

Nous choisissons de partir d'une carte initiale en 1962 afin de conserver une relative précision dans les données. Nous utiliserons donc la densité bâtie communale de 1962 et l'emprise de la ville en 1960 (on suppose qu'entre 1960 et 1962, l'emprise de la ville a peu évolué).

La carte de l'Institut d'Aménagement et d'Urbanisme d'Ile-de-France nous permet d'appliquer un masque à la carte des ilots de 2008 pour ne conserver que les mailles qui se

trouvent dans l'emprise de la ville en 1960. La carte de l'IAU ne couvrant pas toute la surface d'étude on ajoute également les mailles dont l'âge majoritaire est antérieur à 1962.

Nous souhaitons ensuite adapter la surface bâtie car il est probable que les mailles étaient moins bâties en 1960. Pour une commune donnée, nous connaissons :

- la densité de population en 2008
- la densité de population en 1962
- l'emprise de la tache urbaine* en 2008
- l'emprise de la tache urbaine en 1962
- la densité bâtie en 2008.

Nous avons donc choisi de réduire la densité bâtie d'une maille proportionnellement à l'évolution de la densité de population dans cette maille. Comme nous ne disposons de cette information qu'à l'échelle communale, nous allons répartir la totalité de la population d'une commune de manière homogène sur les mailles bâties de cette même commune.

D'après l'analyse de la carte initiale de 1962, certaines mailles sont plus densément bâties en 1962 qu'en 2008. L'une des raisons de ce phénomène est qu'à l'échelle de la commune, certaines densités de population sont plus élevées en 1962 qu'en 2008. C'est en particulier le cas de Paris. Cela résulte de plusieurs phénomènes :

- la dé-densification des centres anciens pour des raisons sanitaires et sociales (relogement des mal-lotis) (Weidknnet, 2012),
- le changement d'affectation d'anciens logements vers des bureaux ou des administrations, en particulier dans le bâti haussmannien (INSEE, 2009b),
- la gentrification* du centre de Paris conduisant à une augmentation de la surface de logement par personne et à une augmentation des loyers rendant le centre-ville inaccessible pour toute une partie de la population (Clerval, 2008).

Nous faisons donc l'hypothèse qu'aucune destruction n'a eue lieu entre 1962 et 2008. Les mètres carrés vidés de leurs populations sont réattribués à d'autres fonctions : du tertiaire, des mètres carrés supplémentaires pour des logements luxueux ou encore des logements vacants.

Pour déterminer le type de quartier en 1962, nous nous sommes d'abord basés sur l'âge des quartiers en 2008. Dans les quartiers dont l'année majoritaire de construction est inférieure ou égale à 1949, nous avons supposé que la majorité des bâtiments de la maille existait en 1962, et donc que le type n'avait pas varié.

* Voir glossaire

Afin de vérifier la validité de cette hypothèse, nous avons étudié les types obtenus de cette manière (soit les quartiers de 2008 dont l'année majoritaire de construction est inférieure ou égale à 1949) et observé leurs densités bâties en 1962. Il en résulte que les densités observées en 1962 sont parfaitement cohérentes avec les types de quartiers.

Dans les quartiers dont l'année majoritaire de construction est supérieure à 1949, on se base sur le scénario « fil de l'eau » représenté ci-dessous pour attribuer un type de quartier à chaque maille en fonction de la densité bâtie de 1962.

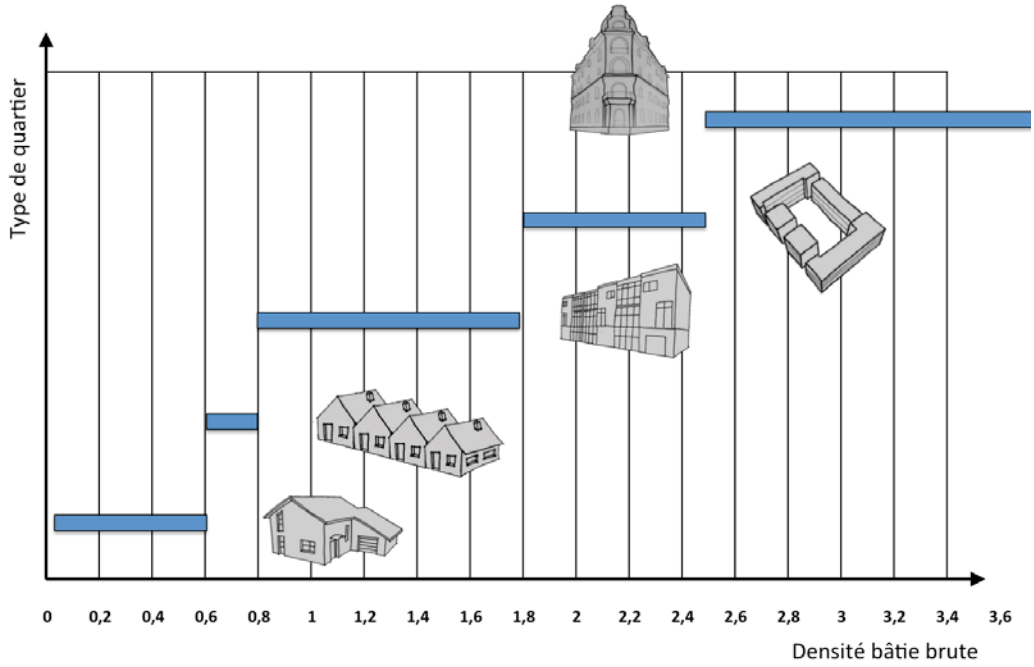


Figure 129 : Attribution des types pour les quartiers dont l'année majoritaire de construction est supérieure à 1949 (illustration de l'auteur)

On conserve l'âge des ilots dont l'année majoritaire de construction est inférieure ou égale à 1962. Les ilots postérieurs sont automatiquement considérés comme étant construits en 1962.

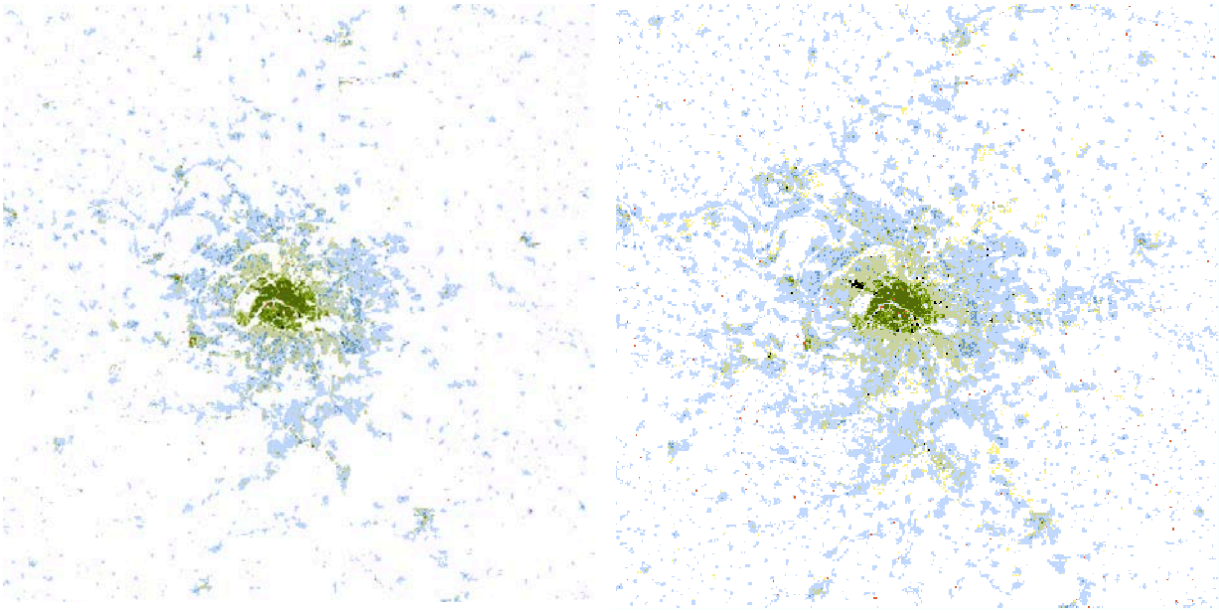


Figure 130 : Comparaison des cartes initiales en 1962 (à gauche) et en 2008 (à droite) (illustration de l'auteur)

Création de cartes de densité en 1962 et 2008

Afin de simuler l'évolution de la ville et de ses types de quartiers entre 1962 et 2008 nous avons besoin de cartes de densité bâtie et de densité de population, pour chaque pas de temps. Nous avons à notre disposition des évolutions de densité de population à l'échelle communale pour les années 1962 – 1968 – 1975 – 1982 – 1990 – 1999 – 2008.

Il arrive que cette densité de population diminue au cours du temps. Or nous avons défini une règle de non-destruction du bâti existant. Nous générons donc une carte de densité de population équivalente dans laquelle on interdit toute diminution de la densité de population d'une commune. Cette densité de population équivalente va nous servir à générer des cartes de densités bâties cohérentes avec nos hypothèses.

Nous calculons ensuite la densité bâtie d'une maille proportionnellement à l'évolution de la densité de population équivalente dans la commune associée (voir principe du calcul sur la Figure 131).

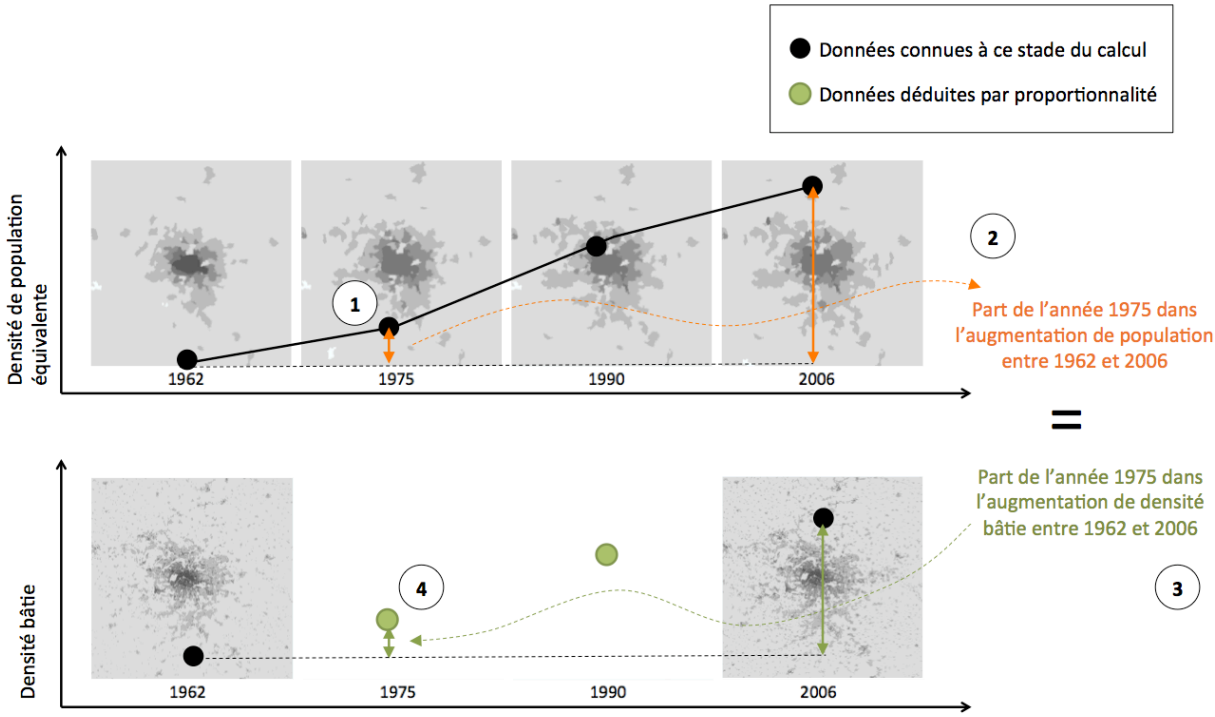


Figure 131 : Calcul de la densité bâtie par pas de temps – schéma de principe (illustration de l'auteur)

Dans les quartiers de la Défense et du Front de Seine, emblématiques d'une politique urbaine forte, nous avons précisé les évolutions de densité bâtie en nous basant sur les surfaces et les années de construction réelles. En particulier, pour la Défense, nous disposons de la surface et des années de construction de la majorité des bâtiments (Defacto, 2012). Nous avons donc appliqué les pourcentages exacts d'augmentation du bâti entre 1962 et 2008 pour les mailles concernées.

3.8.2. Simulation

Configuration de la simulation GENIUS

On utilise le modèle GENIUS pour simuler les changements typologiques depuis 1962 jusqu'en 2008, en utilisant comme données d'entrée la carte initiale de 1962 et les cartes des densités bâties et des densités de population en 1968, 1975, 1982, 1990, 1999 et 2008. Deux ajustements ont cependant dû être faits.

D'une part, le fonctionnement normal de GENIUS prévoit des facteurs correctifs permettant de transformer la densité bâtie issue de SLEDUM (qui ne prend en compte que les surfaces

de logements) en densité bâtie totale. Dans notre cas, le calcul des densités totales à chaque pas de temps nous dispense de ces facteurs correctifs.

D'autre part, l'âge minimal que doit avoir un quartier pour changer de type est normalement de 50 ans ou 100 ans. Ici, l'année de construction la plus ancienne est 1949 car nous ne disposons pas du détail de l'âge des bâtiments avant cette date. La limite de 50 ans est donc trop contraignante car elle ne permet pas la création de suffisamment de nouveaux ilots. Nous l'avons donc ramené à 30 ans.

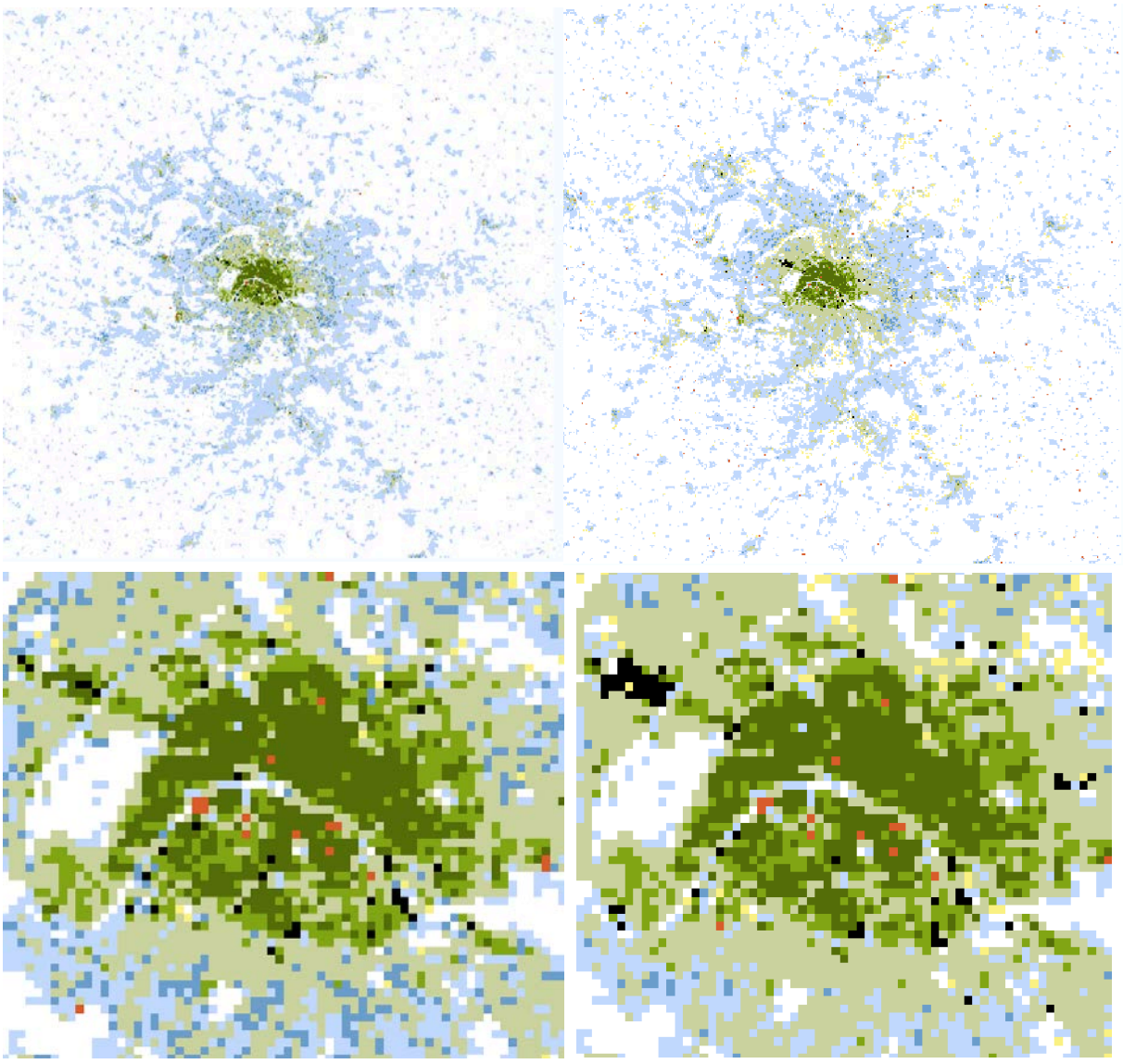
Scénarios

Afin de s'approcher au maximum des développements urbains qui ont eu lieu entre 1962 et 2008, nous avons pris en compte deux scénarios. De 1962 à 1975, on utilise le scénario « forme urbaine verticale ». Ce scénario traduit une période d'urbanisme moderne qui a conduit à la réalisation des grands ensembles ainsi que de quartiers emblématiques de Paris comme La Défense et Le Front de Seine. Après 1975, on utilise le scénario « Fil-de-l'eau » qui devrait retranscrire correctement les évolutions passées, à l'exception de la création d'immeubles de grande hauteur.

3.8.3. Résultats

Analyse graphique

Une première analyse graphique nous permet de constater que la carte obtenue après simulation de GENIUS entre 1962 et 2008 (à gauche) et la carte initiale 2008 déterminée à partir des bases de données existantes (à droite) sont très proches (voir Figure 132). On retrouve dans ces cartes la forme globale de la ville ainsi qu'une répartition fidèle des types d'ilots. On note cependant des confusions en petite couronne entre l'habitat pavillonnaire continu et les immeubles discontinus.



Carte 2008 obtenue après simulation

Carte initiale 2008

Pavillonnaire discontinu
Pavillonnaire continu
Immeuble discontinu
Immeuble continu
Immeuble de grande hauteur
Centre ancien
Bâtiment d'activités
Bâtiment remarquable

Figure 132 : Validation graphique – types d'ilots (illustration de l'auteur)

Observons maintenant les cartes différentielles, c'est à dire les cartes faisant apparaître en noir les ilots dont le type est différent sur les deux cartes.

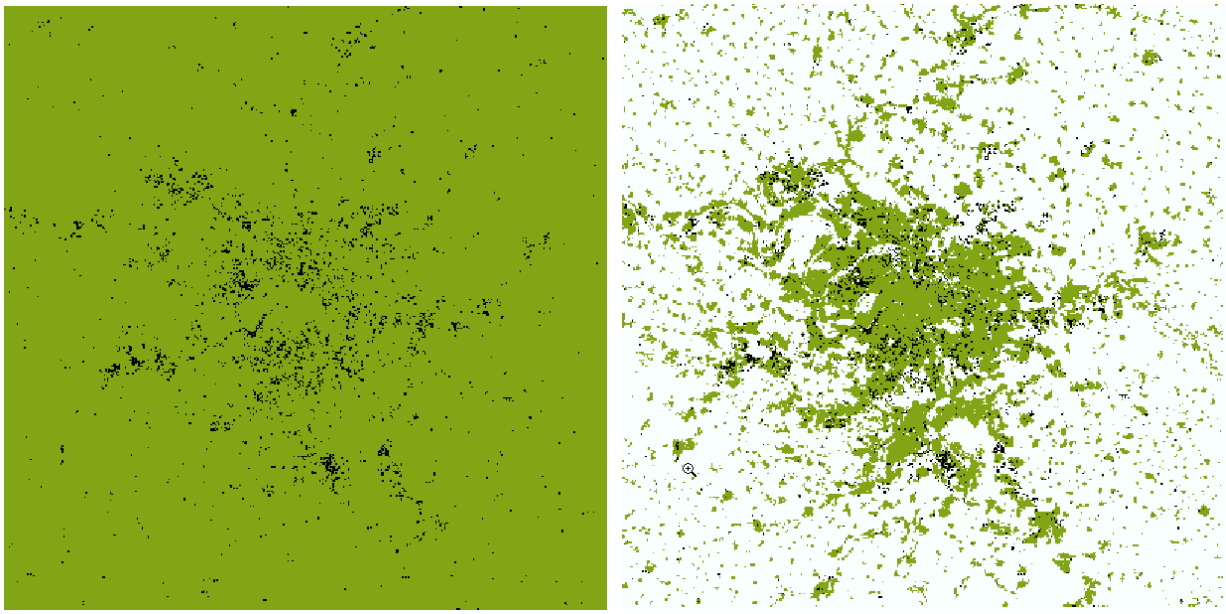


Figure 133 : Validation graphique - différentiel des types (illustration de l'auteur)

Cette analyse graphique nous permet de juger de la cohérence globale du modèle. Nous allons approfondir cette analyse par une étude chiffrée.

Différentiel chiffré

Nous avons approfondi notre analyse chiffrée selon trois axes : le pourcentage de validation global du bâti (91 %), le pourcentage de validation du bâti créé par GENIUS entre 1962 et 2008 (93%) et le pourcentage de validation du bâti réellement construit entre 1962 et 2008 (c'est à dire les mailles de la carte initiale de 2008 dont l'année de construction est postérieure à 1962) (84%).

Dans chacun des cas, nous avons observé le détail de la validation type par type et nous avons recherché les sources d'erreurs (voir annexe 7). Les taux de validation sont très bons pour la majorité des types à l'exception des immeubles de grande hauteur et des bâtiments d'activités.

Le taux de corrélation des immeubles de grande hauteur est dû au fait que cette forme urbaine est délicate à générer puisqu'elle peut correspondre à des densités faibles à fortes,

pouvant ainsi être confondue avec d'autres types. De plus, c'est un type qui n'est plus construit par notre modèle après 1975.

Le taux d'identification des bâtiments d'activités est également faible puisque GENIUS ne génère pas ce type de quartier.

Age de création des ilots

Nous cherchons ici à savoir si les périodes de construction des ilots correspondent à la réalité. Pour cela, nous allons vérifier que les âges auxquels les quartiers ont été créés correspondent aux tranches d'âge majoritaire de la carte initiale à savoir :

- avant 1949,
- de 1949 à 1974,
- de 1975 à 1989,
- de 1990 à 2004,
- de 2005 à 2007.

On constate que pour les ilots bâtis, 65,97% des mailles ont été générées à la bonne date. Connaissant les incertitudes sur les âges majoritaires de chaque quartier, ce résultat est relativement correct.

Vérifications ciblées

Afin d'étudier le phénomène de densification rapide et la manière dont celle-ci est prise en compte par GENIUS, nous nous sommes concentrés sur des zones récemment urbanisées : La Défense, le Front de Seine et Champs-sur-Marne.

Pour le Front de Seine on constate bien que l'augmentation de densité conduit à la création de 2 mailles de type « immeuble de grande hauteur » (voir Figure 134). Cependant, en raison de la difficulté d'identifier les mailles dont la hauteur est importante, ces deux mailles sont mal localisées. Le reste des mailles est correctement généré à l'exception d'une confusion entre des quartiers de pavillons continus et discontinus, morphologiquement très proches.

Pour Champs-sur-Marne, on constate également des petites confusions entre les quartiers de pavillons continus et discontinus et les quartiers d'immeubles continus de densités très proches (voir Figure 135). On remarque également, comme attendu, que les bâtiments d'activités ne sont pas générés par GENIUS. En revanche, cette zone nouvellement urbanisée

est globalement très bien reconstituée, tant du point de vue de l'emprise que des typologies rencontrées.

Pour La Défense, on constate bien l'apparition d'immeubles de grande hauteur sur une partie de la zone : il s'agit des immeubles construits avant 1975 (voir Figure 136). Pour le reste de la zone, les augmentations de densité sont traduites en quartiers de type « centre ancien » ou « immeuble continu et discontinu » car après 1975, notre scénario ne prévoit pas la possibilité de construire des immeubles de grande hauteur. On constate également que le centre commercial de La Défense n'a pas pu être généré.

Légende pour les figures ci-après :

Pavillonnaire discontinu
Pavillonnaire continu
Immeuble discontinu
Immeuble continu
Immeuble de grande hauteur
Centre ancien
Bâtiment d'activités
Bâtiment remarquable

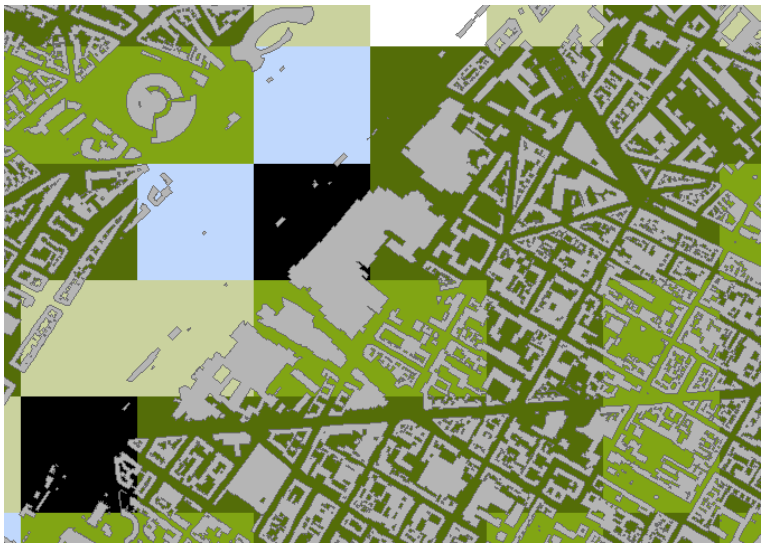
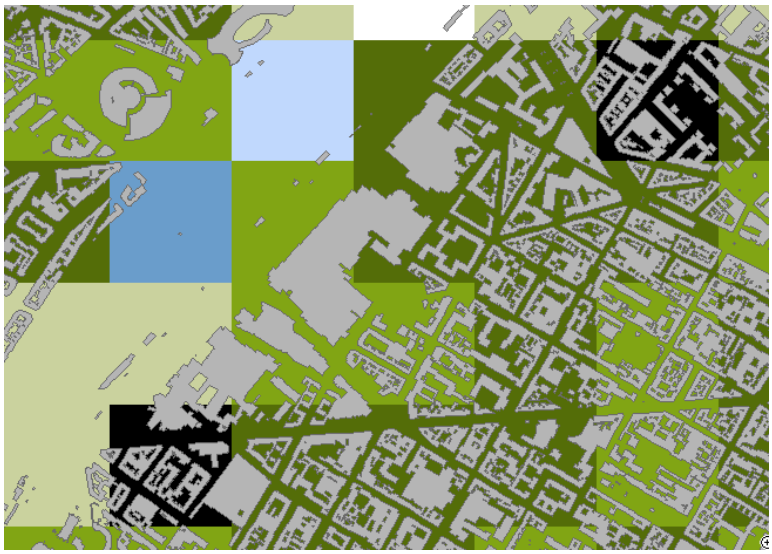
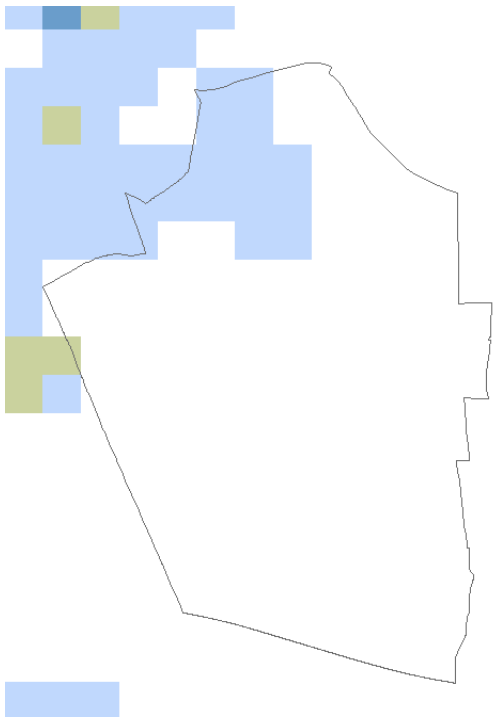
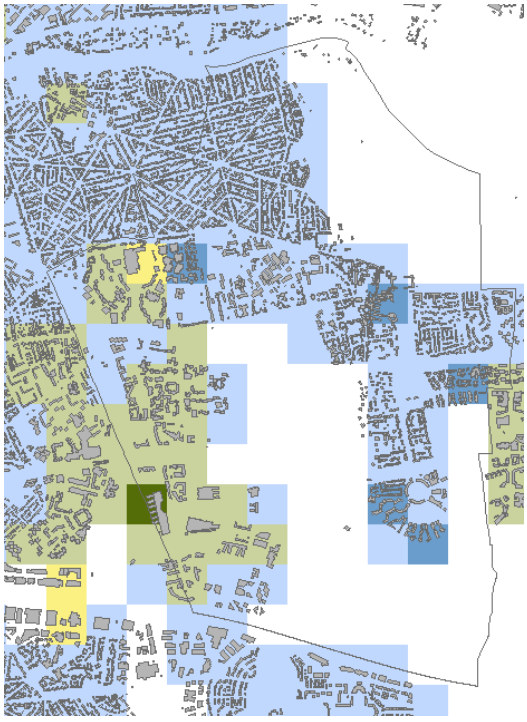
Carte initiale 1962	
Carte initiale 2008	
Carte simulée 2008	

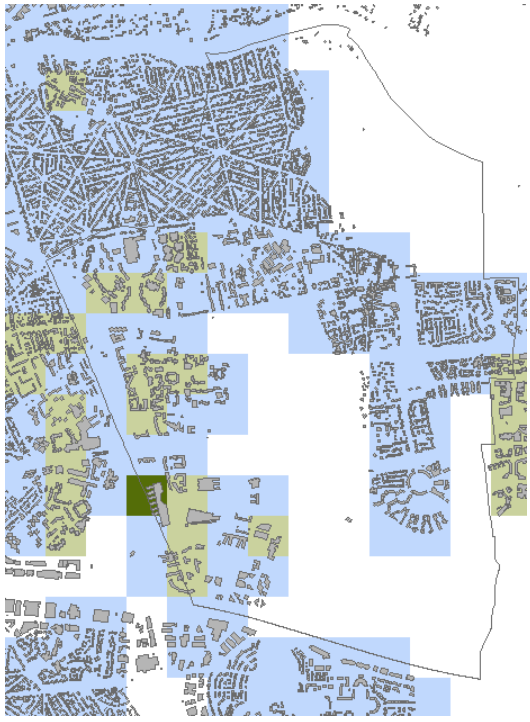
Figure 134 : Validation ciblée sur le Front de Seine (illustration de l'auteur)



Carte initiale 1962



Carte initiale 2008



Carte simulée 2008

Figure 135 : Validation ciblée sur Champs-sur-Marne (illustration de l'auteur)

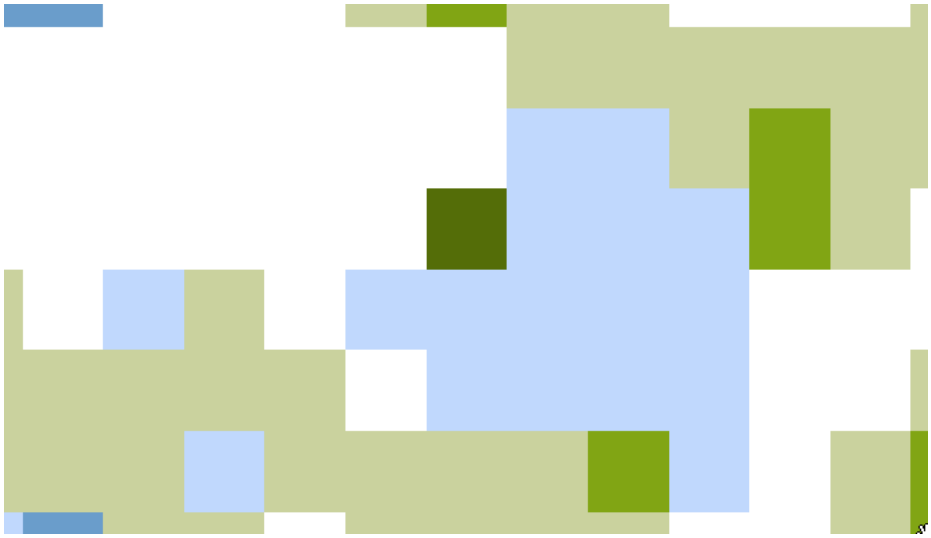
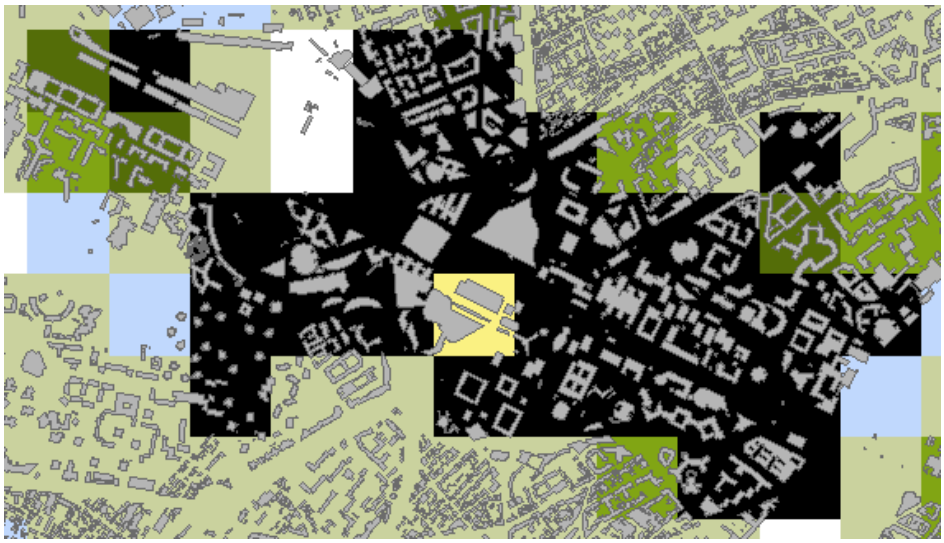
Carte initiale 1962	
Carte initiale 2008	
Carte simulée 2008	

Figure 136 : Validation ciblée sur La Défense (illustration de l'auteur)

3.9. GENIUS diachronique : discussion

Comme nous avons pu le voir dans les revues de littérature des chapitres 3.3.2 de la première partie et 3.2.1 de la deuxième partie, il n'existait pas jusqu'alors de modèle d'expansion urbaine permettant de connaître avec tant de précision la forme urbaine et les caractéristiques des bâtiments dans un travail prospectif. En ce sens, notre travail est une contribution à la recherche en énergétique urbaine.

Ainsi, GENIUS construit des bases de données multi-scalaires et multidisciplinaires capables d'évoluer dans le temps. Typologie, morphologie et technologie des bâtiments, ces données peuvent constituer les entrées de différents modèles d'énergétique urbaine afin de répondre aux questions suivantes : quelles consommations des bâtiments dans les différents futurs possibles ? Quelles accentuations de l'effet d'ilot de chaleur urbain ? Combien d'énergie solaire produite ? Quelles quantités d'énergie grise mises en œuvre dans les différentes villes ? Combien d'énergie dépensée pour les transports ? De quels cotés penche la balance du paradoxe énergétique urbain dans ces villes futures ? … Bien qu'il ne s'agisse nullement de prédictions, ces bases de données permettront de comparer des leviers d'actions impactant l'énergétique urbaine et devraient permettre de contribuer à la recherche et à la pratique.

Nous avions identifié, dans le chapitre 3.3 de la première partie, la nécessité de poser ces questions pour un horizon temporel lointain : celui du siècle, de manière à tenir compte de l'inertie de la ville et du changement climatique. Grâce au croisement d'une méthode de forecasting (reproduction de mécanismes d'évolution valables à moyen terme) et de scénarios experts (permettant de marquer des ruptures à long terme) GENIUS simule les évolutions possibles de la ville jusqu'à l'horizon 2100.

Nous avions également souligné, dans le chapitre 3.3 de la première partie, la diversité des échelles temporelles impliquées dans l'étude de la ville et les difficultés que cela impliquait. GENIUS diachronique peut être lancé avec un pas de temps allant d'un à dix ans et sur une durée variant de l'année au siècle. En ce sens, il est parfaitement compatible avec les échelles de temps des différentes disciplines de l'énergétique urbaine. En effet, nous avons vu au chapitre 1.6 de la première partie que les échelles de temps des différentes disciplines variaient de l'année (bilan énergétique du bâtiment) au siècle (climatologie). Par ailleurs, pour les disciplines dont la résolution temporelle est inférieure à l'année, nous considèrerons que l'évolution de la ville est négligeable et que les simulations d'énergétique urbaine peuvent se baser sur une vision statique de la ville.

Bien que les objectifs soient atteints, il est utile de préciser que des améliorations peuvent être envisagées pour consolider la méthode.

Tout d'abord, GENIUS n'est pour l'instant pas capable de faire évoluer les bâtiments de bureaux et les bâtiments d'activités de manière aussi précise qu'il le fait pour les logements. La raison essentielle vient du modèle prospectif d'expansion urbaine qui ne prend pas encore ces usages en compte. SLEDUM présente aussi une limitation en ce qui concerne la localisation des emplois dans l'agglomération. Ceux-ci sont circonscrits au centre de la ville ce qui ne permet pas de rendre compte de la large diversité des structures urbaines existantes. Or, nous avions vu dans le chapitre 1.2.3 de la première partie que cette structure a une influence primordiale sur les consommations de transports. Cependant, le choix d'un modèle d'expansion urbaine trop complexe nécessiterait des données de calibrage trop nombreuses et pourrait ne pas être applicable à notre travail.

En ce qui concerne les évolutions morphologiques, il s'agit pour l'instant de données attributaires dans une couche SIG vectorielle composée de mailles carrées. L'une des perspectives de ce travail est de traduire ces évolutions morphologiques en cartes vectorielles reprenant l'emprise de chaque bâtiment. Bien que ce module de GENIUS ne soit pas encore codé, ses bases ont été posées et sont présentées dans l'annexe 8.

Par ailleurs, nous n'avons pu valider que les évolutions typologiques. Dans le futur, nous souhaiterions procéder à une validation des évolutions morphologique de GENIUS. Celle-ci n'a pas pu être menée en raison du manque de bases de données passées incluant des informations sur la forme précise et la hauteur du bâti. Cependant, nous espérons pouvoir travailler avec des chercheurs comme Nicolas Ferrand, qui a constitué au cours de sa thèse une base de donnée extrêmement précise de la ville de Lyon incluant les emprises, les hauteurs et les typologies de bâtiment de 1945 à 2005 (Ferrand, 2010).

Pour finir, bien que la validation typologique de notre modèle sur le passé soit très concluante, il est nécessaire de prendre des précautions comme avec tout modèle prospectif. En effet, en se basant à la fois sur la reproduction des tendances passées et sur des scénarios experts, nous ne pouvons pas attester de la complète validité de GENIUS. En particulier, les scénarios qui ont été présentés sont volontairement caricaturaux afin de pouvoir comparer des résultats contrastés. Comme tout modèle prospectif, ces résultats ne peuvent être considérés comme des prévisions absolues. C'est uniquement la comparaison de leurs performances relatives qui aura un sens et permettra de contribuer à la recherche en énergétique urbaine.

4. Conclusion de la deuxième partie : intérêts de la méthode

Dans cette deuxième partie, nous nous proposions de développer une méthode et un outil, GENIUS, permettant de générer des bases de données multi-scalaires pour une recherche pluridisciplinaire.

Le premier objectif (volet synchronique) était de produire des données adaptées aux différentes échelles spatiales afin de permettre le croisement de différentes disciplines. Pour cela, nous avons choisi une représentation typologique de la ville car cette méthode combine les avantages de couvrir un large territoire tout en fournissant un niveau de détail élevé. Notre méthode se distingue des méthodes typologiques existantes par le fait qu'à chaque « individu » est associé un type de quartier mais également des caractéristiques propres. Sur la base d'une étude bibliographique, un ensemble de sept archétypes urbains représentatifs des villes françaises a été défini et un maillage de Paris et de Toulouse a été réalisé. Chaque maille est caractérisée par un système d'indicateurs morphologiques qui nous renseigne sur la forme urbaine. Nous avons ensuite sélectionné plusieurs méthodes de classification automatique et les avons mises en œuvre. La méthode retenue est celle de l'analyse en composante principale qui nous a permis de réaliser des cartes archétypales de Paris et Toulouse.

Le deuxième objectif (volet diachronique) était de faire évoluer ces données dans le temps afin de tenir compte des différentes échelles temporelles impliquées dans toute étude pluridisciplinaire. Ainsi, nous avons fait le choix de coupler GENIUS à un modèle prospectif existant, SLEDUM, afin d'y apporter de la précision en terme de forme urbaine. Notre travail a donc consisté à réaliser une descente d'échelle à partir des données produites par SLEDUM et de mécanismes d'évolutions des morphologies urbaines. Ces mécanismes ont été établis sur la base d'observations des évolutions passées et sur des scénarios prospectifs.

Comme nous avons pu le voir, l'approche GENIUS présente un certain nombre de limites tant sur le volet synchronique que sur le volet diachronique. La robustesse de la typologie établie doit être éprouvée dans d'autres villes et dans d'autres pays de manière à ne pas limiter les travaux d'énergétique urbaine aux villes de Paris et Toulouse. De même, l'identification automatique de ces typologies peut être appliquée à d'autres cas d'étude mais doit pour cela être approfondie. Sur le volet synchronique, les limites du modèle prospectif SLEDUM sont évidemment des limites pour notre modèle (pas d'évolution des bâtiments de bureaux, ville mono-centrique, etc.). Pour finir, en l'absence de données, seules les évolutions typologiques ont pu être validées.

Cependant, comme nous allons le voir dans la troisième partie, GENIUS demeure un outil fonctionnel et qui présente un intérêt pour les professionnels et les chercheurs.

En ce qui concerne la thermique du bâtiment, les données nécessaires aux simulations sont généralement suffisamment précises à l'échelle du bâti. L'apport de GENIUS est de permettre une étude de cette problématique à l'échelle du quartier ou même de la ville et sur un horizon temporel beaucoup plus large. Ainsi, il pourrait être possible d'évaluer l'effet de réglementations thermiques et urbaines sur le long terme : quel pourrait être l'impact de politiques de rénovation du bâti ancien ? Comment des réglementations influant la morphologie urbaine pourraient réduire les consommations énergétiques ? Quels quartiers consomment le plus dans une ville et nécessitent une intervention ? …

Par ailleurs, la connaissance des consommations énergétiques de chauffage et de climatisation d'une ville avec une granulométrie de 250 mètres par 250 mètres devrait permettre d'alimenter des études sur la production et la distribution d'énergies décentralisées (voir chapitre 1.6.3 de la première partie).

En ce qui concerne l'étude du microclimat urbain, ce champ de la climatologie est largement confronté à l'absence de précision des données nécessaires aux simulations (Martilli, 2007). Les bases de données synchroniques de GENIUS constituent donc un complément aux approches classiquement utilisées comme les LCZ de Stewart et Oke (Stewart & Oke, 2009). Elles apportent de la précision quant aux formes des bâtiments, à leur matérialité, au nombre d'occupants, aux usages, aux équipements techniques employés, à la végétation, etc. La simulation des conditions de confort extérieur est donc plus fine, combinant données à l'échelle de la rue et données à l'échelle de la ville. En effet, on sait que la morphologie et la matérialité d'un quartier mais aussi son emplacement dans la ville vont influencer le microclimat urbain (voir chapitre 1.5 de la première partie). Comme dans le cas de la thermique du bâtiment, le caractère prospectif de GENIUS devrait permettre de tirer des conclusions sur l'impact à long terme de différents leviers d'actions.

Les cartes produites par GENIUS sont également susceptibles de contribuer à l'étude des transports. En raison de l'inertie du réseau de transport, la prospective est un pilier essentiel de cette discipline. GENIUS permet d'apporter de la finesse aux modèles d'expansion urbaine, notamment en ce qui concerne la répartition de la population.

La combinaison de toutes ces disciplines est la base d'une réflexion sur l'énergie et le climat dans la ville. Les bases de données communes permettent un langage commun, des échanges et, finalement, une acculturation de ces différentes disciplines. Pour les urbanistes, c'est l'occasion de considérer ce problème dans son ensemble et peut être de pourvoir

trancher des questions complexes telles que celle des densités urbaines et du paradoxe énergétique urbain.

Afin de comprendre comment toutes ces disciplines fonctionnent ensemble, nous allons présenter dans la troisième partie de ce mémoire une application de GENIUS pour la recherche pluridisciplinaire.

Troisième partie : les applications de GENIUS, des contributions à l'énergétique urbaine

1. Introduction

Nous avons pu voir dans la première partie de ce chapitre que la recherche pluridisciplinaire était incontournable pour comprendre les interactions entre ville, climat et énergie. En particulier, les simulations numériques - qui ont déjà permis de grandes avancées dans la compréhension du climat urbain et dans les interactions qu'il entretien avec les autres préoccupations énergétiques de la ville (Colombert et al., 2012) - sont l'une des pistes pour croiser les disciplines.

Pour contribuer au bon fonctionnement de ce type d'approche, nous avons proposé une méthode et développé un outil pour constituer des bases de données multi-scalaires et évolutives : GENIUS.

L'objectif de cette partie est d'illustrer l'usage qui peut être fait de GENIUS au travers de quatre projets de recherche nationaux.

Les projets ACCLIMAT et MUSCADE, présentés dans le chapitre 2, illustrent une application concrète de GENIUS. Dans ces deux cas, GENIUS a permis aux différents modèles numériques de partager des données quelles que soient leurs échelles de travail ou leurs niveaux de détail. GENIUS a également contribué à faire évoluer ces données à l'échelle du siècle afin de réaliser une étude prospective et pluridisciplinaire des liens entre climat, ville et énergie. L'objectif final des projets est de constituer une aide et un outil informatique pour les décideurs urbains. Face à l'urgence du changement climatique et de l'épuisement des ressources, ceux-ci doivent en effet pouvoir anticiper les effets à moyen et long terme de différentes politiques d'aménagement du territoire sur le microclimat urbain, les consommations énergétiques liées au bâtiment, les transports, l'étalement urbain, etc.

Dans le chapitre 3, nous présenterons des applications futures de GENIUS au travers de deux projets de recherche récemment démarré (projet EPICURE) ou dont le démarrage est planifié en 2014 (projet MApUCE). Ces projets de recherche sont les prolongements d'ACCLIMAT et de MUSCADE. Nous verrons qu'une partie de leurs objectifs constituent des améliorations de GENIUS ou de la méthode générale des précédents projets.

2. Ville, énergie, climat : utilisation de GENIUS dans les projets ACCLIMAT et MUSCADE

2.1. Les projets de recherche ACCLIMAT et MUSCADE

2.1.1. Présentation générale

Les projets MUSCADE et ACCLIMAT sont deux projets de recherches portés par le CNRM / GAME. Ils visent à étudier les interactions entre structure de ville, procédés constructifs, consommation d'énergie, production d'énergie décentralisée, microclimat urbain et changement climatique. Ces projets étudient le cas des l'agglomérations Parisienne (MUSCADE) et Toulousaine (ACCLIMAT) à l'horizon 2100 afin de tenir compte de l'inertie de la structure urbaine et de l'échelle temporelle du changement climatique. La finalité de ces projets est de proposer une base de réflexion, à partir des exemples de Paris et Toulouse, aussi bien pour le monde scientifique que pour des décideurs, et d'identifier des leviers d'action pour éclairer des choix futurs en termes de réglementation du bâti, de modes de production d'énergie décentralisée et d'aménagement urbain. En particulier, les résultats sont une contribution à la question du paradoxe énergétique urbain : quelles densités et quelles formes urbaines permettent d'imaginer des villes durables en 2100 ?

Le projet MUSCADE (Modélisation Urbaine et Stratégies d'adaptation au Changement climatique pour Anticiper la Demande et la production Énergétique) est financé par l'Agence Nationale de la Recherche à travers l'appel à projets Villes Durables. MUSCADE réunit les laboratoires CNRM / GAME, CIRED, CSTB, LIENSs et LRA ainsi que l'IAU et l'APUR.

Le projet ACCLIMAT (Adaptation au Changement CLIMatique de l'Agglomération Toulousaine) est un projet de recherche financé par la fondation STAE (Fondation Sciences et Technologies pour l'Aéronautique et l'Espace). Il réunit les laboratoires CNRM / GAME, CERFACS, CIRED, GEODE, LIENSs, LRA et ONERA ainsi que l'AUAT.

La force de ces projets, mais également le principal défi à relever, résident dans la pluridisciplinarité de leurs équipes. Ainsi, une dizaine d'organismes privés ou publics ont dû apprendre à travailler ensemble.

2.1.2. Méthode des projets

L'objectif de ces projets est de considérer l'énergétique urbaine dans toute sa complexité disciplinaire. Ainsi, la ville est considérée comme un système pluridisciplinaire dont on modélise une partie des processus et leurs interactions, en particulier le microclimat et les consommations énergétiques.

La Figure 137 représente les différentes étapes de la méthode :

1. La définition de bases de données pour les trois échelles intervenant dans le système.
2. La définition de scénarios prospectifs (ou récits) par consultation d'experts.
3. La mise en œuvre de modèles prospectifs traduisant les différents scénarios préétablis.
4. La simulation « physique » des différentes villes créées par les modèles prospectifs.
5. L'évaluation de ces villes au travers d'une analyse croisée.
6. Le couplage des modèles et des scénarios.

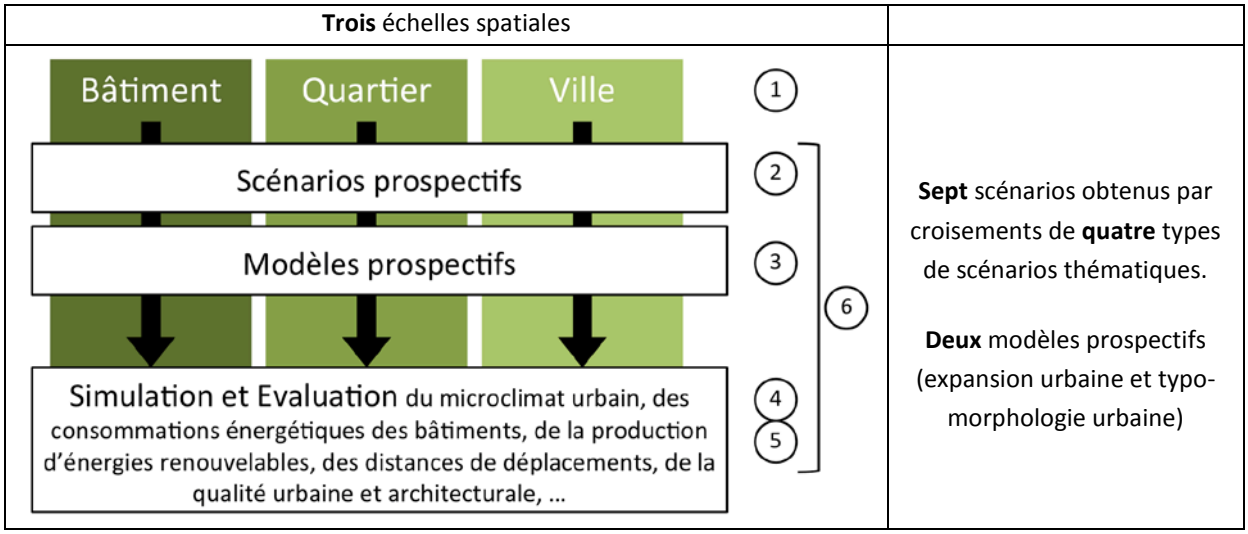


Figure 137 : Méthode générale des projets ACCLIMAT et MUSCADE (illustration de l'auteur)

Dans la suite du chapitre 2, nous prendrons pour exemple le travail qui a été mené dans ACCLIMAT sur la ville de Toulouse. Un travail similaire a été mené pour la ville de Paris (projet MUSCADE) mais nous ne le présenterons pas ici pour alléger la lecture.

(1) Les trois échelles spatiales du système de ville

Le système ville se décompose en trois niveaux d'échelle spatiale (voir Figure 137) :

- Le bâtiment, avec ses matériaux, ses équipements, ses usages et sa forme architecturale,

- Le quartier, qui regroupe un ensemble de bâtiments agencés selon le type de forme urbaine considéré et porteur de contraintes et d'opportunités en termes d'énergétique urbaine,
- La ville, constituée de quartiers dont le nombre et la répartition spatiale influencent également l'énergétique urbaine et en particulier le climat.

La première étape de la méthode est donc de définir des bases de données qui fonctionnent à toutes ces échelles et à tous ces niveaux de détail (voir point (1) sur la Figure 137). Cette étape correspond à la méthode synchronique de GENIUS présentée dans le chapitre 2 de la deuxième partie de ce mémoire.

(2) Les évolutions de la ville – Scénarios prospectifs

La ville et les sous-systèmes qui la composent vont évoluer dans le temps en lien les uns avec les autres ; mais également sous l'influence de facteurs exogènes : les politiques urbaines locales, les politiques environnementales locales et internationales, les évolutions technologiques, les évolutions économiques et sociales, les évolutions démographiques, etc. (Darley & Zunino, 2010; Viguié, 2012). De même, le climat va évoluer et interagir avec l'expansion urbaine bouleversant les conditions actuelles (Potvin et al., 2012).

Pour prendre en compte ces évolutions, les projets ACCLIMAT et MUSCADE se basent sur une double approche croisant des scénarios prospectifs et des modèles prospectifs (Marchadier et al., 2012) (voir points (2) et (3) sur la Figure 137).

En ce qui concerne les scénarios, la méthode est de mener une analyse croisée des grandes tendances d'évolution selon quatre thèmes : les grandes tendances globales (situation économique et politiques énergétiques mondiales), les grandes tendances locales (solde migratoire et démographique local, situation économique locale), les scénarios d'aménagement du territoire (voir chapitre 0 de la deuxième partie) et les scénarios d'évolution des technologies (mode constructifs, modes de déplacements, …) (voir chapitre 0 de la deuxième partie).

Ces scénarios thématiques sont ensuite détaillés (c'est à dire traduit en données d'entrées pour les modèles) et combinés dans des récits cohérents à l'échelle du siècle que l'on appelle « scénarios systémiques » (voir Figure 138) (Marchadier et al., 2012).

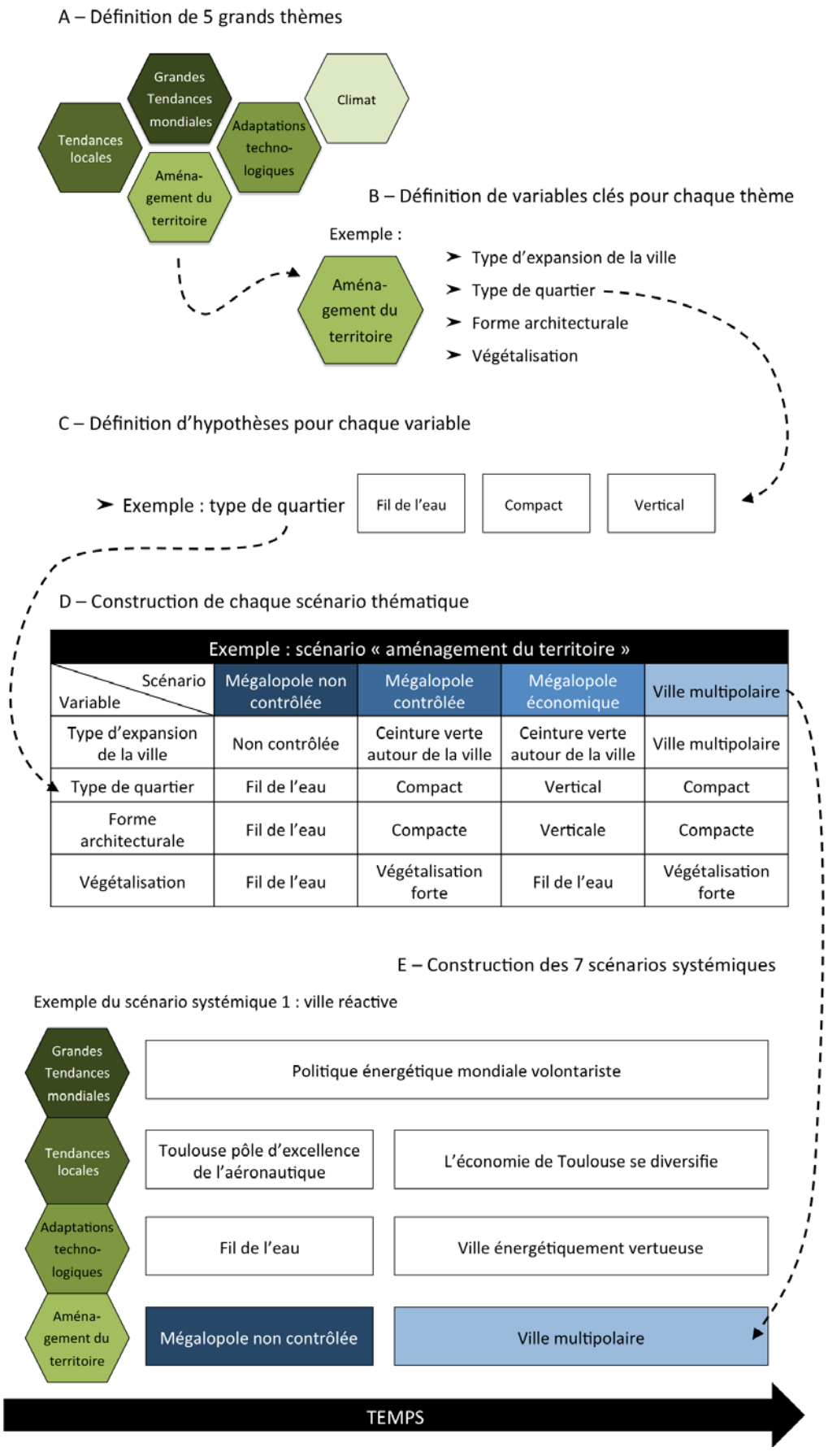


Figure 138 : Méthode de définition des scénarios (illustration de l'auteur)

La mise au point de ces scénarios se fait par un processus de consultation d'experts qui a été présenté précédemment (voir chapitre 0 de la deuxième partie). Elle conduit à la définition de sept scénarios systémiques. Chaque scénario est croisé avec trois scénarios climatiques qui correspondent à des températures moyennes supérieures de 2, 4 ou 6°C par rapport au climat actuel.

(3) Les évolutions de la ville – Modèles prospectifs

Parallèlement à la mise au point de ces scénarios, des modèles prospectifs sont développés ou adaptés pour les projets ACCLIMAT et MUSCADE (voir point (3) sur la Figure 137). Pour tout ce qui traite des évolutions urbaines, il s'agit des modèles SLEDUM et GENIUS diachronique qui ont fait l'objet du chapitre 3 de la deuxième partie de ce mémoire.

A ces modèles, il faut également ajouter le modèle atmosphérique Meso-NH de Météo-France qui simule les évolutions du climat à l'échelle de la région (Lafore et al., 1997).

Ces modèles sont alimentés par des variables dépendantes des scénarios prospectifs ou de données existantes pour la ville de Toulouse actuelle.

(4) Simulations

L'étape suivante concerne la simulation « physique » des villes ainsi créées de manière à évaluer les points fort et les points faibles de chacune en terme de microclimat urbain, consommations énergétiques des bâtiments, etc. (voir points (4) sur la Figure 137).

Les simulations intégrées de la ville sont réalisées au travers du modèle TEB (Town Energy Balance). Ce modèle, développé par Valéry Masson au CNRM / GAME, permet de calculer les échanges d'énergie et d'eau entre la ville et l'atmosphère et d'évaluer le microclimat urbain et les consommations de chauffage et de climatisation des bâtiments (Bueno, Norford, Pigeon, & Britter, 2011; Masson, 2000). Il a été validé dans de nombreuses villes et est utilisé dans de nombreux travaux de recherches. TEB est intégré au modèle SURFEX (interaction surface-atmosphère) lui-même couplé au modèle de climat Meso-NH. TEB prend en compte de nombreux processus influençant le bilan énergétique de la ville parmi lesquels :

- une géométrie simplifiée des quartiers (rue canyon bidimensionnelle),
- le piégeage radiatif et les ombres liées à cette géométrie,
- les échanges thermiques au niveau des toits, des murs, des fenêtres, des routes et des jardins,

- la matérialité, la végétalisation et l'irrigation de ces différentes surfaces,
- les ombres de la végétation,
- l'interception, l'évaporation et le ruissellement de l'eau de pluie,
- les échanges turbulents et le microclimat dans la rue,
- les équipements de chauffage et de climatisation.

SURFEX utilise comme données d'entrée les informations issues des scénarios ou produites par GENIUS : usages des sols (bâti, végétal, minéral, eau), géométrie des bâtiments, matérialité des bâtiments et équipements techniques.

Ainsi, il produit un certain nombre d'indicateurs qui permettent d'évaluer la qualité environnementale de la ville.

Par ailleurs, les modèles de prospectives permettent également de produire des indicateurs utiles. La dernière étape consistera donc à proposer une analyse croisée des sept scénarios basée sur un système d'indicateurs.

(5) Évaluation

Parmi les différentes méthodes d'évaluation environnementale des villes, les systèmes d'indicateurs sont particulièrement adaptés à la pluralité des échelles et des disciplines (Adolphe, Bonhomme, Dubois, & Martins, 2013). Ils sont d'ailleurs de plus en plus utilisés par les décideurs urbains ainsi que par les organisations internationales (International Atomic Energy Agency, 2005; Organisation for Economic Co-operation and Development, 2011; World Resources Institute, 1995).

D'après Adolphe, les indicateurs de tels systèmes doivent remplir cinq conditions : (1) être représentatifs des problématiques environnementales étudiées, (2) être scientifiquement solides, (3) être simples, faciles à interpréter et capables de traduire les tendances au fil du temps, (4) être adaptés aux différentes échelles impliquées et (5) pouvoir être comparés à une valeur cible (Adolphe et al., 2013).

Il existe trois principaux moyens de construire un tel jeu d'indicateurs : (1) par une approche thématique globale (énergie, climat, mobilité, etc.), (2) par une classification des différents objectifs (réduire les consommations d'énergie, améliorer le confort, etc.) et (3) par une classification des différentes solutions (limiter la vitesse des véhicules, augmenter l'isolation des bâtiments, …) (Adolphe et al., 2013).

Dans les projets MUSCADE et ACCLIMAT, les approches (1) et (2) sont mises en œuvre pour déterminer un système d'indicateurs. D'une part, les attentes des décideurs urbains sont prises en compte au travers d'un sondage (voir Annexe 1). D'autre part, une approche thématique est mise en œuvre (Chouillou, 2012). Le tableau ci-dessous reprend les indicateurs finalement retenus dans le cadre des projets ACCLIMAT et MUSCADE. Pour chaque indicateur, des valeurs cibles ont été définies. Notons que pour des raisons de faisabilité et de simplification de la communication, seule une partie de ces indicateurs sont retenus dans la synthèse finale des projets.

Tableau 45 : Indicateurs d'évaluation de la ville (Chouillou, 2012)

Thématique	Indicateur	Modèle	Indicateur retenu dans la synthèse
Climat	Force du vent	SURFEX	
	Températures extrêmes	SURFEX	
	Ilot de chaleur	SURFEX	oui
Socio économie	Confort thermique (indice UTCI * à l'intérieur, à l'extérieur à l'ombre et à l'extérieur au soleil)	SURFEX	
	Surface du logement	GENIUS	
	Taux d'habitat individuel	GENIUS	
	Distance parcourues entre le domicile et le travail	SLEDUM	oui
	Fréquentation des transports en commun	SLEDUM	
	Prix moyen des loyers	SLEDUM	
	Prix moyen du transport	SLEDUM	
	Cout de la vie	SLEDUM	
	Densité de population	GENIUS	

* Voir glossaire

Thématique	Indicateur	Modèle	Indicateur retenu dans la synthèse
Énergie	Consommation de chauffage par m2 de plancher et par personne	SURFEX	oui
	Consommation de climatisation par m2 de plancher et par personne	SURFEX	oui
	Consommation énergétique totale	SURFEX	
	Taux de bâtiment climatisé	GENIUS	
	Toitures pourvues de panneaux photovoltaïques	SURFEX + GENIUS	
	Puissance électrique appelée	SURFEX	
	Potentiel de production d'énergie solaire thermique et photovoltaïque par mètre carré de plancher et par personne	SURFEX	
	Bilan énergétique (consommation – production)	SURFEX	
Forme urbaine	Densité bâtie	GENIUS	oui
	Coefficient d'emprise au sol	GENIUS	oui
	Hauteur des bâtiments	GENIUS	oui
	Répartition des types de forme urbaine	GENIUS	oui
	Age des bâtiments	GENIUS	
	Expansion urbaine	SLEDUM	oui
	Taux de renouvellement du parc urbain	GENIUS	oui
Environnement	Pourcentage d'espaces verts	GENIUS	oui
	Consommation d'eau	SURFEX	
	Toitures végétalisées	SURFEX + GENIUS	
	Rejets de CO_2	SURFEX	

(6) Couplage des modèles et des scénarios

Un des objectifs des projets est de développer un modèle numérique combinant l'expansion urbaine, la simulation du climat urbain et la simulation des consommations et productions énergétique des bâtiments. La sixième étape consiste donc au couplage des modèles par le CERFACS (Moine, 2012). La plateforme finale est alimentée par des scénarios combinés de climat, d'aménagements urbains, de technologies du bâti, de démographie et de politiques mondiales.

2.1.3. Les sept scénarios systémiques

Les scénarios systémiques cités dans le chapitre précédent se traduisent sous la forme de récits et de valeurs pour un certain nombre de variables. Nous ne présenterons pas ici le détail de l'ensemble des variables (voir pour cela l'annexe 9) mais uniquement les récits des scénarios exposés ci-après qui permettent de mieux comprendre la cohérence des simulations. Ces récits d'évolution sont issus du travail des équipes d'ACCLIMAT et des experts consultés.

Scénario 1 : ville réactive

Un choc pétrolier majeur dans les années 2040 provoque brutalement une crise économique dans la ville de Toulouse dont l'activité est centrée autour d'un unique pôle d'excellence : l'aéronautique. Cela réduit le solde migratoire vers Toulouse. En parallèle, aucune politique climatique volontariste mondiale n'est mise en place. Pour faire face à la nouvelle donne économique, des actions curatives sont entreprises au niveau local : l'urbanisation de la mégalopole est dès lors mieux contrôlée, les formes urbaines compactes sont encouragées par la réglementation, des nouvelles technologies favorisant les économies d'énergie sont développées à la hâte. Il n'y a cependant pas de véritable réflexion globale et on constate un manque de recul quant à la mise en place d'un développement urbain durable.

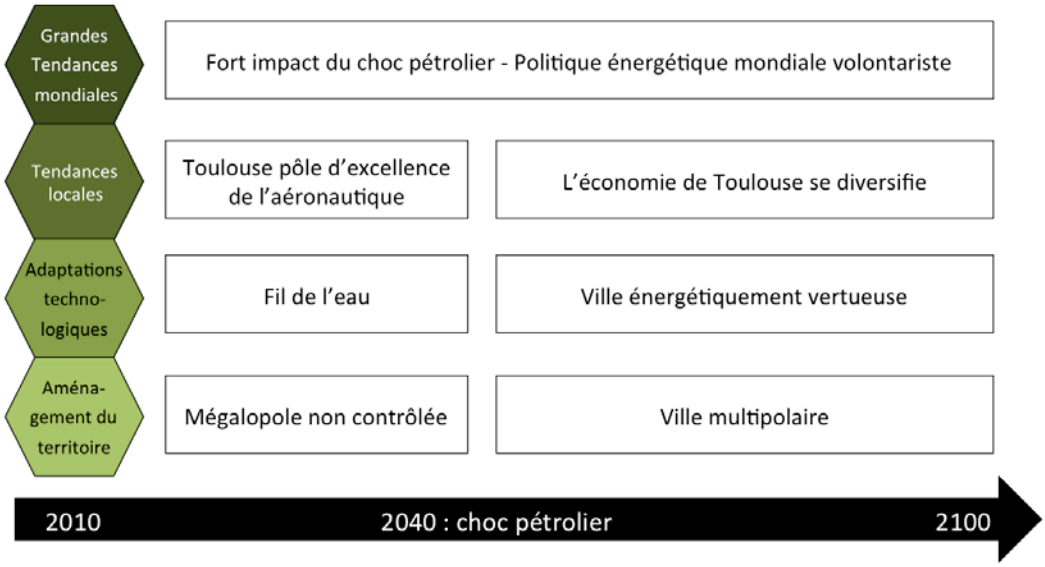


Figure 139 : Scénario systémique 1 « ville réactive »

Scénario 2 : ville réfléchie

Le choc pétrolier provoque également une crise économique dans la ville. Celle-ci perdure et réduit le solde migratoire vers Toulouse. Une politique climatique volontariste mondiale a cependant été mise en place auparavant. Elle a permis d'amorcer une véritable réflexion globale sur la gestion des gaz à effet de serre dans la ville. La crise contribue à renforcer cette dynamique en particulier au niveau urbain avec une réflexion qui se fait au niveau régional et qui conduit à développer une ville multipolaire. Toulouse est plus efficace dans la lutte contre le réchauffement climatique grâce notamment à une politique forte d'optimisation des déplacements. Les transports en commun sont efficaces et privilégiés par la population, et la durée des déplacements est limitée. Les nouvelles technologies favorisant les économies d'énergie sont développées de manière optimale et vertueuse. Les formes urbaines compactes sont encouragées par la réglementation.

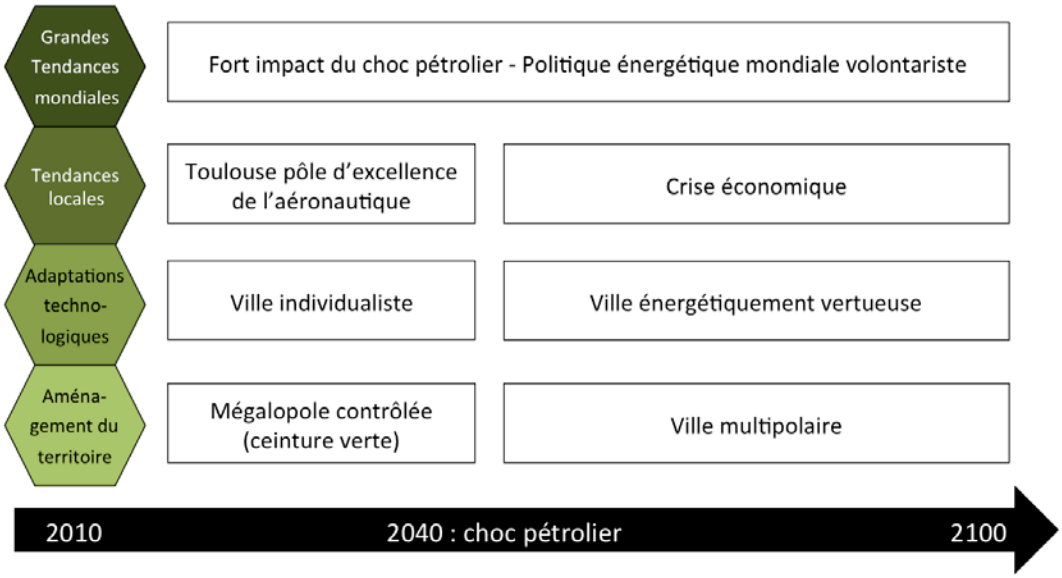


Figure 140 : Scénario systémique 2 « ville réfléchie »

Scénario 3 : ville dynamique

Le faible impact du choc pétrolier permet à la ville dont l'activité est initialement centrée autour de l'aéronautique, d'éviter la crise économique. L'économie a ainsi le temps de s'adapter en se diversifiant. Une politique climatique volontariste mondiale a par ailleurs été mise en place. Elle a permis d'amorcer une véritable réflexion globale sur la gestion des gaz à effet de serre dans la ville. Cependant, la mégalopole Toulousaine s'en tient aux strictes exigences mondiales en matière de lutte contre l'effet de serre car les politiques environnementales ne constituent pas une priorité face aux préoccupations économiques.

Les nouvelles technologies favorisant les économies d'énergie sont toutefois développées de manière optimale et vertueuse au lendemain du choc pétrolier en raison du marché qu'elles représentent. Le développement économique étant le principal moteur d'évolution de la ville, les quartiers doivent témoigner d'une certaine densité de population afin de maintenir le tissu économique local, ainsi un dispositif de ceinture verte est choisi pour limiter l'expansion urbaine. Les petits et grands collectifs sont donc privilégiés.

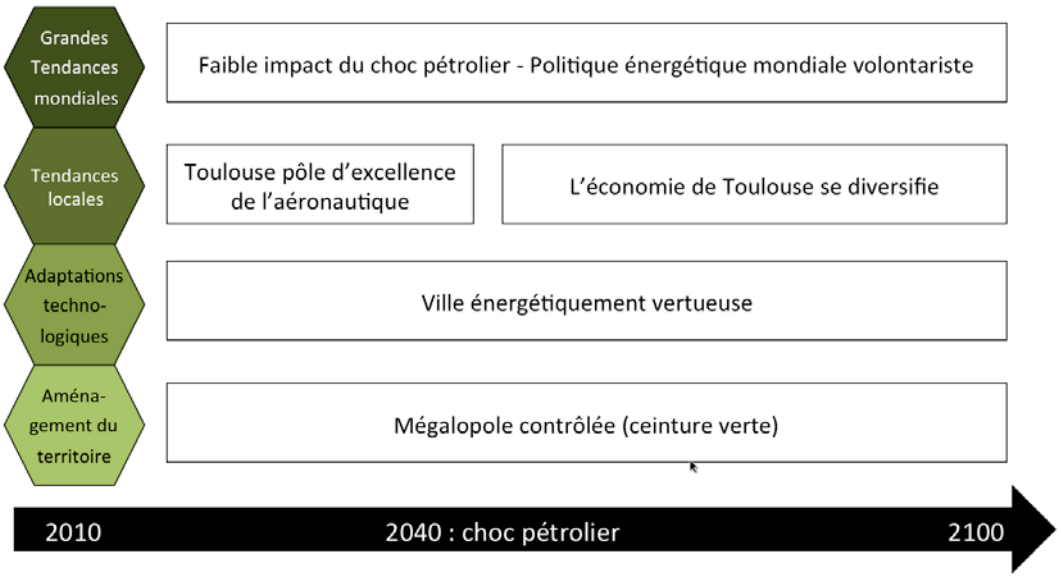


Figure 141 : Scénario systémique 3 « ville dynamique »

Scénario 4 : ville verte

Comme précédemment, le faible impact du choc pétrolier permet à la ville d'éviter la crise et à l'économie de se diversifier. Une politique climatique volontariste mondiale a été mise en place et a permis d'amorcer une véritable réflexion globale sur la gestion des gaz à effet de serre dans la ville. Des initiatives locales sont entreprises pour aller au-delà des exigences mondiales. L'extension incontrôlée de la ville est interrompue par la mise en place d'une véritable politique cohérente en matière d'aménagement territorial. Le modèle de ville visé est celui d'une ville multipolaire, où les espaces non urbains conservent une fonctionnalité écologique. Des formes urbaines compactes sont encouragées par la réglementation thermique. Toulouse est plus efficace dans la lutte contre le réchauffement climatique grâce notamment à une politique forte d'optimisation des déplacements. Les transports en commun sont efficaces et privilégiés par la population, et la durée des déplacements est limitée. Des nouvelles technologies favorisant les économies d'énergie sont développées.

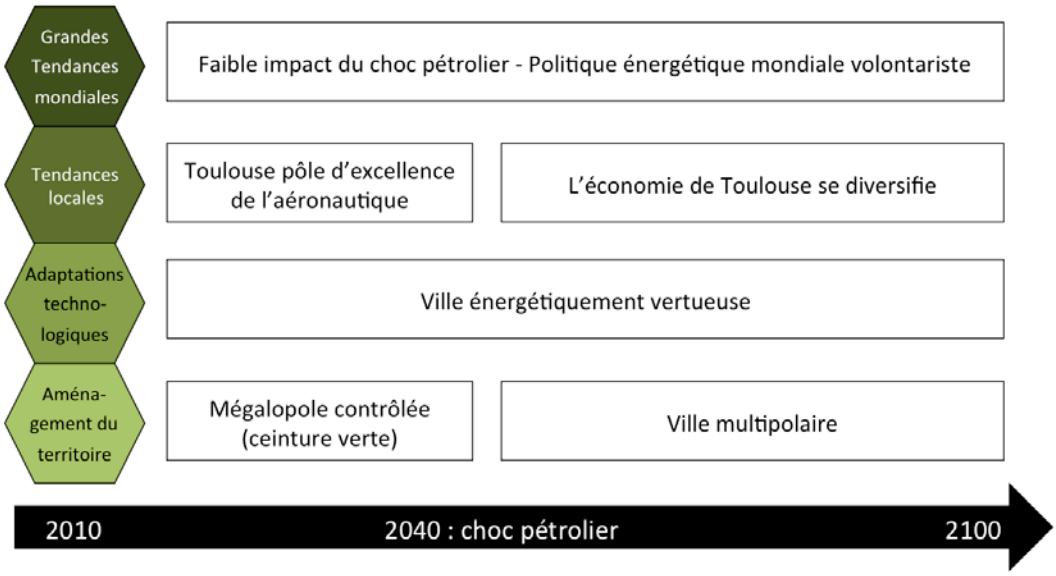


Figure 142 : Scénario systémique 4 « ville verte »

Scénario 5 : Ville en crise

En l'absence de politique climatique volontariste mondiale et malgré un faible choc pétrolier, la ville dont l'activité est centrée sur l'aéronautique, est touchée de plein fouet par la crise économique. Cette mégalopole non contrôlée et tentaculaire n'a par conséquent pas les moyens de s'adapter ni de mettre en place une politique de réduction des gaz à effet de serre. L'extension urbaine de la ville se poursuit sans beaucoup de contraintes réglementaires mais est limitée par le fait que le solde migratoire est faible vers Toulouse. Les formes urbaines peu denses et peu compactes sont majoritairement construites.

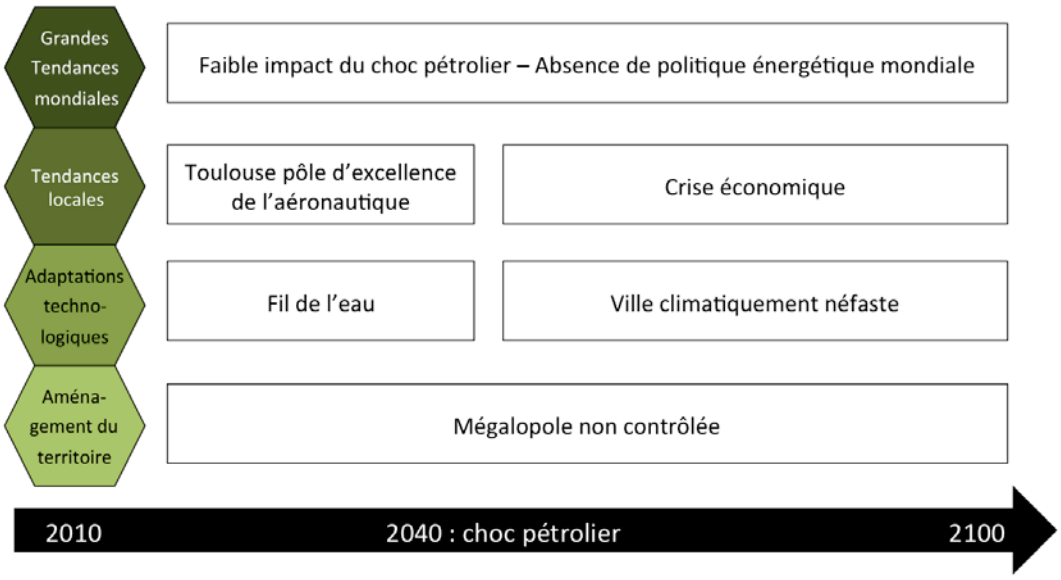


Figure 143 : Scénario systémique 5 « ville en crise»

Scénario 6 : Ville passive

La crise économique est évitée notamment grâce à la conjugaison d'un faible choc pétrolier et d'une économie diversifiée autour de pôles de complémentarité. Bien qu'aucune politique climatique volontariste mondiale n'existe, la ville engage des actions curatives superficielles afin d'éviter une crise climatique. L'extension urbaine de la ville se poursuit sans beaucoup de contraintes réglementaires et les formes urbaines peu denses et peu compactes sont majoritairement construites.

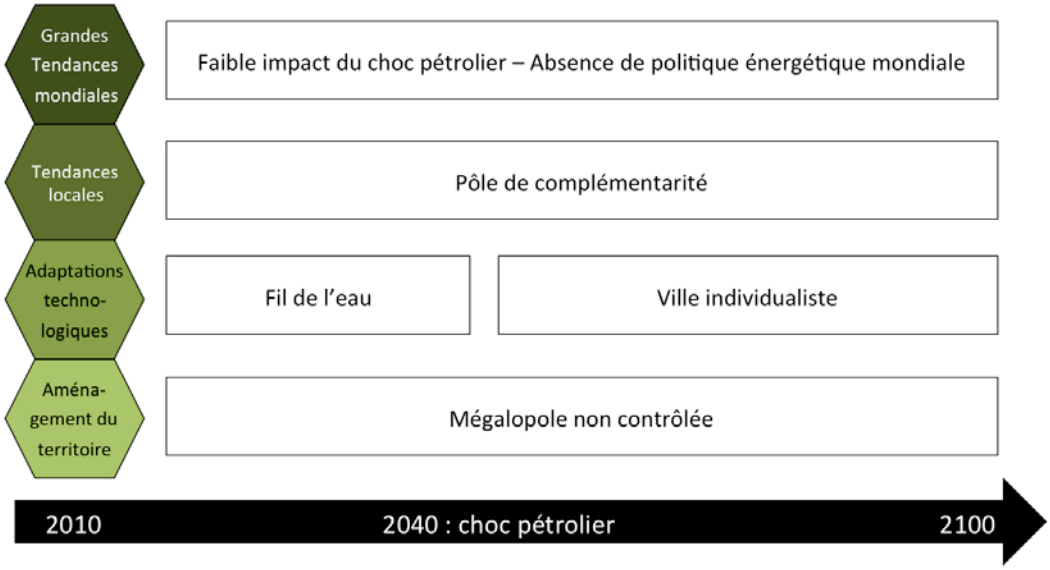


Figure 144 : Scénario systémique 6 « ville passive»

Scénario 7 : Ville climatiquement néfaste

Comme précédemment, la crise économique est évitée grâce à un faible choc pétrolier et à une économie diversifiée. En l'absence de politiques climatiques volontaristes mondiales, aucune action n'est prise au niveau local. Cette passivité face à la crise climatique est accentuée par une extension urbaine qui se poursuit sans contraintes réglementaires. Des formes urbaines peu denses et peu compactes sont majoritairement construites.

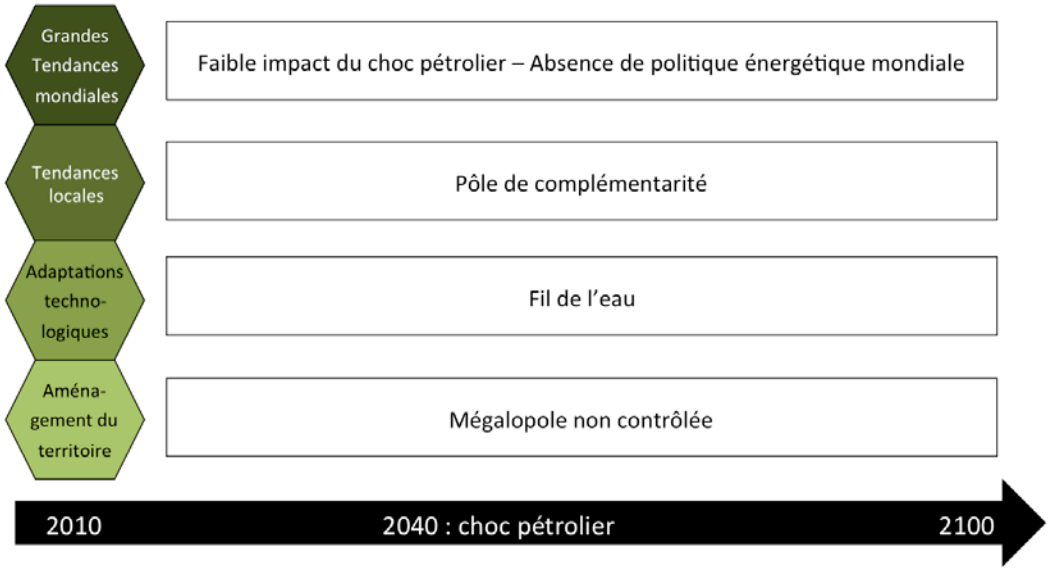


Figure 145 : Scénario systémique 7 « ville climatiquement néfaste»

2.2. Application de GENIUS : évolutions de la ville de Toulouse

Dans le cadre du projet ACCLIMAT, le modèle GENIUS couplé à SLEDUM permet de simuler des évolutions possibles de la ville de Toulouse tout en fournissant des bases de données suffisamment précises pour alimenter des modélisations intégrées d'énergétique urbaine au travers du logiciel SURFEX. Nous allons présenter dans ce chapitre les résultats obtenus pour les sept scénarios systémiques définis précédemment. Les fiches récapitulatives de l'ensemble des résultats sont présentées en annexe 9.

2.2.1. Rappel concernant les scénarios

Les évolutions de la ville simulées par le couple GENIUS / SLEDUM sont bien évidemment influencées par les scénarios thématiques « aménagement du territoire », mais également par les scénarios « grandes tendances mondiales » et « tendances locales ». En particulier, ces deux derniers axes thématiques déterminent le solde migratoire vers Toulouse qui influence largement l'étalement urbain.

Notons qu'en termes d'évolution urbaine, les scénarios 6 et 7 sont identiques. Seules les caractéristiques technologiques des bâtiments les distinguent.

Tableau 46 : Traduction des scénarios systémiques en variables GENIUS et SLEDUM

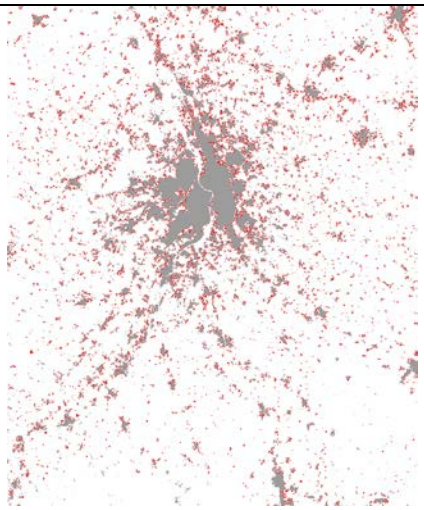
Scénario systémique	Variables GENIUS			Variable SLEDUM	
	Type de quartier	Forme architecturale	Végétalisation des espaces libres	Type d'expansion de la ville	Démographie
1 – Ville réactive	Avant 2040 : fil de l'eau Après 2040 : compact	Avant 2040 : fil de l'eau Après 2040 : compacte	Avant 2040 : fil de l'eau Après 2040 : végétalisation intensive	Avant 2040 : aucun contrôle Après 2040 : ville multipolaire	En baisse après 2040
2 – Ville réfléchie	Compact	Compacte	Végétalisation intensive	Avant 2040 : ceinture verte Après 2040 : ville multipolaire	En baisse après 2040
3 – Ville dynamique	Vertical	Verticale	Végétalisation fil de l'eau	Ceinture verte	En hausse
4 – Ville verte	Compact	Compacte	Végétalisation intensive	Avant 2040 : ceinture verte Après 2040 : ville multipolaire	En hausse
5 – Ville en crise	fil de l'eau	fil de l'eau	Végétalisation fil de l'eau	Aucun contrôle	En baisse après 2040
6 – Ville passive	fil de l'eau	fil de l'eau	Végétalisation fil de l'eau	Aucun contrôle	En hausse
7 – Ville climatiquement néfaste	fil de l'eau	fil de l'eau	Végétalisation fil de l'eau	Aucun contrôle	En hausse

2.2.2. Évolutions globales de la ville

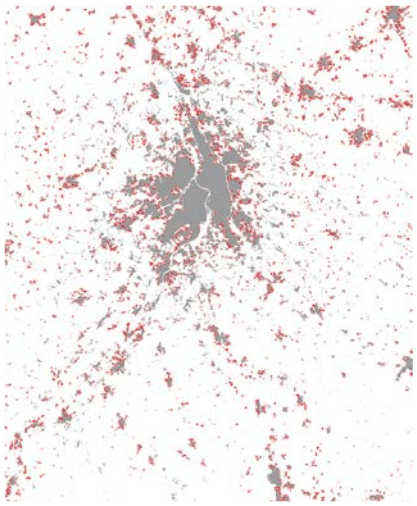
Dans ce chapitre nous considèrerons uniquement les résultats de SLEDUM seul. Il s'agit donc d'observer la structure globale de la ville (monocentrique ou polycentrique, étalée ou compacte, dense ou pas, etc.). On peut déduire de ce modèle l'impact des différents scénarios sur l'étalement urbain (mitage des espaces naturels) et sur les distances moyennes parcourues par les ménages entre le domicile et le travail.

Tableau 47 : Indicateurs d'expansion de Toulouse produits par SLEDUM

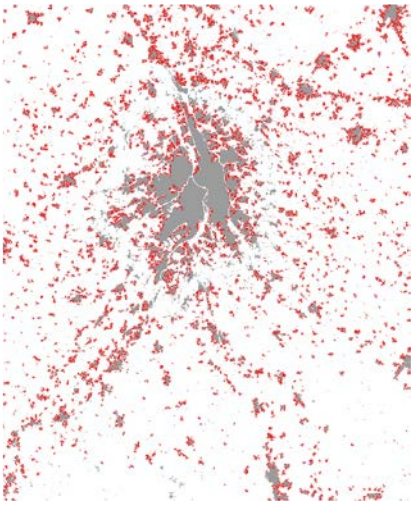
Scénario		Surface urbanisée (milliers d'hectares)	Densité bâtie brute moyenne	Densité bâtie brute moyenne sur le pôle urbain	Distance domicile - travail (km / mois / personne)
Toulouse en 2010		75	0,27	0,32	404
Toulouse en 2100	1 – Ville réactive	101	0,19	0,24	638
	2 – Ville réfléchie	95	0,20	0,25	607
	3 – Ville dynamique	120	0,21	0,30	883
	4 – Ville verte	105	0,21	0,30	849
	5 – Ville en crise	103	0,19	0,24	639
	6 – Ville passive & 7 – Ville néfaste	144	0,18	0,24	804



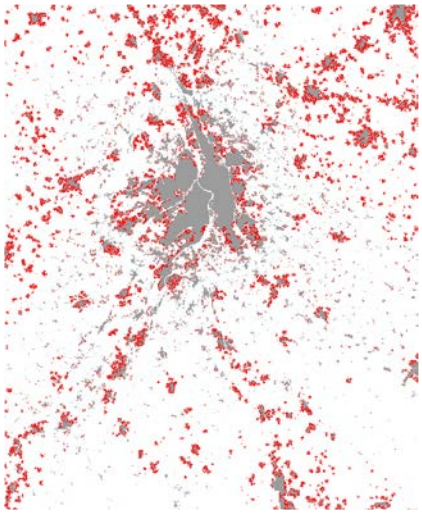
1 – Ville réactive



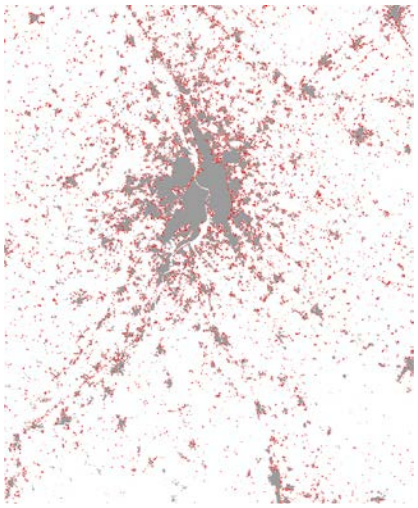
2 – Ville réfléchie



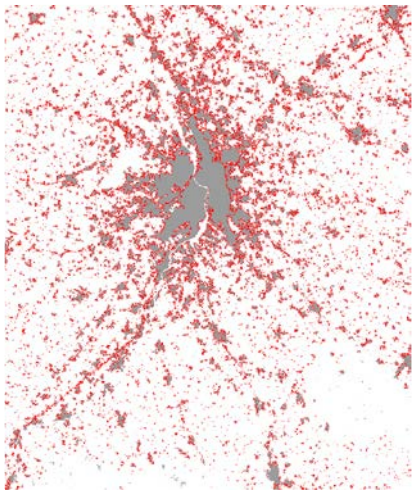
3 – Ville dynamique



4 – Ville verte



5 – Ville en crise



6 – Ville passive &
7 – Ville climatiquement néfaste

Figure 146 : Évolution de Toulouse selon SLEDUM entre 2010 (en gris) et 2100 (en rouge)

Remarques générales

En ce qui concerne les surfaces urbanisées, ce que l'on remarque dans un premier temps c'est l'effet de la démographie. En effet, entre les scénarios où le solde migratoire vers Toulouse est important (scénarios 3, 4, 6 et 7) et ceux où il est plus réduit (scénarios 1, 2 et 5) les surfaces des tâches urbaines sont relativement différentes.

Par ailleurs, si on compare les scénarios où l'évolution démographique est identique (scénarios 3, 4, 6 et 7), on remarque que lorsque l'expansion est contrôlée par une politique visant la multipolarité de la ville (scénario 4), l'étalement urbain est moins important que si l'on se limite à un dispositif du type ceinture verte (scénario 3). L'étalement urbain maximal est cependant lié à une absence totale de contrôle de l'expansion urbaine (scénarios 6 et 7).

L'examen des cartes conduit aux mêmes conclusions. On peut également noter en observant les cartes que l'influence des politiques d'aménagement urbain, quelles qu'elles soient, n'est pas très contrastée lorsque la population n'augmente pas. En effet, l'essentiel de la ville étant bâtie, les politiques mises en place ne peuvent plus affecter significativement la structure de la ville.

En ce qui concerne la densité bâtie, on peut observer que quel que soit le scénario, celle-ci diminue par rapport à l'état initial. En effet, le centre ancien est la zone de la ville la plus dense et tous les types d'expansion observés jusqu'à présent sont moins denses que cette morphologie.

Cependant, en fonction des scénarios, on peut observer des nuances. En comparant les scénarios d'évolution démographique identique, on observe que les villes où aucun contrôle de l'expansion urbaine n'existe ont logiquement une densité plus faible que celle ou l'implantation du bâti est contrainte.

On observe toujours que les scénarios à faible croissance laissent moins de place aux politiques urbaines. Par exemple, la « ville réactive » a une densité identique à la « ville en crise ». La raison est que leurs politiques urbaines sont identiques jusqu'en 2040 (aucun contrôle de l'étalement urbain) et qu'à partir de 2040, la chute de la démographie limite l'impact des politiques de contrôle de l'expansion du scénario « ville réactive ».

En ce qui concerne les distances parcourues, on remarque que quel que soit le scénario, la distance moyenne entre le domicile et le lieu de travail des ménages augmente en même

temps que la ville s'étend. Très logiquement, les villes où la croissance démographique est faible et où la ville s'étend peu ont des distances de déplacement globalement plus faibles.

On se limitera par la suite à la comparaison des scénarios à forte croissance démographique qui traduisent de manière plus contrastée les politiques urbaines.

Scénario 3 – Ville dynamique

Sur la carte du scénario 3 « ville dynamique », on remarque l'effet de la ceinture verte. Cette zone non constructible en périphérie de la ville a pour objectif de préserver des corridors écologiques et de contraindre l'urbanisation au centre de Toulouse. Si la ceinture verte ainsi que d'autres espaces naturels sont bien protégés, l'urbanisation a cependant tendance à se poursuivre au-delà des limites de la ceinture verte. Ainsi, les distances parcourues par les ménages entre le domicile et le travail sont augmentées et c'est finalement le scénario pour lequel les distances de déplacement sont les plus importantes.

Ce comportement de localisation des ménages au-delà des limites d'une ceinture verte correspond à une réalité observée dans des cas réels comme par exemple à Ottawa. En effet, si la mise en place d'une zone tampon non constructible peut freiner l'étalement urbain, le développement de la ville finit par franchir cette barrière tôt ou tard en l'absence de mesures complémentaires (Amati & Taylor, 2010). Une politique d'aménagement coordonnée à l'échelle régionale peut cependant permettre de limiter cet effet de franchissement (également appelé leapfrogging ou saute-mouton par les anglophones).

Cependant, en comparaison des scénarios 6 et 7 qui ont une croissance de population similaire, ce scénario protège la majorité des espaces naturels ou ruraux. La ville couvre ainsi 120 000 hectares contre 144 000 hectares pour les villes passives ou climatiquement néfastes.

Scénario 4 – Ville verte

A taux de croissance de population égal au scénario 3, le scénario 4 a une surface urbanisée moins importante : 105 000 hectares au lieu de 120 000.

La carte de ce scénario montre également les effets d'une politique urbaine polycentrique qui n'autoriserait les nouvelles constructions que dans des communes polarisantes. En conséquence, l'habitat diffus est moins représenté dans la ville et la taille moyenne des centralités secondaires augmente.

Les zones non urbanisées (agricoles ou récréatives) sont protégées mais également plus proches de la ville ce qui devrait se traduire par une diminution de l'effet d'ilot de chaleur urbain. En ce qui concerne les distances parcourues par les ménages, on n'observe pas de résultats concluants. La concentration de l'habitat réduit très légèrement les distances parcourues par rapport au scénario 3 (849 km / mois / personne contre 883 km / mois / personne). Cependant, les kilomètres parcourus semblent plus nombreux que dans tous les autres scénarios. Notons cependant que cette distance est calculée par le module NEDUM qui considère que les emplois se situent au centre de Toulouse. En toute logique, un modèle polycentrique donnerait des résultats plus faibles puisqu'une partie des emplois seraient délocalisés dans les nouvelles centralités.

Scénarios 6 et 7 - Ville passive & ville climatiquement néfaste

L'absence de contrôle de l'expansion urbaine donne lieu à un étalement urbain massif (144 000 hectares). Cela se traduit par une densité bâtie moyenne faible, un fort mitage dans la lointaine périphérie et une conurbation* en proche périphérie et le long des principaux axes routiers.

Cependant, l'absence de ceinture verte et la possibilité de construire dans les espaces naturels (espaces protégées, corridors écologiques, trame vertes, etc.) à proximité de Toulouse permettent des constructions là où cela n'était pas possible dans les autres scénarios. Cet habitat proche de Toulouse fait chuter la moyenne des distances parcourues par les ménages en dessous de celles du scenario 4. On peut cependant supposer qu'un modèle de transport polycentrique donnerait un classement différent.

2.2.3. Évolutions typologiques de la ville

Considérons maintenant les résultats de SLEDUM combiné à GENIUS. Nous allons voir dans un premier temps que notre modèle amène un niveau de détail supplémentaire quant à la typologie des quartiers, même quand les scénarios SLEDUM sont peu contrastés (cas des scénarios 1, 2 et 5). Il est en effet capable de simuler l'évolution des typologies de quartiers (voir chapitre 3.4 de la deuxième partie). Rappelons cependant que SLEDUM ne prend en compte que le parc résidentiel et ne fait donc pas évoluer les quartiers d'activité. Ceux-ci resteront donc inchangés sur les cartes.

Les tableaux et figures ci-après présentent un récapitulatif de ces évolutions typologiques.

* Voir glossaire

Légende		
Pavillon discontinu		
Pavillon continu		
Immeuble discontinu		
Immeuble continu		
Immeuble de grande hauteur		
Centre ancien		
Bâtiment d'activité		

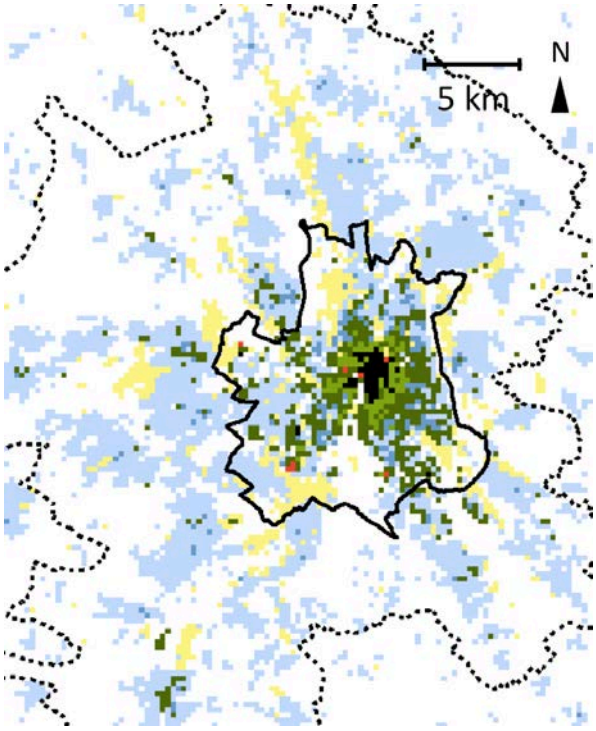


Figure 147 : Toulouse en 2010 selon GENIUS : répartition des types de quartier sur la ville (trait plein) et sur le pôle urbain (trait pointillé)

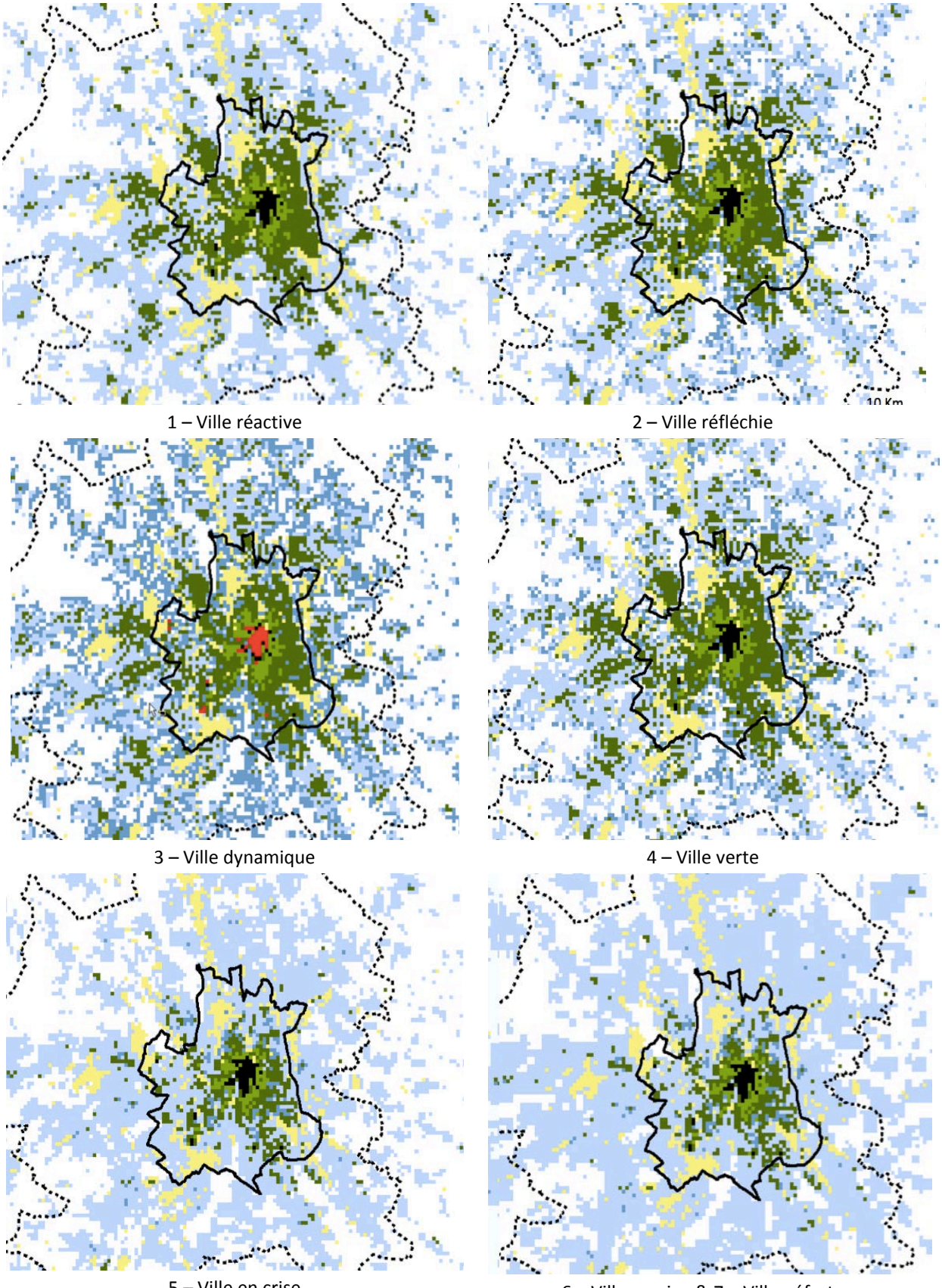


Figure 148 : Toulouse en 2100 selon GENIUS : répartition des types de quartier sur la ville (trait plein) et sur le pôle urbain (trait pointillé)

Scénario 1 – Ville réactive

Tableau 48 : Récapitulatif des hypothèses et évolutions typologiques du scénario 1

Type de quartier	Type d'expansion de la ville	Démographie
Avant 2040 : fil de l'eau Après 2040 : compact	Avant 2040 : aucun contrôle Après 2040 : ville multipolaire	En baisse après 2040

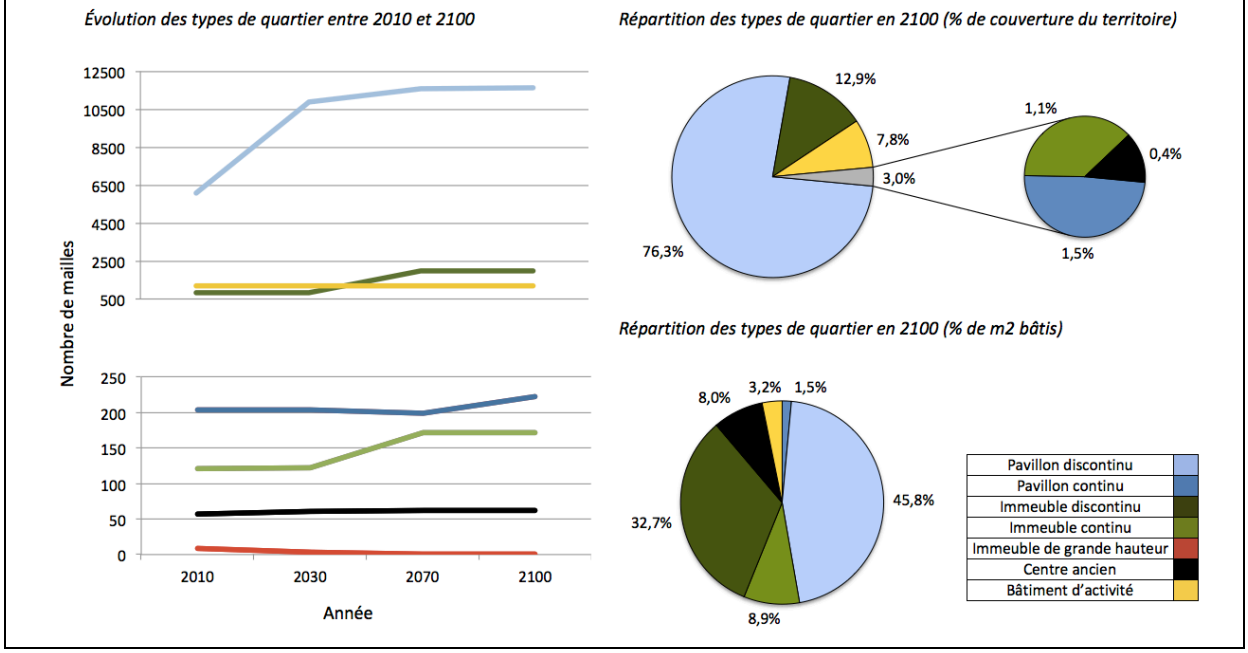


Tableau 49 : Récapitulatif des mutations de type de quartier dans le scénario 1

Ilots existants en 2010 qui ont été détruits et reconstruits en 2100	Quartiers reconstruits en 2100							
2100 / 2010	Pavillon discontinu	Pavillon continu	Immeuble discontinu	Immeuble continu	Immeuble de grande hauteur	Centre ancien	Bâtiment d'activité	Somme
Pavillon discontinu			1009					1009
Pavillon continu			159					159
Immeuble discontinu				47				47
Immeuble continu								0
Immeuble de grande hauteur				3		5		8
Centre ancien								0
Bâtiment d'activité								0
Somme	0	0	1168	50	0	5	0	1223

Scénario 2 – Ville réfléchie

Tableau 50 : Récapitulatif des hypothèses et évolutions typologiques du scénario 2

Type de quartier	Type d'expansion de la ville	Démographie
Compact	Avant 2040 : ceinture verte Après 2040 : ville multipolaire	En baisse après 2040

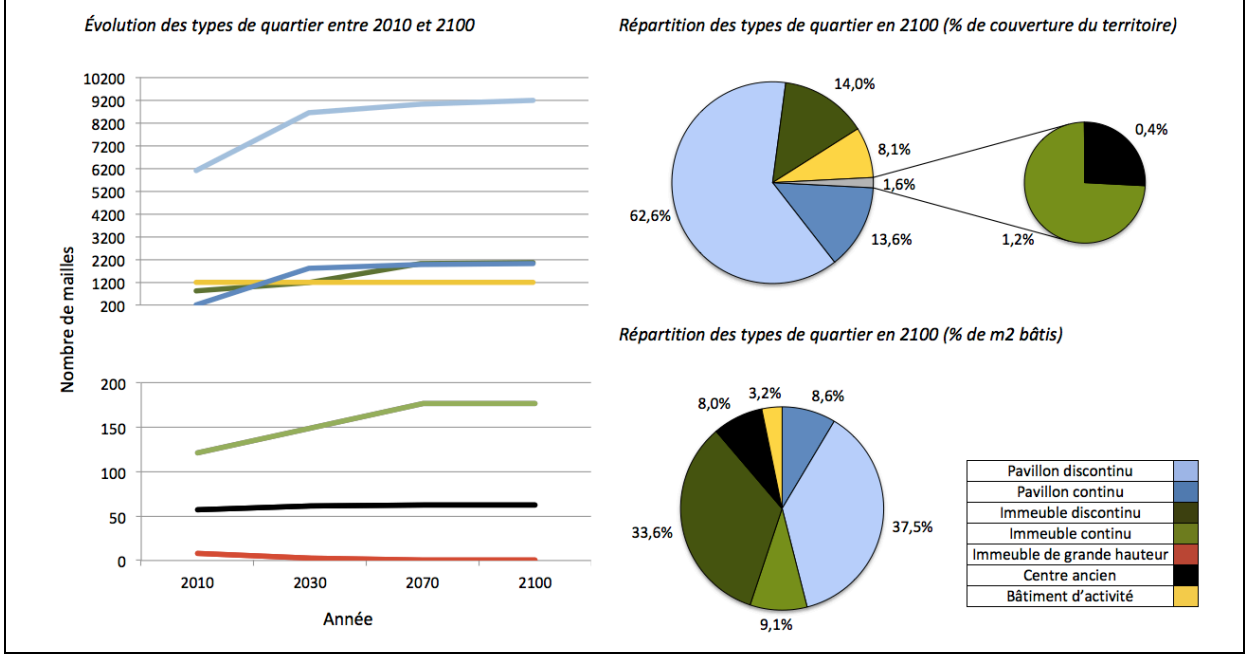


Tableau 51 : Récapitulatif des mutations de type de quartier dans le scénario 2

Ilots existants en 2010 qui ont été détruits et reconstruits en 2100	Quartiers reconstruits en 2100								
	2100 / 2010	Pavillon discontinu	Pavillon continu	Immeuble discontinu	Immeuble continu	Immeuble de grande hauteur	Centre ancien	Bâtiment d'activité	Somme
	Pavillon discontinu			1102					1102
	Pavillon continu			145	1				146
	Immeuble discontinu				50				50
	Immeuble continu								0
	Immeuble de grande hauteur				3		5		8
	Centre ancien								0
	Bâtiment d'activité								0
	Somme	0	0	1247	54	0	5	0	1306

Scénario 3 – Ville dynamique

Tableau 52 : Récapitulatif des hypothèses et évolutions typologiques du scénario 3

Type de quartier	Type d'expansion de la ville	Démographie
Vertical	Avant 2040 : ceinture verte Après 2040 : ville multipolaire	En hausse

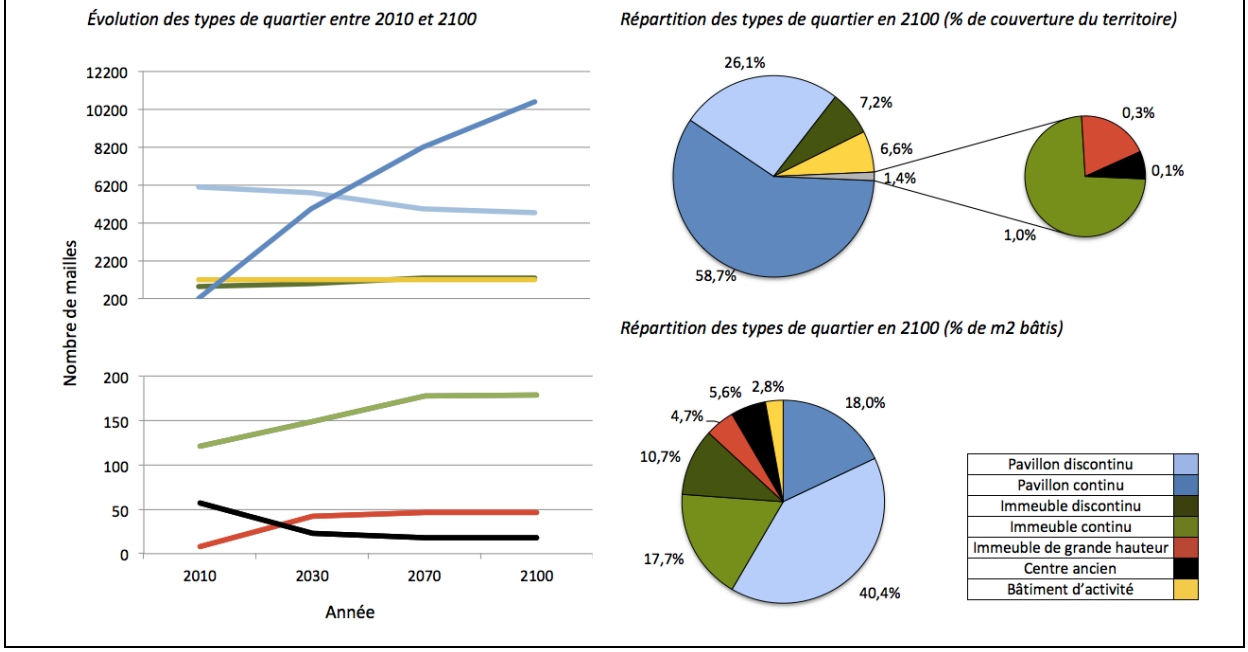


Tableau 53 : Récapitulatif des mutations de type de quartier dans le scénario 3

Ilots existants en 2010 qui ont été détruits et reconstruits en 2100	Quartiers reconstruits en 2100								
	2100 / 2010	Pavillon discontinu	Pavillon continu	Immeuble discontinu	Immeuble continu	Immeuble de grande hauteur	Centre ancien	Bâtiment d'activité	Somme
	Pavillon discontinu			1376					1376
	Pavillon continu			154					154
	Immeuble discontinu				51				51
	Immeuble continu								0
	Immeuble de grande hauteur								0
	Centre ancien					39			39
	Bâtiment d'activité								0
	Somme	0	0	1530	51	39	0	0	1620

Scénario 4 – Ville verte

Tableau 54 : Récapitulatif des hypothèses et évolutions typologiques du scénario 4

Type de quartier	Type d'expansion de la ville	Démographie
compact	ceinture verte	En hausse

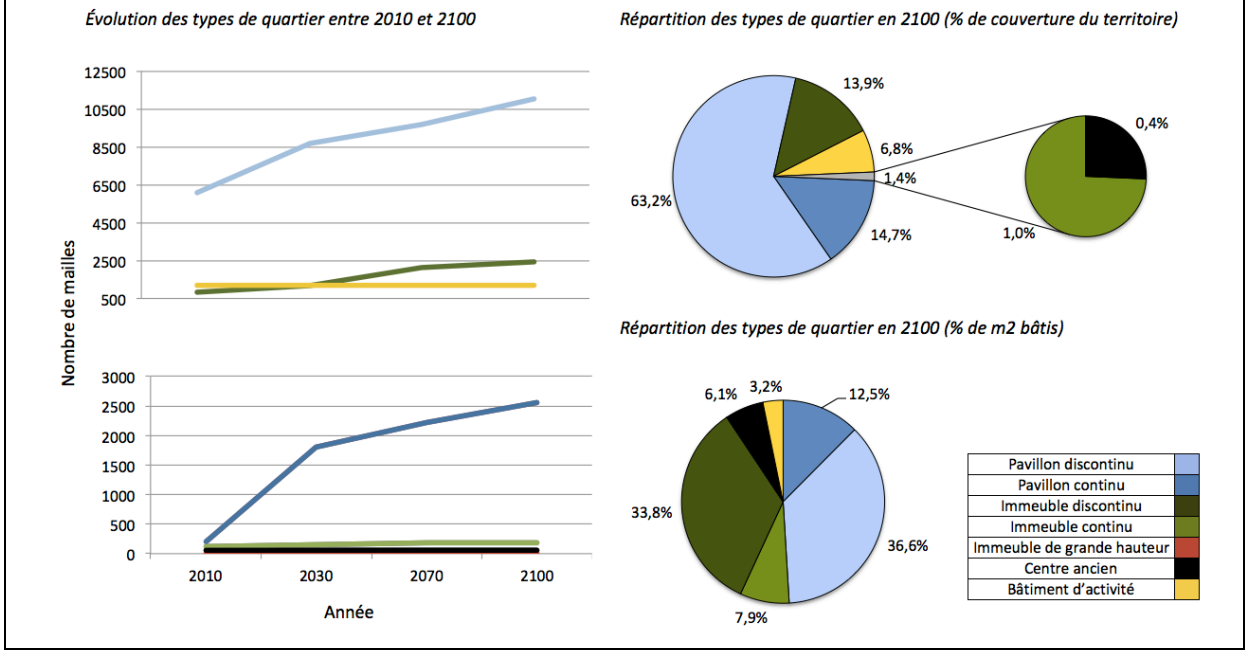


Tableau 55 : Récapitulatif des mutations de type de quartier dans le scénario 4

Ilots existants en 2010 qui ont été détruits et reconstruits en 2100	Quartiers reconstruits en 2100								
	2100 / 2010	Pavillon discontinu	Pavillon continu	Immeuble discontinu	Immeuble continu	Immeuble de grande hauteur	Centre ancien	Bâtiment d'activité	Somme
	Pavillon discontinu			1412					1412
	Pavillon continu			152					152
	Immeuble discontinu				50				50
	Immeuble continu								0
	Immeuble de grande hauteur				3		5		8
	Centre ancien								0
	Bâtiment d'activité								0
	Somme	0	0	1564	53	0	5	0	1622

Scénario 5 – Ville en crise

Tableau 56 : Récapitulatif des hypothèses et évolutions typologiques du scénario 5

Type de quartier	Type d'expansion de la ville	Démographie
Fil de l'eau	Aucun contrôle	En baisse après 2040

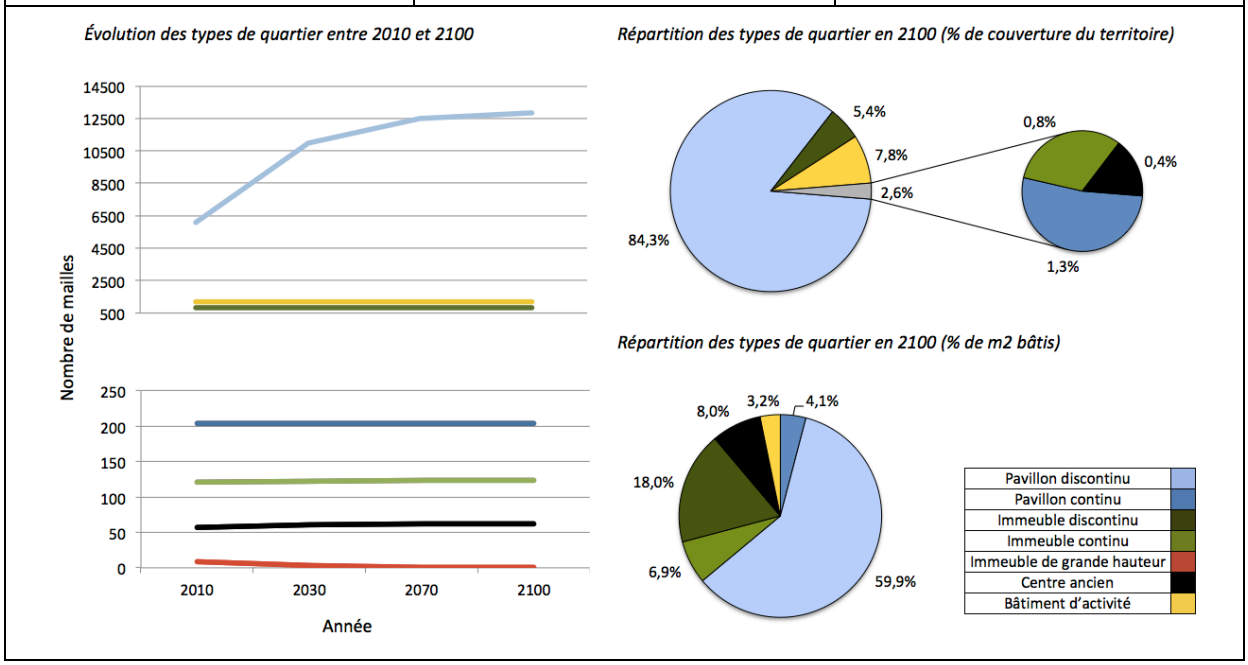


Tableau 57 : Récapitulatif des mutations de type de quartier dans le scénario 5

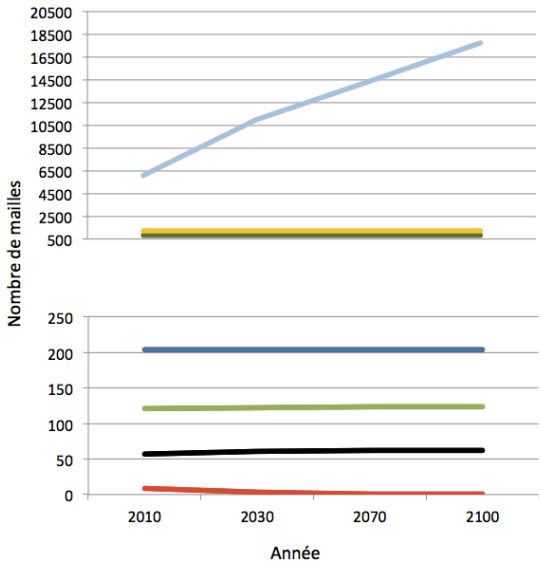
Ilots existants en 2010 qui ont été détruits et reconstruits en 2100	Quartiers reconstruits en 2100								
	2100 / 2010	Pavillon discontinu	Pavillon continu	Immeuble discontinu	Immeuble continu	Immeuble de grande hauteur	Centre ancien	Bâtiment d'activité	Somme
	Pavillon discontinu								0
	Pavillon continu								0
	Immeuble discontinu								0
	Immeuble continu								0
	Immeuble de grande hauteur				3		5		8
	Centre ancien								0
	Bâtiment d'activité								0
	Somme	0	0	0	3	0	5	0	8

Scénario 6 – Ville passive & Scénario 7 – Ville climatiquement néfaste

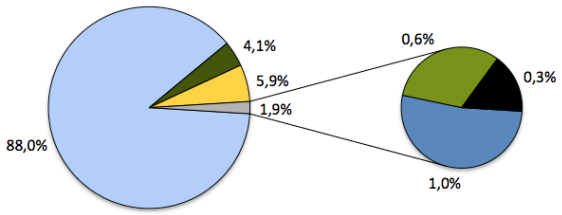
Tableau 58 : Récapitulatif des hypothèses et évolutions typologiques des scénarios 6 et 7

Type de quartier	Type d'expansion de la ville	Démographie
Fil de l'eau	Aucun contrôle	En hausse

Évolution des types de quartier entre 2010 et 2100



Répartition des types de quartier en 2100 (% de couverture du territoire)



Répartition des types de quartier en 2100 (% de m2 bâtis)

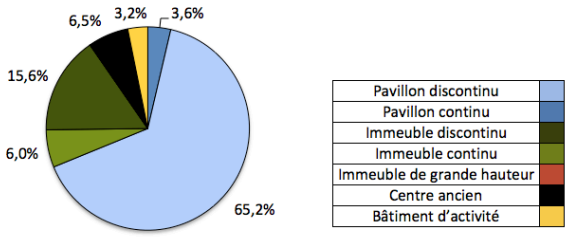


Tableau 59 : Récapitulatif des mutations de type de quartier dans les scénarios 6 et 7

Ilots existants en 2010 qui ont été détruits et reconstruits	Quartiers reconstruits en 2100								
	2100 / 2010	Pavillon discontinu	Pavillon continu	Immeuble discontinu	Immeuble continu	Immeuble de grande hauteur	Centre ancien	Bâtiment d'activité	Somme
	Pavillon discontinu								0
	Pavillon continu								0
	Immeuble discontinu								0
	Immeuble continu								0
	Immeuble de grande hauteur				3		5		8
	Centre ancien								0
	Bâtiment d'activité								0
	Somme	0	0	0	3	0	5	0	8

Les sept scénarios sont très contrastés. Cependant, on peut noter qu'en général, les mutations typologiques vers des formes compactes sont accentuées lorsqu'une politique globale de contrôle de l'expansion urbaine est menée en amont et traduite par SLEDUM (scénarios 2, 3 et 4).

Scénario 1 – Ville réactive

Dans ce scénario, la maison individuelle isolée (forme la plus bâtie actuellement à Toulouse) est privilégiée jusqu'en 2040. On observe donc jusqu'à cette date une augmentation rapide de ce type de logement.

Après 2040, ce sont des formes plus compactes qui sont encouragées par la réglementation. Cette nouvelle politique a des effets tant dans le secteur de la construction neuve que dans celui de la réhabilitation urbaine. Par conséquent, en nombre de mètres carrés construits, les pavillons et les immeubles sont à peu près équivalents en 2100. Cependant, la crise économique freine les nouvelles constructions après 2040 et les pavillons restent majoritaires en termes d'occupation du territoire. Comme précédemment, on note ici l'importance d'anticiper les politiques urbaines pour prendre en compte l'inertie de la ville.

Scénario 2 – Ville réfléchie

Dans ce scénario, les formes compactes sont privilégiées dès le début du siècle. Cela signifie que pour une densité bâtie brute donnée, là où on construisait habituellement des pavillons, on construit maintenant des immeubles (et de fait on laisse plus d'espaces libres au sol).

Ainsi, ce scénario voit sa progression de maisons individuelles réduite par rapport au scénario précédent, bien que l'évolution démographique soit la même dans les deux cas. En contrepartie, ce sont des formes plus denses qui sont construites : pavillons continus, immeubles discontinus et continus.

Dans ce scénario, on observe également un peu plus de mutations des quartiers existants vers des quartiers plus denses. Ces mutations ont surtout lieu en proche périphérie, là où la pression foncière est la plus forte. Cela correspond aux mutations qui sont actuellement observées en France et que nous avons présentées dans le chapitre 3.3.2 de la deuxième partie.

Scénario 3 – Ville dynamique

Les formes verticales sont ici encouragées par la réglementation urbaine. La principale conséquence est que ce scénario est le seul où on ne détruit pas les immeubles de grande hauteur existant. À l'inverse, il s'en construit de nouveaux dans les zones de fortes densités (nouvelles centralités autours de Toulouse et centre ancien). Par conséquent, le bâti ancien du centre où la pression foncière est importante est détruit pour construire des tours d'habitation et de bureaux du type de celles que l'on rencontre dans beaucoup de mégalopoles mondiales.

Ce scénario privilégie également les morphologies compactes. Ainsi, décuplés par la croissance démographique, les quartiers de pavillons continus et d'immeubles vont largement être construits, principalement au travers de l'expansion de la ville mais également par un processus de reconstruction de la ville sur elle-même.

En effet, on observe dans ce scénario de nombreuses mutations des quartiers existants vers des quartiers plus denses. Ces mutations résultent de la densification liée au solde migratoire vers Toulouse mais surtout des contraintes réglementaires qui amènent à changer de type de quartiers dès que la densité augmente un peu. Comme précédemment, ces mutations ont surtout lieu en proche périphérie.

Scénario 4 – Ville verte

Dans ce cas de figure, les formes compactes sont privilégiées dès le début du siècle.

Ainsi, ce scénario voit sa progression de maisons individuelles réduite au profit de formes plus denses : pavillons continus et immeubles discontinus dont la production est décuplée par la hausse démographique. Les immeubles continus sont en revanche moins construits que dans le scénario 2 car la structure même de la ville conduit à des densités bâties plus faibles.

Comme dans le scénario 3, on observe de nombreuses mutations des quartiers existants vers des quartiers plus denses.

Scénarios 5 – Ville en crise, 6 – Ville passive et 7 – Ville climatiquement néfaste

Dans ces scénarios, la construction de pavillons isolés prend le dessus. En effet, sans aucun contrôle de l'étalement urbain, des densités très faibles constituent l'expansion de Toulouse.

Par ailleurs, aucune réglementation ne contraint la morphologie du bâti, les quartiers construits sont donc essentiellement constitués de maisons individuelles.

De plus, en l'absence de contraintes en termes de densité ou de réglementation, les quartiers existants n'évoluent presque pas. Seuls les immeubles de grande hauteur sont peu à peu remplacés par des quartiers plus denses.

Entre ces trois scénarios, la seule différence notable est l'évolution de la démographie qui conduit dans le cas des scénarios 6 et 7, à un étalement urbain massif.

2.2.4. Évolutions morphologiques de la ville

Au-delà de la répartition des typologies, GENIUS permet d'influencer la morphologie au sein d'un même type de quartier (voir chapitre 3.5 de la deuxième partie). Le tableau ci-dessous récapitule les caractéristiques morphologiques les plus influencées par les différents scénarios.

Tableau 60 : Récapitulatif des évolutions morphologiques

Scénario	Densité de végétation sur le pole urbain	Contiguïté	Compacité	CES	Hauteur
Existant 2010	0,9	0,07	4,7	0,128	6,1
1 – Ville réactive	0,8	0,08 ↗	4,8	0,086	5,7 ↘
2 – Ville réfléchie	0,9	0,09 ↗	4,2	0,090	6,1
3 – Ville dynamique	0,5 ↘	0,07	2,8 ↘	0,069 ↘	11,2 ↗
4 – Ville verte	0,7	0,10 ↗	4,9	0,089	6,2
5 – Ville en crise	0,5 ↘	0,05 ↘	4,9	0,099	5,8 ↘
6 & 7 – Villes passive & néfaste	0,5 ↘	0,05 ↘	6,8 ↗	0,092	5,8 ↘

Densité de végétation

En ce qui concerne la végétation sur le pôle urbain, pour la plupart des scénarios, la densité de végétation diminue sous l'effet de l'expansion urbaine qui grignote le territoire et donc les espaces végétalisés.

On peut remarquer que, très logiquement, les scénarios 1, 2 et 3 qui favorisent une végétalisation intensive des espaces non bâtis présentent une densité de végétation élevée. Au sein de ces trois scénarios, celui dont l'évolution démographique est la plus élevée (scénario 3) est également celui où la densité de végétation sur le pôle urbain est la plus faible. En effet, la tâche urbaine y est plus importante, il y a donc globalement plus de zones bâties et donc moins de végétation. En revanche, celui où la population augmente peu et où l'expansion urbaine est la plus contrôlée (scénario 2) est celui où la densité de végétation est la plus élevée, conservant même le taux actuel.

Le fait de bâtir des formes peu compactes et donc de libérer de l'espace au sol n'est donc pas une garantie de quantité des espaces végétalisées. A l'inverse, on peut conclure que densité bâtie et densité de végétation sont tout à fait compatibles.

Contiguïté

En ce qui concerne la contiguïté, elle a tendance à diminuer dans les scénarios 5, 6 et 7 en raison de l'augmentation importante du nombre de pavillons (ceux-ci possèdent en effet une surface d'enveloppe déperditive importante).

A l'inverse, dans les scénarios où un bâti compact est favorisé (scénarios 2, 4 et dans une moindre mesure 1) la contiguïté a tendance à augmenter.

Le scénario 3 favorisant le bâti vertical et compact possède une contiguïté identique à la ville existante. Bien que le bâti compact préconisé par ce scénario ait tendance à augmenter la contiguïté, les tours créées remplaçant le centre ancien ont une faible contiguïté (formes urbaine discontinues).

Compacité

On constate que dans les scénarios où de l'habitat individuel est produit massivement (scénarios 6 et 7) le coefficient de compacité augmente. En effet, les pavillons sont des formes architecturales peu compactes : leur surface d'enveloppe est relativement élevée par rapport à leur volume, il est donc logique que la compacité moyenne augmente.

A l'inverse, dans le scénario 3 où les bâtiments construits sont plus hauts et où les formes compactes telles que les pavillons continus et les immeubles discontinus sont privilégiées, la compacité diminue.

Coefficient d'emprise au sol

Quel que soit le scénario, le coefficient d'emprise au sol a tendance à diminuer en raison de l'expansion urbaine qui se fait majoritairement par des formes discontinues. On remarque logiquement que cette diminution est accentuée dans les scénarios encouragent les formes urbaines compactes, en particulier dans le scénario 3 qui encourage également la construction d'immeubles de grandes hauteurs.

Hauteur

Dans les scénarios 5, 6 et 7 où la construction de pavillons est très largement majoritaire et où les formes architecturales suivent une tendance fil de l'eau, la hauteur moyenne des bâtiments sur la ville diminue.

A l'inverse, dans le scénario 3 où les formes architecturales verticales sont encouragées, la hauteur moyenne augmente de près d'un étage.

2.2.5. Évolution des caractéristiques techniques des bâtiments

Les caractéristiques technologiques du bâti sont définies à partir des types de quartiers et des âges des bâtiments. Elles sont également grandement influencées par les scénarios d'adaptations technologiques, en particulier le taux de rénovation du parc de bâtiments. Le Tableau 61 récapitule les hypothèses des scénarios technologiques inhérentes à chaque scénario systémique.

Tableau 61 : Traduction des scénarios systémiques en variables technologiques

<table>
<tr><th>Scénario systémique</th><th>Évolution des usages</th><th>Équipements et performances</th><th>Évolution desréglementations</th></tr>
<tr><td>1 – Ville réactive</td><td>Avant 2040 : usage intensif de la climatisation et du chauffage

Après 2040 : usage économe de la climatisation et du chauffage</td><td>Avant 2040 : faible introduction de technologies d'économie d'énergie

Après 2040 : forte introduction de ces technologies</td><td rowspan="2">Avant 2040 : déploiement lent des réglementations et technologies

Après 2040 : déploiement rapide des réglementations et technologies</td></tr>
<tr><td>2 – Ville réfléchie</td><td rowspan="3">Usage économe de la climatisation et du chauffage</td><td rowspan="3">Forte introduction de technologies d'économie d'énergie</td></tr>
<tr><td>3 – Ville dynamique</td><td rowspan="2">Déploiement rapide des réglementations et technologies</td></tr>
<tr><td>4 – Ville verte</td></tr>
<tr><td>5 – Ville en crise</td><td>Usage intensif de la climatisation et du chauffage</td><td>Faible introduction de technologies d'économie d'énergie</td><td>Avant 2040 : déploiement lent des réglementations et technologies

Après 2040 : pas de déploiement des réglementations et technologies</td></tr>
<tr><td>6 – Ville passive</td><td>Avant 2040 : usage intensif de la climatisation et du chauffage

Après 2040 : usage économe de la climatisation et du chauffage</td><td>Avant 2040 : faible introduction de technologies d'économie d'énergie

Après 2040 : forte introduction de ces technologies</td><td>Déploiement lent des réglementations et technologies</td></tr>
<tr><td>7 – Ville climatiquement néfaste</td><td>Usage intensif de la climatisation et du chauffage</td><td>Faible introduction de technologies d'économie d'énergie</td><td>Déploiement lent des réglementations et technologies</td></tr>
</table>

Les évolutions contrastées des villes sous l'influence des différents scénarios technologiques vont conduire à des niveaux d'isolation thermique et à des valeurs d'albédo différents (voir Tableau 62).

Tableau 62 : Propriétés thermique des bâtiments selon les sept scénarios

Scénario	Coefficient de transmission thermique moyen des bâtiments (murs extérieurs et toiture)	Albédo moyen des toits
Ville initiale	1,85 W/m^2/K	0,26
1 – Ville réactive	0,43 W/m^2/K	0,60
2 – Ville réfléchie	0,43 W/m^2/K	0,60
3 – Ville dynamique	0,43 W/m^2/K	0,62
4 – Ville verte	0,43 W/m^2/K	0,62
5 – Ville en crise	0,49 W/m^2/K	0,24
6 – Ville passive	0,49 W/m^2/K	0,30
7 – Ville néfaste	0,49 W/m^2/K	0,30

On remarque que l'envergure de l'expansion urbaine, elle-même influencée par le solde démographique de la ville, a une importance limitée. Par exemple, il n'y a pas de différence notable entre le scénario 5 « ville en crise » et le scénario 6 « ville passive » alors que leurs expansions urbaines respectives sont très différentes (limitée par la crise pour le premier et très forte pour le deuxième). Autrement dit, l'échelle du siècle est suffisante pour que le parc de bâtiments soit rénové de manière significative et l'influence de la construction de bâtiments neufs plus performants reste limitée.

En revanche, le taux de rénovation a une importance primordiale puisqu'il permet de distinguer deux types de scénarios : ceux où la rénovation thermique est importante (2,5% du parc de logements et 6% du parc de bâtiments tertiaires sont rénovés chaque année de manière à être au même niveau de performance énergétique que les bâtiments neufs), et ceux où la rénovation énergétique est quasiment nulle. Dans le premier type de scénarios, le coefficient de transmission thermique moyen du parc de bâtiments est relativement bas. Dans le deuxième type de scénarios, le coefficient de transmission thermique moyen du parc de bâtiments est supérieur de près de 14% au premier, ce qui aura évidemment des conséquences sur les consommations d'énergie et sur le microclimat urbain. Cette dichotomie est plus marquée si on observe l'albédo, qui est multiplié par deux dans les scénarios où on rénove plus.

2.2.6. Discussion

L'analyse de ces résultats est complexe car ils résultent du croisement de différents mécanismes dont on peine à distinguer les influences respectives. Par exemple, dans le scénario 3, la diminution du coefficient de compacité des bâtiments est-elle le résultat de l'augmentation de la densité bâtie brute dans la ville ? Est-elle le résultat de la présence en plus grande quantité d'immeubles collectifs ? Est-elle le résultat de formes globalement plus hautes et compactes dans la ville ?

De manière à s'assurer de la signification de chaque mécanisme indépendamment les uns des autres, nous avons effectué des validations individuelles de chaque modèle. Cela a permis, par exemple, de vérifier le fonctionnement de GENIUS seul, à partir d'une structure de ville identique quel que soit le scénario. Ce travail n'a pas été présenté dans ce mémoire car il ne conserve pas la cohérence des scénarios prospectifs et alourdirait la lecture. L'ensemble de ces analyses nous a cependant permis d'établir la cohérence des modèles.

D'autre part, en ce qui concerne les évolutions typologiques et morphologiques, nous n'avons pas vraiment de recul sur l'efficacité réelle de politiques urbaines incitant à la compacité ou à la verticalité des bâtiments. On peut donc difficilement comparer les scénarios obtenus à des précédents règlementaires. En revanche, on peut imaginer que ce type de mutations passe par plusieurs vecteurs : (1) la réglementation urbaine (par exemple augmenter la hauteur maximale autorisée, voir définir dans certain cas une hauteur minimale), (2) la réglementation thermique (la RT2012 contraint déjà à concevoir des bâtiments plus compacts - sans toutefois imposer de garde fous - mais on peut imaginer qu'une valeur maximale soit imposée dans les réglementations futures) et (3) la culture des architectes (l'intérêt ce type de forme est actuellement enseigné aux futurs architectes, on peut dès lors imaginer que cela influencera leur conception ainsi que la perception de la densité de manière plus générale).

In fine, si l'on considère les premiers résultats des scénarios systémiques, les observations des sorties de la plateforme correspondent bien aux évolutions attendues. Les modèles utilisés sont donc cohérents avec nos objectifs.

De plus, les différents scénarios systémiques ont été traduits par les modèles d'évolution urbaine en sept villes contrastées tant du point de vue de la structure générale que de la morphologie urbaine et des caractéristiques énergétiques des bâtiments. L'objectif est donc bien atteint car nous souhaitions avant tout des évolutions prospectives bien différenciées afin de pouvoir observer l'impact de différentes politiques urbaines et climatiques.

Malgré les limites évoquées, les résultats peuvent d'ores et déjà apporter une contribution aux problématiques urbaines. Tout d'abord, comme on a pu le voir au travers des villes à faible croissance de population où les politiques urbaines sont moins efficaces, il est primordial d'anticiper les règlementations afin de tenir compte de l'inertie de la forme urbaine.

Par ailleurs, en ce qui concerne les performances thermiques des bâtiments, nous avons mis en avant l'importance de la rénovation dans des villes qui restent malgré tout très lentes à évoluer.

Les premières simulations semblent mettre en évidence l'intérêt d'une structure de ville multipolaire par rapport à un dispositif de ceinture verte (les deux structures étant toutes deux préférables à un étalement urbain incontrôlé). En effet, lorsque l'expansion est organisée autour d'une ville multipolaire, l'étalement urbain est moins important que lorsqu'une ceinture verte est prévue. Par ailleurs, si la mise en place d'une zone tampon non constructible peut freiner l'étalement urbain, le développement de la ville finit par franchir cette barrière et peut avoir pour conséquence une augmentation des distances des transports dans une ville qui reste majoritairement monocentrique.

Pour finir, nous avons pu montrer que densité bâtie et végétalisation de la ville sont compatibles. Par exemple, le scénario 4 a la densité bâtie la plus forte mais aussi une densité de végétation élevée, en raison d'une politique de végétalisation volontariste. A l'inverse, promouvoir la libération des sols n'est pas systématiquement synonyme de verdissement de la ville. Par exemple, le scénario 3 a le coefficient d'emprise au sol le plus faible mais également la densité de végétation la plus basse. Cette présence du végétal dans la ville étant un critère essentiel pour le confort des habitants ainsi que pour la régulation du microclimat urbain, elle doit donc faire l'objet de politiques urbaines spécifiques. Les scénarios 1, 2 et 4 nous montrent qu'une telle politique est possible et compatible avec différentes structures de ville et typologie de quartiers.

2.3. Résultats pour l'énergétique urbaine

Les cartes issues de GENIUS pour chaque scénario et pour chaque pas de temps (10 ans) sont utilisées au sein de la plateforme ACCLIMAT pour permette des simulations intégrées de la ville. En particulier, le modèle SURFEX permet de modéliser les consommations de chauffage, de climatisation et le microclimat urbain pour l'ensemble des scénarios systémiques.

Les chapitres suivants présentent les résultats obtenus en 2100 ainsi qu'une première analyse de l'impact des politiques urbaines sur l'énergie et le climat.

Les résultats ci-après ont été produits par Valéry Masson, chercheur au CNRM / GAME, grâce au modèle d'énergétique urbaine TEB qu'il a conçu et développé. Les simulations sont issues du couplage entre TEB, SURFEX et Meso-NH, un modèle atmosphérique à fine échelle. Elles tiennent donc compte des interactions entre îlot de chaleur urbain et bilan énergétique des bâtiments.

2.3.1. Consommations des bâtiments

TEB calcule, pour l'ensemble de la carte GENIUS en entrée, les consommations de chauffage et de climatisation des bâtiments quel que soit leur usage. Pour plus de clarté, ces consommations peuvent également être rapportées au mètre carré de manière à ne pas prendre en compte l'effet de la démographie. Cette dernière n'est en effet pas un levier d'action pour les urbanistes.

Le Tableau 63 présente les différentes consommations de chauffage et de climatisation des sept villes en 2100 selon quatre scénarios climatiques : le climat actuel et trois climats futurs qui correspondent à des températures moyennes supérieures de 2, 4 ou 6°C par rapport au climat actuel.

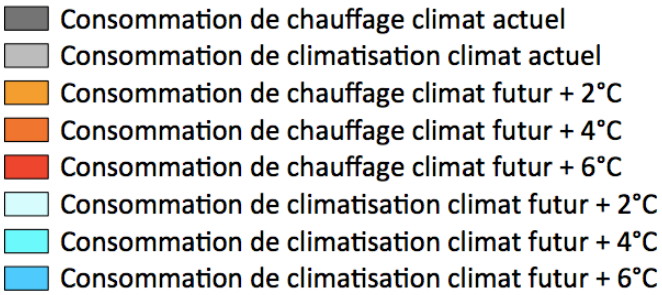
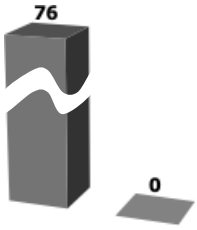
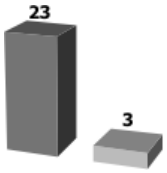
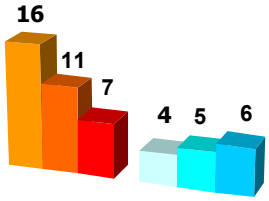
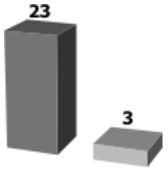
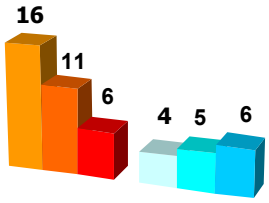
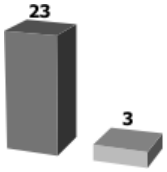
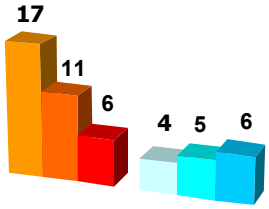
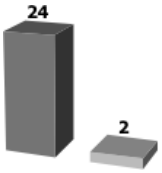
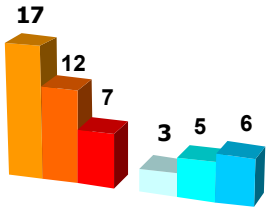
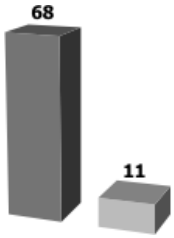
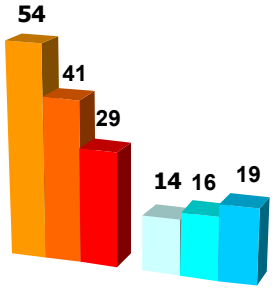
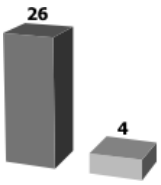
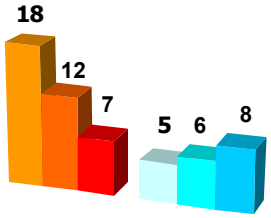
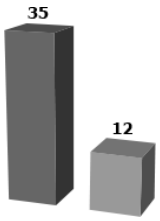
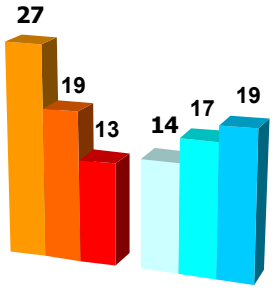


Figure 149 : Légende du Tableau 63

Tableau 63 : Consommation de chauffage et de climatisation (kWh/m²/an)

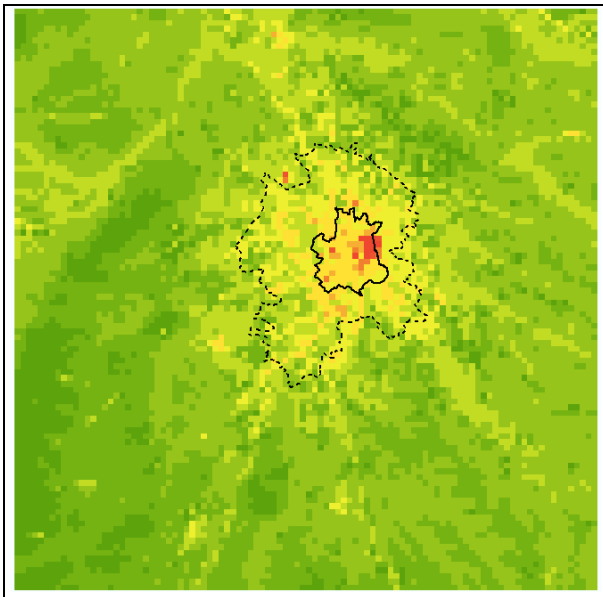
Scénario	Climat actuel	Climats futurs (+2°, +4° et +6°)
Existant 2010		-
1 – Ville réactive		
2 – Ville réfléchie		
3 – Ville dynamique		
4 – Ville verte		
5 – Ville en crise		

Scénario	Climat actuel	Climats futurs (+2°, +4° et +6°)
6 – Ville passive		
7 – Ville climatique-ment néfaste		

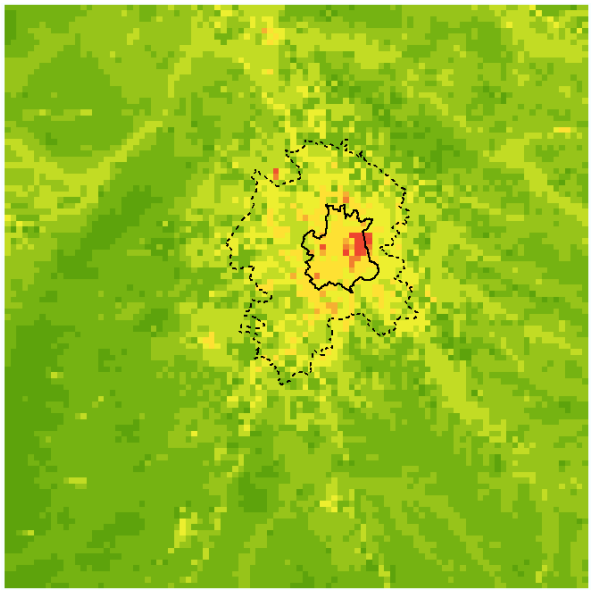
2.3.2. Microclimat urbain

Le modèle TEB permet également de simuler le microclimat urbain et produit une série d'indicateurs permettant de le caractériser : températures à l'ombre et au soleil à deux mètres au-dessus du sol, vitesse du vent, humidité relative, etc. Nous nous concentrons par la suite sur la mesure de l'effet d'ilot de chaleur urbain qui est un indicateur synthétique de l'effet de la ville sur le microclimat.

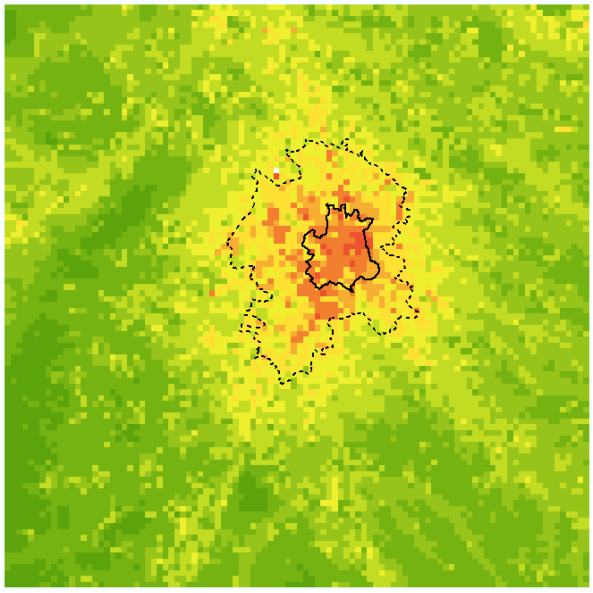
Ainsi, la Figure 150 et la Figure 151 représentent l'ilot de chaleur urbain simulé en 2100 pour les sept villes. Notons que cet ilot de chaleur est similaire quel que soit le climat puisqu'il s'agit d'une différence de température entre la ville et la campagne.



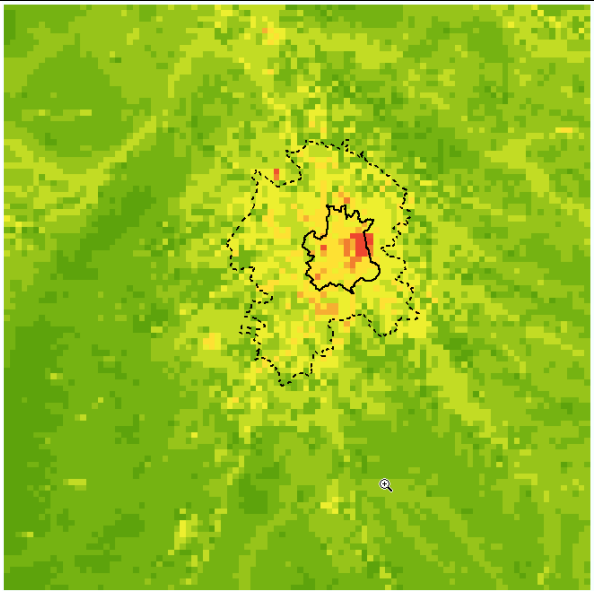
1 – Ville réactive



2 – Ville réfléchie



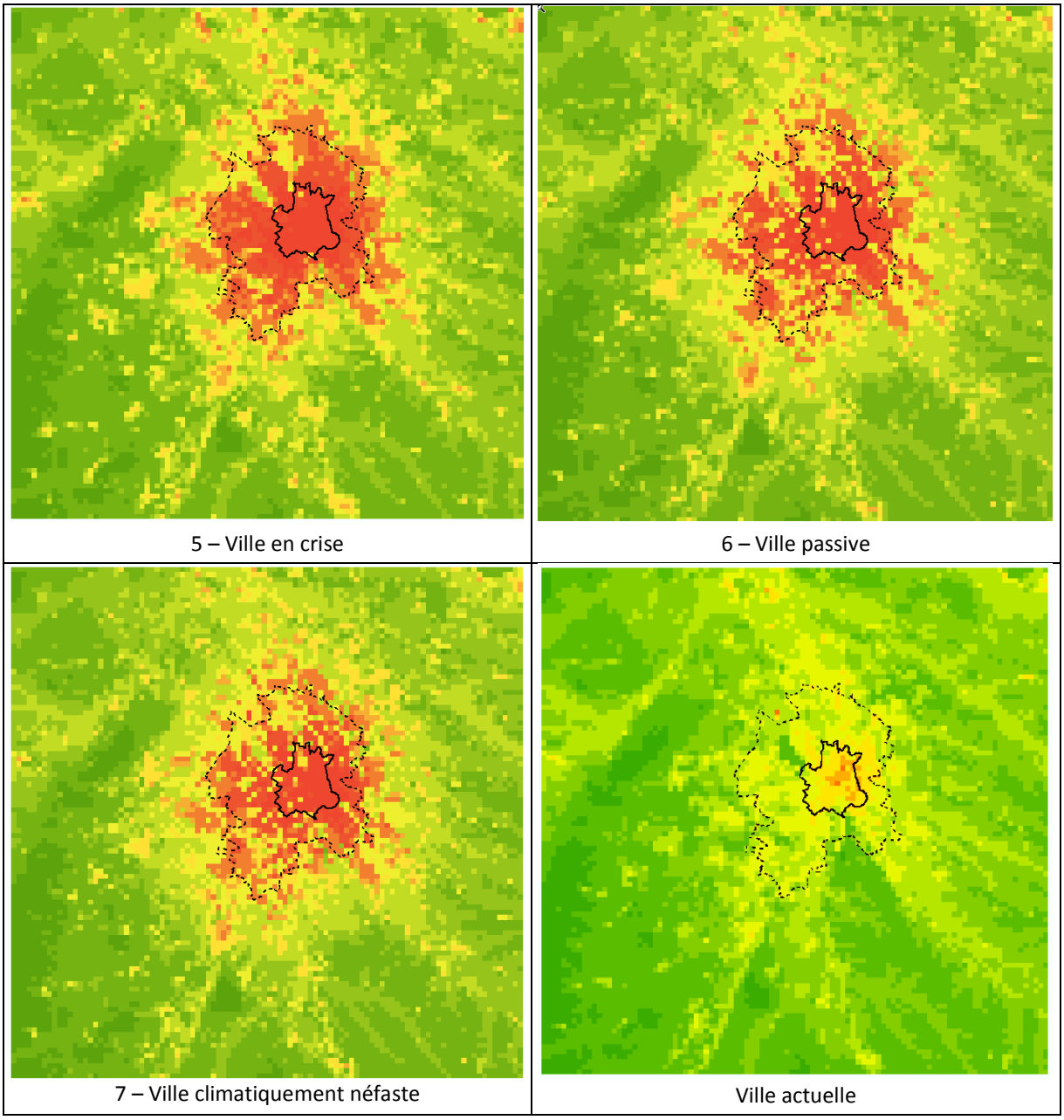
3 – Ville dynamique



4 – Ville verte

> 3	2,5 à 3	2 à 2,5	1,75 à 2	1,25 à 1,75	0,75 à 1,25	0,25 à 0,75	0 à 0,25	-0,5 à 0	< -0,5

Figure 150 : Ilot de chaleur urbain moyen en été (°C) sur la commune de Toulouse (trait plein) et sur le pôle urbain toulousain (trait pointillé) – illustration de l'auteur à partir des données du projet ACCLIMAT



> 3	2,5 à 3	2 à 2,5	1,75 à 2	1,25 à 1,75	0,75 à 1,25	0,25 à 0,75	0 à 0,25	-0,5 à 0	< -0,5

Figure 150 : Ilot de chaleur urbain moyen en été (°C) sur la commune de Toulouse (trait plein) et sur le pôle urbain toulousain (trait pointillé) (Suite)

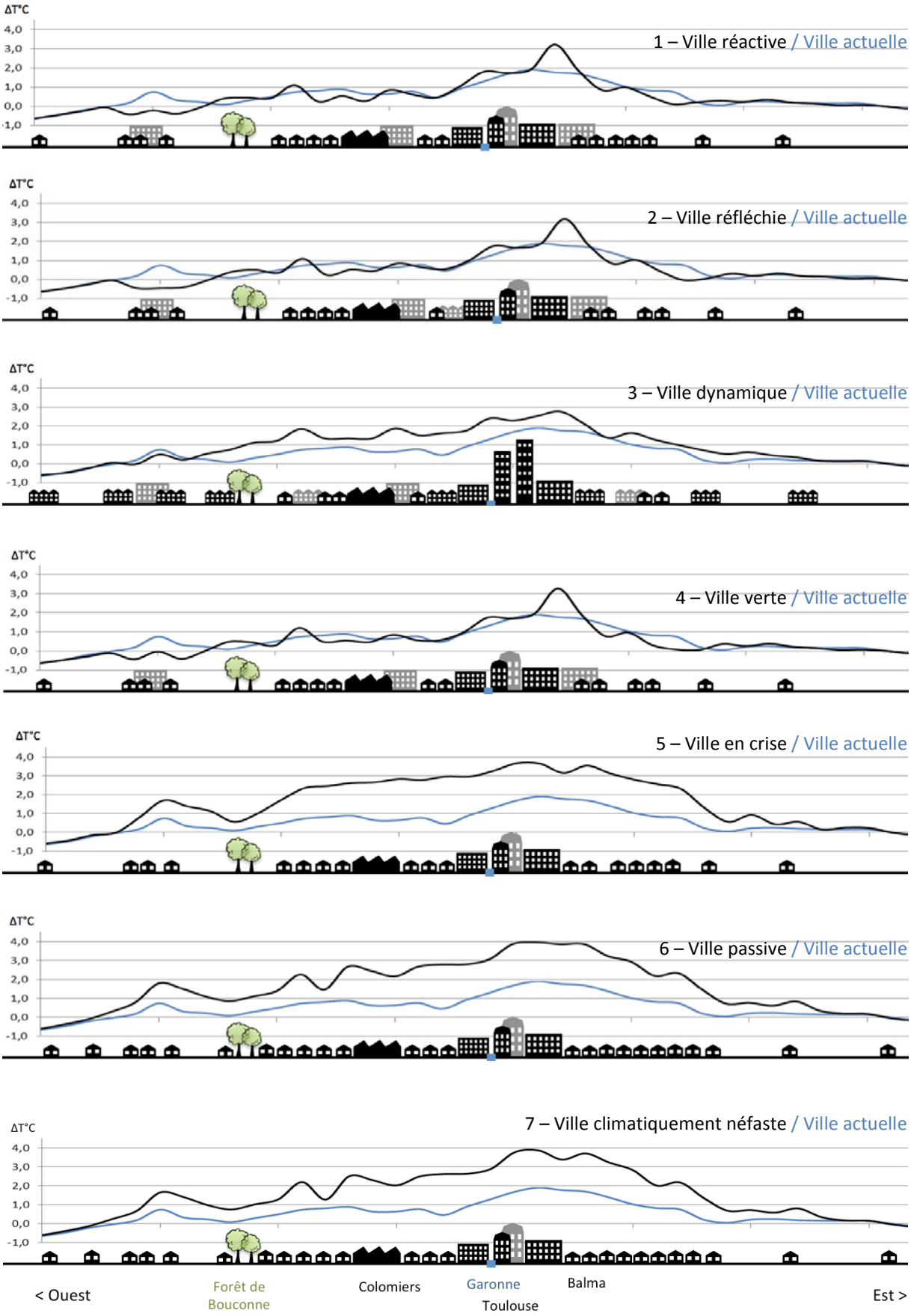


Figure 151 : Profil de l'ilot de chaleur urbain moyen en été à Toulouse (illustration de l'auteur)

2.3.3. Analyse

Comme nous avons pu le voir dans la première partie de ce mémoire, les facteurs influençant les consommations des bâtiments et l'ilot de chaleur urbain sont nombreux : le climat, l'étalement urbain, la végétation, la typologie des bâtiments, leur matérialité, leurs équipements, mais également tous les paramètres morphologiques décrivant le bâti (voir Tableau 60).

Dans les scénarios systémiques, ces paramètres varient simultanément, il est donc difficile de déterminer lesquels sont réellement influents. Cependant, un certain nombre d'analyses peuvent être faites à partir des résultats présentés précédemment.

Scénarios 1 – Ville réactive, 2 – Ville réfléchie et 4 – Ville verte

Ces scénarios sont caractérisés par des facteurs favorables à la réduction des consommations énergétiques et à l'atténuation de l'effet d'ilot de chaleur urbain : (1) une minorité de logements individuels, (2) un bâti relativement compact et fortement contigu, (3) des villes végétalisées qui profitent des ombres et de l'évapotranspiration en été, (4) une isolation moyenne relativement bonne et (5) des villes peu étalées.

Ainsi, ces trois scénarios sont parmi ceux qui consomment le moins, que ce soit en termes de chauffage ou de climatisation (les consommations de chauffage et de climatisation pour ces deux postes varient entre 12 et 20 kWh/m^2/an contre 76 kWh/m^2/an actuellement).

En ce qui concerne l'ilot de chaleur urbain estival, ce sont également des scénarios favorables (voir Figure 150). La valeur moyenne de l'intensité de l'ilot de chaleur sur la commune de Toulouse est de 1,5°C pour ces trois scénarios.

Si on observe le détail du profil de cet ilot de chaleur (voir Figure 151), on remarque qu'il est beaucoup plus intense au niveau du centre-ville. En effet, le centre est moins végétalisé, le bâti y est plus dense et moins bien isolé que les logements neufs en périphérie. Par ailleurs, des revêtements à fort albédo sont utilisés pour l'ensemble des bâtiments à l'exception du centre ancien qui conserve son revêtement traditionnel pour des raisons patrimoniales.

Scénario 3 – Ville dynamique

Ce scénario se différencie par le fait qu'il soit beaucoup moins végétalisé que les précédents. Si ses consommations énergétiques sont comparables, en revanche, il est beaucoup plus

pénalisant du point de vue de l'ilot de chaleur urbain estival (voir Figure 150). Dans ce scénario, la valeur moyenne de l'intensité de l'ilot de chaleur sur la commune de Toulouse est de 2,1°C.

Cependant, on n'observe pas sur le profil de l'ilot de chaleur urbain le même pic que dans les scénarios précédents. La valeur maximale de l'ilot de chaleur urbain au centre-ville est même plus faible de 0,5°C (voir Figure 151). Ceci s'explique par le fait que dans ce scénario, le centre ancien est remplacé par des immeubles de grande hauteur fortement isolés, à fort albédo et libérant plus d'espace au sol pour les espaces verts et la circulation des vents.

Scénarios 5 – Ville en crise, 6 - Ville passive et 7 – Ville climatiquement néfaste

Ces scénarios sont caractérisés par des facteurs défavorables à la réduction des consommations énergétiques et à l'atténuation de l'effet d'ilot de chaleur urbain : (1) une majorité de logement individuels, (2) un bâti peu compact et à faible contiguïté, (3) des villes peu végétalisées, (4) des villes étalées et (5) une isolation thermique relativement faible associée à un albédo très bas (voir Tableau 62).

Ainsi, ces trois scénarios sont ceux qui consomment le plus, que ce soit en terme de chauffage ou de climatisation (les consommations globales pour ces deux postes varient entre 15 et 68 kWh/m^2/an). Il est utile de noter que, si globalement réchauffement climatique et ilot de chaleur urbain contribuent à réduire les consommations de chauffage et par conséquent les consommations globales, cet effet est beaucoup moins intéressant dans une ville énergivore comme celle-ci. En effet, malgré des températures élevées en hiver, les consommations de chauffage restent bien supérieures à celles des autres scénarios.

En ce qui concerne l'ilot de chaleur urbain, ce sont également des scénarios plutôt défavorables (voir Figure 150) avec une valeur moyenne de l'intensité de l'ilot de chaleur estival sur la commune de Toulouse de 3,1 à 3,3°C. Par ailleurs, on peut remarquer en observant les cartes et les profils des ilots de chaleurs urbains que l'emprise spatiale de ce phénomène est beaucoup plus importante que dans les autres scénarios, principalement en raison de l'absence de contrôle de l'étalement urbain.

Si on observe le détail des profils de ces ilots de chaleur (voir Figure 151), on remarque qu'ils sont plus uniformément répartis que dans les autres scénarios, car les bâtiments sont globalement plus énergivores et la ville globalement plus minérale.

Conclusion

De manière générale, on peut noter que le réchauffement climatique combiné à l'effet d'ilot de chaleur urbain hivernal réduit les consommations de chauffage (celles-ci étant proportionnelles à la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment). Simultanément, la consommation de climatisation augmente sous l'effet de l'accroissement des températures et de l'effet d'ilot de chaleur estival (voir Tableau 63). Cependant, cette augmentation des consommations de climatisation (+ 1 à + 8 kWh/m^2/an) reste largement inférieure à la diminution des consommations de chauffage (- 6 à - 39 kWh/m^2/an). Ainsi, le fait de passer du climat actuel aux climats futurs permet d'économiser entre 13 et 54% des consommations de chauffage et de climatisation tous scénarios confondus. On retrouve ici une partie des conclusions du projet de recherche EPICEA qui avait conduit à des conclusions similaires pour la ville de Paris (Desplat et al., 2009).

La part de la climatisation dans la consommation totale des bâtiments augmente très largement (dans certains scénarios elle va même dépasser la consommation annuelle de chauffage). Ce changement des usages de l'énergie nécessitera une mutation majeure du bouquet énergétique, avec un impact sur le système de production , de distribution et de stockage de l'énergie (Salagnac, 2007b).

Par ailleurs, le changement climatique et l'effet d'ilot de chaleur urbains vont avoir un impact sur les températures dans la ville, avec des conséquences probables en terme de confort, de santé et de biodiversité (Colombert, 2008b).

En observant la Figure 150 et la Figure 152, l'une des premières conclusions est que l'étalement urbain incontrôlé associé à une faible végétalisation et à des bâtiments peu économes en énergie (tant par leur forme que par leurs caractéristiques techniques et leurs usages) contribue aux ilots de chaleur estivaux les plus importants. Dans les scénarios 1, 2 et 4, la végétalisation de la ville et la rénovation thermique des bâtiments permet de maintenir un ilot de chaleur urbain estival comparable à celui de la situation actuelle et ce malgré l'expansion urbaine. Ces différences sont cependant obtenues à un prix très important en termes d'aménagement urbain et de rénovation thermiques, lequel peut être jugé trop élevé par les décideurs.

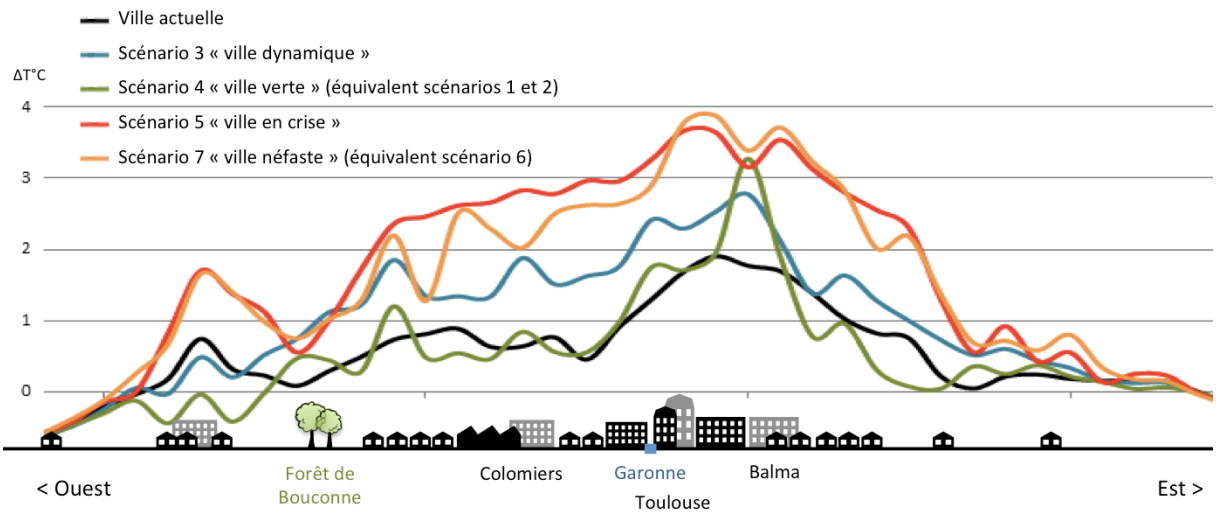


Figure 152 : Profil des ilots de chaleur urbain moyen en été à Toulouse (illustration de l'auteur)

Les mêmes causes mènent aux mêmes conséquences en ce qui concerne les consommations de chauffage et de climatisation. Un étalement urbain incontrôlé associé à des bâtiments peu économes en énergie conduit à des villes plus énergivores (voir Tableau 63).

La comparaison des scénarios 5 et 7 nous permet de conclure sur l'influence de la rénovation énergétique. En effet, ces scénarios sont très proches du point de vue des scénarios technologiques à l'exception du fait que le taux de rénovation énergétique des bâtiments est plus faible pour le scénario 5. Ainsi, le fait de passer d'une rénovation inexistante à une rénovation annuelle de 1% du parc de bâtiment pour le logement et de 3% pour le tertiaire permettrait d'économiser 50% des consommations de chauffage.

En l'absence de rénovation, les nouvelles constructions seules ne permettent pas de réduire significativement les consommations énergétiques en raison de l'inertie de la ville. Ainsi, dans le scénario 5, ville en crise, les consommations de chauffage en climat actuel (68 kWh/m^2/an) sont quasiment équivalentes aux consommations du Toulouse actuel (76 kWh/m^2/an), malgré la construction de nombreux bâtiments plus performants que ceux qui existent actuellement.

En termes de consommation de climatisation, les scénarios 5 et 7 se distinguent clairement des autres (16 kWh/m^2/an contre 5 kWh/m^2/an en moyenne). Le comportement des usagers semble être la variable qui les distingue des autres scénarios. En effet, les autres variables paraissent avoir une moindre influence sur la consommation de climatisation. Ainsi, on peut conclure qu'une température de consigne de climatisation fixée à 26°C plutôt qu'à 23°C permet d'économiser plus de deux tiers des consommations de climatisation.

2.4. Analyse multicritère

2.4.1. Méthodes d'agrégation pour une analyse multicritère

Le système d'indicateurs mis en place permet désormais une comparaison des différents scénarios selon une analyse multicritère. Cependant, une analyse désagrégée au travers d'une liste d'indicateurs évalués un à un ne permet pas de définir la ou les solutions les plus « performantes » d'un point de vue environnemental (Adolphe et al., 2013).

Une des solutions consiste à agréger les indicateurs retenus afin de simplifier la lecture des résultats. Cela permet de faciliter la quantification des performances de chaque ville mais également la communication des résultats.

Il existe différentes méthodes d'agrégation d'indicateurs (Adolphe et al., 2013), dont certaines ont déjà été utilisées pour construire notre système.

(1) D'une part, il est possible de combiner des indicateurs simples appartenant à la même thématique au travers d'une opération mathématique. Par exemple, nous avons déjà combiné les consommations individuelles de chauffage de chaque maille en une consommation moyenne de chauffage pour l'ensemble de la ville. Même si cette opération gomme les écarts entre les différents types de quartier, elle permet de rendre compte de la performance énergétique globale d'un scénario par rapport à un autre.

(2) D'autre part, on peut également choisir, pour un thème donné, de ne conserver qu'un seul indicateur en mettant en avant les relations qui le lient aux autres. Par exemple, il est inutile de conserver simultanément la hauteur moyenne des bâtiments, la densité bâtie brute et le coefficient d'emprise au sol car deux de ces indicateurs suffisent à déterminer le troisième.

(3) Pour finir, on peut également agréger des indicateurs de différentes unités et portant sur différentes thématiques par le biais de plusieurs méthodes. Les approches d'agrégation inter-thématique peuvent être divisées en trois principales catégories selon la façon dont les indicateurs sont agrégés (Schärlig, 1985). Ces trois catégories sont détaillées dans le chapitre suivant.

2.4.2. Méthodes d'agrégation inter-thématiques

(1) L'agrégation complète consiste à combiner les indicateurs pondérés par des coefficients qui permettent de tenir compte de la prévalence d'un critère sur un autre (par exemple on peut privilégier la consommation énergétique par rapport à la production énergétique). L'agrégation permet alors d'établir un classement des différentes solutions. On peut citer la méthode WSM (Weight Sum Method ou somme des notes pondérées) et la méthode WPM (Weight Product Method ou produit des notes pondérées) qui agrègent les indicateurs par des sommes ou des produits pondérés (la deuxième méthode étant particulièrement pénalisante lorsqu'un indicateur a une valeur très faible ou nulle). On peut également parler de la méthode AHP (Analytic Hierarchy Process ou processus de hiérarchie analytique) qui permet de hiérarchiser les indicateurs et d'effectuer des comparaisons de solutions deux à deux selon chaque critère. Elle permet donc une plus grande fiabilité que les précédentes (Saaty, 1990). La méthode MAUT (Multi Attribute Utility Theory ou théorie des utilités) cherche à mesurer l'utilité d'une solution en combinant les utilités de chaque paramètre (par addition ou multiplication pondérées). L'utilité est déterminée par des questions adressées au décideur, ce qui rend cette méthode difficile à mettre en œuvre (Ishizaka & Nemery, 2013).

(2) On peut également citer les méthodes du type agréation partielle. Cette méthode permet d'établir des comparaisons entre différentes solutions. Il s'agit cependant de relations de surclassement et pas de classement à proprement parler. La plus connue de ces méthodes est la méthode ELECTRE (Roy, 1991). Dans cette méthode, une solution en surclasse une autre si elle est au moins aussi bonne que l'autre relativement à une majorité de critères, sans être nettement plus mauvaise que cette autre relativement aux autres critères.

(3) Pour finir l'agrégation locale a pour principe de déterminer une solution de départ puis de procéder à une recherche itérative pour trouver une meilleure solution. Ce type de méthode ne permet donc pas de définir un classement mais de trouver la solution la plus « performante » au regard des critères considérés.

2.4.3. Exemple d'analyse multicritère pour les résultats d'ACCLIMAT

Dans le cadre du projet ACCLIMAT, l'analyse multicritère des scénarios s'appuie essentiellement sur la comparaison des fiches de synthèse présentées en annexe 9. Nous souhaitons cependant mettre en œuvre quelques-unes des méthodes présentées précédemment afin d'illustrer l'usage pouvant être fait des résultats de la plateforme ACCLIMAT.

Sélection d'un nombre réduit d'indicateurs

Parmi tous les indicateurs à notre disposition, nous n'en conservons qu'une partie afin de clarifier la compréhension du système et de faciliter la quantification des performances de chaque scénario. Cette première réduction du nombre d'indicateurs se fait (1) soit par combinaison des indicateurs au travers d'une opération mathématique, (2) soit par choix d'un nombre limité d'indicateurs représentatifs des autres (on ne conserve qu'un seul indicateur en mettant en avant les relations qui le lient aux autres).

Tableau 64 : Premier jeu d'indicateurs agrégés (1) agrégation simple (2) agrégation par représentativité

indicateur	Thème	Méthode d'agrégation
Consommation d'énergie totale	Énergie	(1) Nous avons ici sommé les consommations par m^2 et par an liées au chauffage et celles liées à la climatisation pour l'ensemble de la ville.
Intensité de l'ilot de chaleur urbain	Climat	(2) Cet indicateur est caractéristique du microclimat urbain et des conditions de confort thermique des habitants
Taux d'habitat individuel	Socio économie	(2) Nous avons ici émis l'hypothèse que cet indicateur pouvait être représentatif du confort de l'habitant (rappelons que ce mode d'habitat est le plus sollicité par les français, voir chapitre 2.1.3 de la première partie)
Étalement urbain	Forme urbaine	(2) Cet indicateur est représentatif de l'impact de l'expansion urbaine sur la biodiversité mais également sur les distances à parcourir par les ménages (la distance calculée par NEDUM n'étant pas suffisamment précise pour être conservée dans notre système). De manière à se détacher de l'influence de la démographie, nous avons rapporté la surface urbanisée à la surface de plancher des bâtiments de la ville.
Taux de végétation	Environnement	(2) Cet indicateur est caractéristique de la préservation, diminution ou augmentation de la végétation urbaine et rurale dans la zone d'étude.

Nous exprimons les indicateurs entre 0 et 1 pour chaque scénario et les représentons sur le diagramme parallèle ci-dessous (voir Figure 153) et sur des diagrammes radars (voir Figure 154). Une valeur de 1 signifie que l'indicateur a la meilleure valeur de tous les scénarios (par exemple la consommation énergétique minimale ou le taux de végétation le plus élevé). A l'inverse, une valeur de 0 désigne la valeur la moins satisfaisante.

Malgré le faible nombre de scénarios et d'indicateurs, la Figure 153 et la Figure 154 ne nous permettent pas de déterminer de manière triviale un ensemble solutions optimales. En revanche, il est possible d'utiliser l'une des méthodes d'agrégation inter-thématiques présentées auparavant.

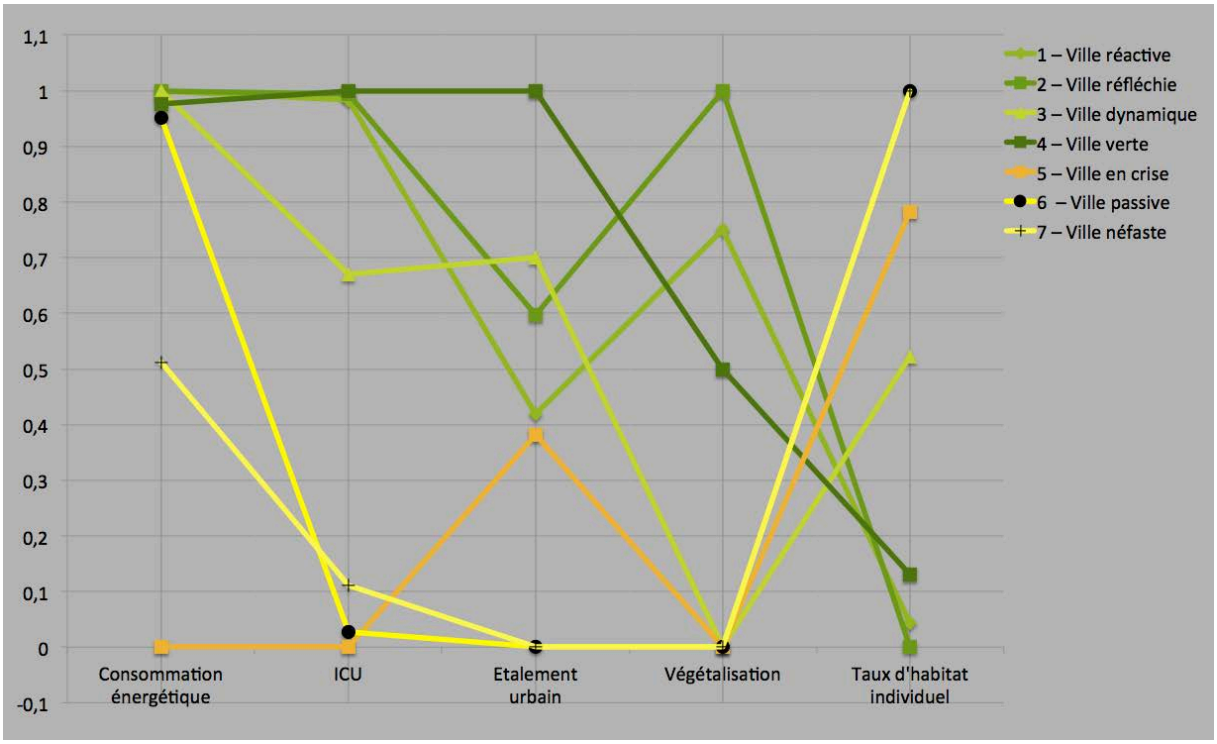
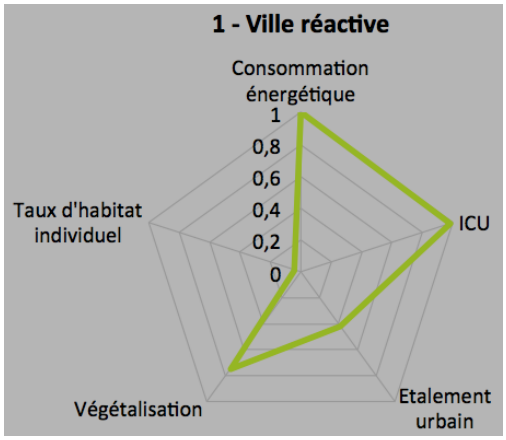
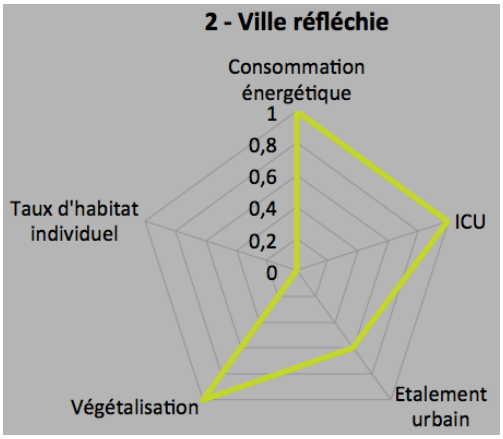
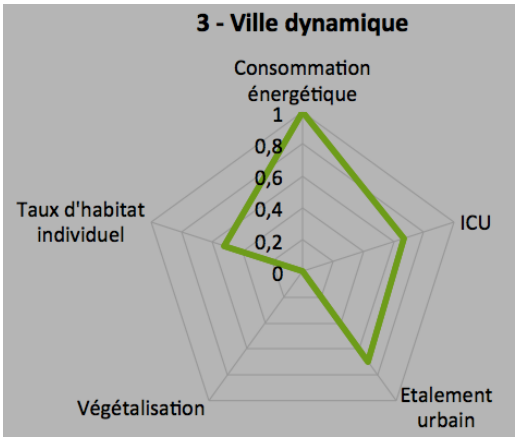
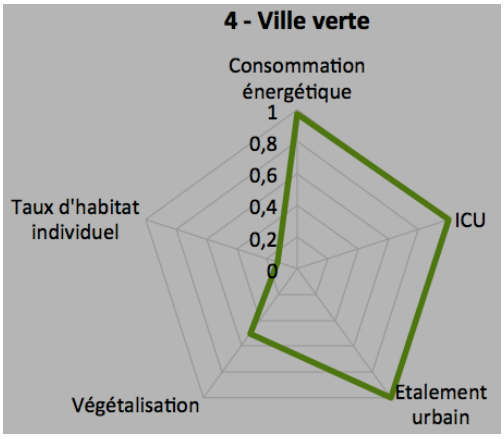


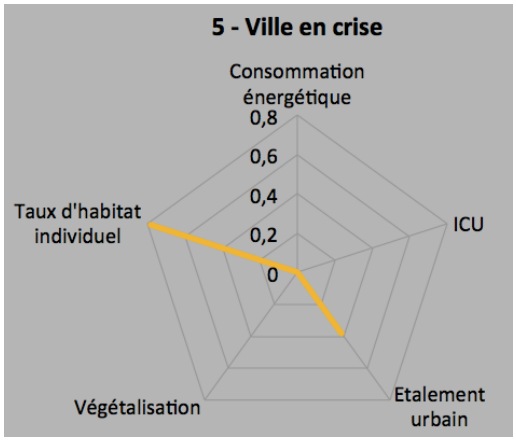
Figure 153 : Diagramme parallèle pour l'analyse multicritère des scénarios (illustration de l'auteur)

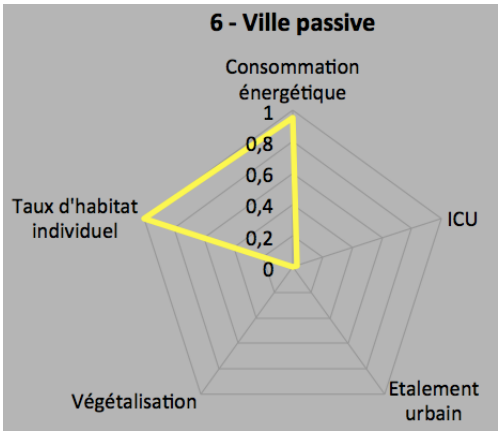












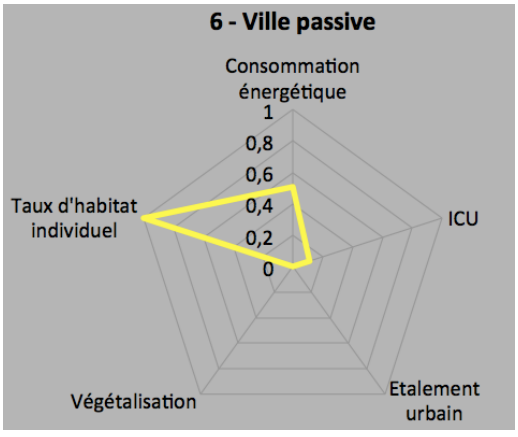


Figure 154 : Diagrammes radars pour l'analyse multicritère des scénarios (illustration de l'auteur)

Agrégation inter-thématique

Ces méthodes sont avant tout destinées à éclairer certains aspects des prises de décisions, elles impliquent donc habituellement un ou plusieurs décideurs. Ceux-ci vont en effet devoir définir des priorités dans les différentes thématiques (pondération) mais également des niveaux de vétos (différence entre valeurs d'un indicateur au-delà de laquelle un scénario est tellement meilleur qu'un autre qu'il sera considéré comme meilleur quelles que soient les valeurs des autres indices), des préférences (valeur cible pour un indicateur) et des niveaux d'indifférence (écart entre deux valeurs d'un indicateur en deçà duquel la différence n'est pas significative).

Dans le cadre des projets ACCLIMAT et MUSCADE, il n'a pas été possible de consulter des décideurs même si l'outil créé a pour objectif final d'être une aide à la décision. Aucune agrégation d'indicateurs n'a donc été proposée. Dans la suite de ce chapitre, nous avons cependant souhaité mettre en œuvre quelques-unes de ces méthodes afin d'illustrer l'usage pouvant être fait des résultats de la plateforme ACCLIMAT.

Nous retenons les méthodes WSM (somme des notes pondérées) et WPM (produit des notes pondérées) qui sont des méthodes extrêmement simples. Nous mettons également en œuvre la méthode ELECTRE III qui est l'une des plus utilisée dans le domaine.

Le Tableau 65 présente les résultats issus de ces trois méthodes. N'ayant pas pu définir de pondération des critères par consultation de décideurs, nous attribuons le même poids à chaque indicateur. Le détail de la méthode ELECTRE III est présenté en annexe 10.

Tableau 65 : Classement des scénarios selon trois méthodes d'aide à la décision multicritère

Méthode / Scénario	WSM	WPM	ELECTRE III
1 – Ville réactive	3	3	1
2 – Ville réfléchie	2	2	1
3 – Ville dynamique	4	4	4
4 – Ville verte	1	1	1
5 – Ville en crise	7	7	7
6 – Ville passive	5	5	5
7 – Ville climatiquement néfaste	5	5	5

On observe tout d'abord que les classements établis pour chaque méthode sont cohérents, avec cependant une différence non négligeable entre la méthode ELECTRE III et les autres.

Les méthodes de la somme pondérée et du produit pondéré donnent un classement strict des sept scénarios. Cependant, comme nous l'avions exposé, la limite de ces méthodes réside dans le fait qu'elles ne distinguent pas de scénarios incomparables.

Afin d'illustrer cette notion d'incomparabilité, intéressons-nous au graphique que l'on pourrait obtenir en nous limitant à l'optimisation de deux critères : l'effet d'ilot de chaleur urbain (que l'on cherche à minimiser) et le taux d'habitat individuel (que l'on cherche à maximiser) (voir Figure 155). On dit qu'un individu *A* domine un individu *B* si, quelque soit le critère considéré le point *A* est plus performant que le point *B*. Dans cet exemple précis, on peut dire que le scénario 7 domine le scénario 5 car son taux d'habitat individuel est plus grand et que son effet d'ilot de chaleur urbain estival est plus faible. En revanche, il nous est impossible de comparer le scénario 7 et le scénario 4. Dans ce problème particulier, ce sont deux solutions optimales au sens ou elles ne sont dominées par aucune autre. En l'absence de traitement supplémentaire des données, nous ne pouvons pas privilégier l'un ou l'autre des scénarios : ils sont incomparables. Pourtant, si on applique les méthodes de la somme pondérée ou du produit pondéré sur ce cas en deux dimensions, elles classent ces deux scénarios à un rang d'écart (le scénario 4 est deuxième et le scénario 7 troisième) par un simple jeu de valeurs d'indicateurs.

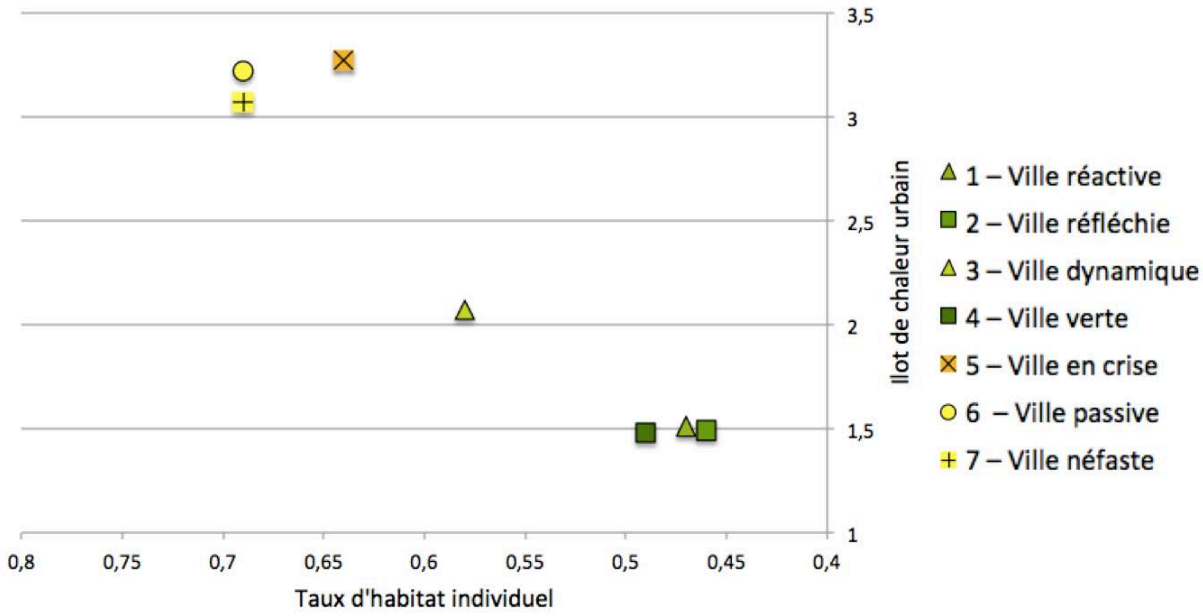


Figure 155 : Analyse des scénarios selon deux critères (illustration de l'auteur)

Par opposition aux méthodes de la somme pondérée ou du produit pondéré, la méthode ELECTRE III respecte cette notion d'incomparabilité. Elle établit les relations de surclassement en comparant les scénarios deux à deux. Elle présente également l'avantage de pouvoir définir des seuils de véto, d'indifférence et des préférences, permettant ainsi un lien plus aisé avec les modalités de prise de décision des praticiens.

Si on considère à nouveau l'ensemble de nos six critères, la méthode ELECTRE III fait ressortir les scénarios 1, 2 et 4 comme les plus performants (voir Tableau 65). Cependant, il est nécessaire de rappeler que le choix d'autres indicateurs ou d'autres pondérations aurait pu bouleverser ce classement.

Il est pourtant vrai que ces trois scénarios sont les plus performants en termes de consommation énergétique des bâtiments et d'atténuation de l'effet d'ilot de chaleur urbain (voir Figure 156).

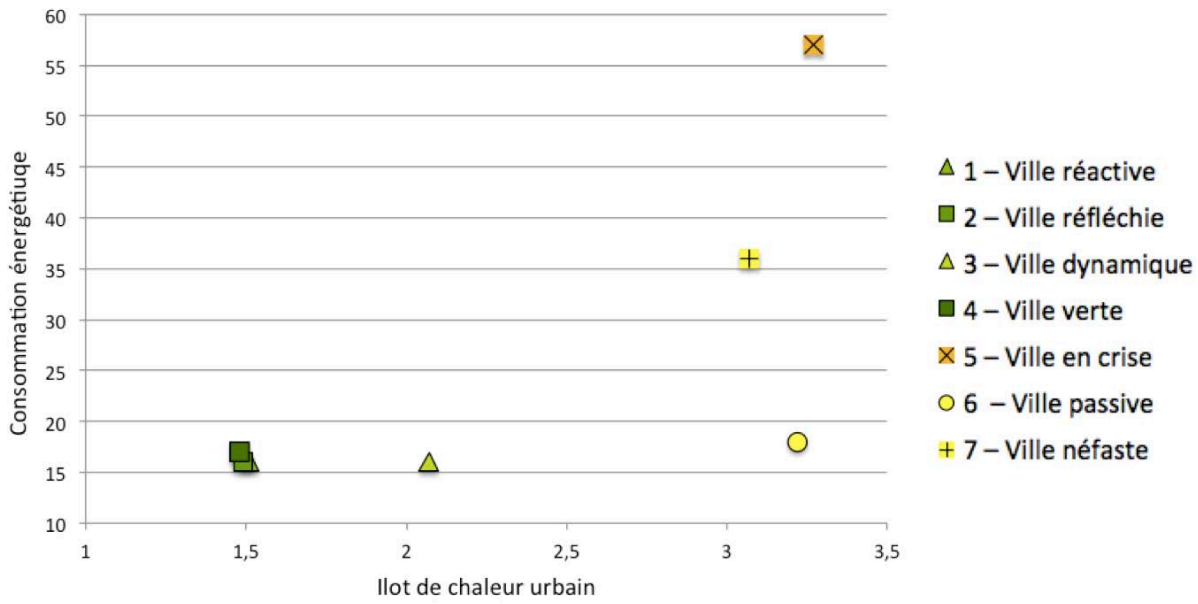


Figure 156 : Analyse des scénarios selon les critères énergie et climat (illustration de l'auteur)

De plus, leurs étalements urbains sont parmi les plus limités. Seul le scénario 3 a un étalement urbain comparable mais il est moins intéressant en termes d'atténuation de l'ilot de chaleur urbain et de taux de végétalisation. En effet, sur le plan de la préservation des espaces végétaux, les scénarios 1, 2 et 3 sont encore une fois les meilleurs.

En revanche, ce sont également les scénarios où l'on rencontre le moins d'habitat individuel, alors que ce type de logement est celui qui est plébiscité par les français (voir chapitre 2.1.3 de la première partie). Cependant, il est important de noter que ce critère de « qualité

environnementale » est moins objectif que les autres. Même si l'habitat individuel est actuellement le modèle de référence, il est tout à fait possible d'imaginer que d'autres formes architecturales puissent répondre aux souhaits des habitants en termes d'intimité, d'espaces verts récréatifs, d'appropriation de l'habitat, etc. L'habitat intermédiaire est par exemple une forme architecturale et urbaine qui tente de combiner densité et habitat individuel ou semi-individuel (Mialet, 2006) (voir annexe 11).

2.5. Discussion

Comme on vient de le voir, il est possible de dégager des tendances à partir des résultats produits par le projet ACCLIMAT. En particulier, nous sommes capables de définir quels scénarios semblent les plus pertinents au regard de critères environnementaux. Nous avons également des pistes qui permettraient de prendre en compte les priorités des décideurs urbains par une analyse multicritère.

D'un point de vue scientifique, nous avons pu parvenir à un certain nombre de conclusions. Par exemple, le réchauffement climatique associé à l'effet d'ilot de chaleur urbain a pour conséquence de réduire les consommations énergétiques de chauffage et de climatisation, même dans le scénario le plus défavorable. Si on ne considère que le critère énergétique, il serait donc inutile de combattre l'effet d'ilot de chaleur urbain et cette question pourrait être écartée de l'analyse du paradoxe énergétique urbain. Cependant, le confort et la santé des occupants ainsi que la biodiversité pourraient être mis en péril par des températures trop extrêmes.

Pour limiter simultanément l'ilot de chaleur urbain et les consommations énergétiques, nous avons également confirmé que des formes urbaines compactes et denses intégrant des éléments végétaux et associées à des enveloppes performantes du point de vue énergétique constituaient des stratégies efficaces. Bien que ces conclusions ne soient pas nouvelles, elles apportent une contribution à la question du paradoxe énergétique urbain : densité et compacité urbaine raisonnées ne semblent pas incompatibles avec une atténuation de l'effet d'ilot de chaleur urbain.

Cependant, un certain nombre de limites à la méthode de ce projet de recherche doivent être évoquées.

Difficulté d'appropriation par les décideurs urbains

Comme nous l'avons vu, l'analyse multicritère n'a pas pu être finalisée dans le cadre du projet ACCLIMAT. Ainsi, la plateforme fournit pour l'instant un système d'indicateurs complexes à analyser. En particulier, les fiches de synthèse présentées en annexe 9 contiennent une très grande quantité d'informations parfois difficile à appréhender.

Malgré cela, elles ne contiennent qu'une partie des résultats produits par les différents modèles et peuvent donc être insuffisantes lors d'analyses de phénomènes particuliers (par exemple, la répartition précise de la végétation dans la zone d'étude).

Cette complexité du système ville et la difficulté de la traduire en un niveau pertinent d'information peuvent conduire à des erreurs d'interprétation.

Il pourrait donc être nécessaire d'approfondir la question des différents niveaux de présentation des résultats. En effet, à un niveau d'expertise élevé (bureaux d'études ou laboratoires de recherche) des résultats précis, chiffrés et cartographiés sont requis. Pour un décideur urbain, des résultats thématique par thématique sont nécessaires mais ils doivent être plus synthétiques (voir chapitre 1.6.6 de la première partie). Ces décideurs vont parfois également souhaiter une appréciation globale d'un scénario sous la forme d'un classement ou d'un unique indicateur agrégé. En ce sens, les méthodes d'analyse multicritère pourraient être développées mais ne doivent pas occulter le caractère pédagogique de la plateforme. En effet, des résultats trop synthétiques pourraient laisser penser que le « meilleur scénario » est un exemple à suivre rigoureusement. Au contraire, l'objectif de ce projet est de mesurer les impacts relatifs de différents leviers d'action, et d'en comprendre les tenants et aboutissants.

Enfin, l'échelle temporelle est en soi une difficulté en ce qui concerne l'appropriation des résultats par les décideurs. Bien que cet horizon séculaire soit nécessaire d'un point de vue scientifique, il peut sembler très abstrait pour un urbaniste ou un politique qui subit les contraintes d'un mandat électoral. Cependant, la plateforme ACCLIMAT peut fournir des résultats à des dates plus proches (2030, 2050, etc.), donnant un aperçu plus appréhendable par les décideurs.

Réduction du domaine des possibles

Parmi les limites de la plateforme, on peut également évoquer le caractère réducteur des sept scénarios proposés. Bien qu'ils correspondent à des récits contrastés et réalisables des futurs possibles pour la ville de Toulouse, il n'en reste pas moins qu'une grande quantité de combinaisons des hypothèses de départ reste inexplorée. Cette limitation pourrait être en partie levée par une amélioration simple de la plateforme ACCLIMAT : la possibilité pour un utilisateur de sélectionner les hypothèses de départ et de générer ses propres scénarios.

La principale conséquence de cette limitation des scénarios reste la difficulté d'analyser l'impact d'un critère seul. Par exemple, il est difficile de savoir si les scénarios 1, 2 et 4 sont les meilleurs en raison de la compacité de leurs formes urbaine ou en raison de leur isolation thermique ou encore en raison d'une combinaison de ces deux facteurs.

Développer les possibilités de choix de scénarios dans la plateforme pourrait apporter une amélioration à ce problème. Cependant, la meilleure solution pour une interprétation

scientifique des résultats serait de réaliser une étude de sensibilité complète. Nous verrons dans le chapitre 3.1 comment cette étude de sensibilité est actuellement mise en œuvre dans le projet EPICURE.

Pour finir, il est important de souligner que les résultats obtenus et les conclusions qui en sont tirées (que ce soit dans les projets ACCLIMAT et MUSCADE ou dans les projets futurs) ne sont valables que dans un contexte géographique particulier. A titre d'exemple, nous avons pu observer que le changement climatique combiné à l'ilot de chaleur urbain peuvent être avantageux au regard des consommations énergétiques. Cependant, cette conclusion n'est valable que dans le contexte urbain, géographique et climatique toulousain. Nous verrons dans le chapitre 3.2 comment ces projets pourront être généralisés à l'ensemble du territoire français dans le projet MApUCE.

Limites des modèles

La plateforme d'aide à la décision proposée reste contrainte par les limites inhérentes à chaque modèle qui la compose. Ainsi, les limites identifiées pour le modèle GENIUS et évoquées dans la deuxième partie sont autant de limites de la plateforme.

De la même manière, les autres modèles ont également leurs limites. Comme évoqué précédemment, le modèle TEB est basé sur un certain nombre d'hypothèses simplificatrices. Les hypothèses concernant la forme urbaine peuvent notamment limiter la prise en compte de certaines morphologies. En particulier, les formes urbaines traditionnelles à cour ne peuvent être prise en compte comme telles dans TEB. Elles y sont ramenées à une géométrie simplifiée ayant la même surface d'enveloppe mais n'ayant pas forcement le même comportement par rapport aux mouvements d'air ou aux ombres portées.

Une autre limitation importante est celle de SLEDUM qui ne peut pas calculer de manière précise les distances de déplacement dans des villes multipolaires.

Qu'il s'agisse de TEB, GENIUS ou SLEDUM, des développements sont en cours afin d'améliorer la pertinence des modèles. Leurs versions actuelles intégrées dans la plateforme ACCLIMAT sont malgré tout des contributions à une meilleure compréhension des systèmes urbains.

En outre, la question de la densité bâtie et du paradoxe énergétique urbain demeurent sans réponse puisque nous n'avons pas pu prendre en compte l'impact de la morphologie urbaine sur le potentiel de production d'énergies renouvelables. D'autres problématiques comme l'énergie grise ou les consommations liées aux déplacements n'ont pas ou peu été abordées.

L'une des pistes de développement est donc l'intégration de nouvelles thématiques afin d'avoir une approche la plus exhaustive possible de l'énergétique urbaine. Il pourrait s'agir de l'intégration de nouveaux types d'énergies renouvelables (biomasse, éolien, géothermie, etc.) ou de la prise en compte de l'énergie primaire totale des matériaux ou encore d'indicateurs sociaux culturels. En ce qui concerne l'évaluation simplifiée du potentiel éolien, elle fait actuellement l'objet d'une thèse en cours au LRA (B. Wang, 2013). Pour les matériaux urbains, le stage de Mike Coillot réalisé au LRA a permis d'établir des bases pour l'intégration de l'évaluation de l'énergie primaire totale des matériaux à GENIUS (Coillot, 2013). Pour finir, Greta Parisi a travaillé sur les bases d'un indicateur de densité perçue lors d'un stage réalisé au LRA sous ma direction (Parisi, 2013). Ce type d'indicateur pourrait également être intégré à GENIUS.

Il est souvent question de la validation des modèles prospectifs. Comme tous les modèles de ce genre, les modèles prospectifs utilisés dans les projets ACCLIMAT et MUSCADE ont été validés sur les évolutions passées. Les scénarios prospectifs ont ensuite été construits sur la poursuite de ces tendances passées et sur des évolutions contrastées par rapport à cette référence. Cependant, il ne faut nullement voir les résultats produits comme des prédictions absolues des villes futures. Ils sont uniquement utilisables de manière comparative, afin d'évaluer les effets relatifs de différents moyens d'action sur la ville.

Pour finir, il est utile de noter que ces modèles dans leur ensemble sont basés sur des critères quantitatifs et objectifs, et que les données qu'ils produisent le sont également. Par conséquent, les critères sociaux et culturels sont plus difficilement pris en compte dans ces projets de recherches. Or, la ville n'est pas simplement une machine thermique et l'on ne peut se contenter de l'optimiser du point de vue de l'énergétique urbaine. Nous verrons dans le chapitre 3.2 que le projet MApUCE est un premier pas vers une ouverture de la recherche en énergétique urbaine aux disciplines des sciences humaines.

Autres perspectives d'exploitation de ce travail

Malgré les limites de cette méthode et les pistes de travail qu'elles ouvrent, les projets de recherche ACCLIMAT et MUSCADE ouvrent d'autres perspectives d'exploitation.

En particulier, on peut imaginer que l'analyse globale menée sur les zones d'étude parisienne et toulousaine puisse contribuer à un diagnostic détaillé et cartographié de ces territoires. Elle peut par exemple permettre de cibler des quartiers de la ville vulnérables au changement climatiques (mal isolés, peu végétalisés, à forte densité de population et où les revenus des ménages sont faibles).

3. Perspectives

3.1. Utilisation de GENIUS dans le cadre du projet EPICURE : étude de sensibilité et optimisation des formes urbaines

3.1.1. Problématique : la nécessité d'une étude de sensibilité

Comme on l'a vu, une des limitations majeures des projets ACCLIMAT et MUSCADE est liée à la mise en œuvre de scénarios intégrés d'évolution et d'adaptation de la ville, combinant plusieurs leviers d'action. Bien qu'intéressante car destinée à traduire une politique d'aménagement urbain réaliste, cette approche ne permet pas d'évaluer l'impact et la sensibilité de chaque levier d'action pris séparément. Le projet EPICURE a pour objectif de répondre à ces limites, tout en s'appuyant sur la méthodologie générale et sur les outils des précédant projets.

Démarré en mai 2013, EPICURE (Étude paramétrique de la Performance de dispositifs Urbains pour un Rafraichissement Environnemental) est un projet de recherche financé par l'ADEME dans le cadre du programme « dispositifs de rafraîchissement ». Il porte donc essentiellement sur les dispositifs d'atténuation du changement climatique et leurs impacts.

3.1.2. Méthode

La méthode du projet EPICURE, dont le détail se trouve en annexe 13, se décompose en six étapes :

1. l'identification des leviers d'actions dont on souhaite évaluer l'importance et la traduction de ces dispositifs en variables d'entrée du modèle TEB ;
2. la définition de plages de variation pour ces variables ;
3. la génération d'un plan d'expérience de manière à ce que les scénarios de ville à modéliser soient suffisamment variés pour évaluer l'impact des différents dispositifs indépendamment les uns des autres, mais également de manière à réduire le nombre de simulations à réaliser)
4. la sélection des variables de sortie à considérer pour évaluer les performances énergétiques et climatiques de la ville ;
5. la simulation des différentes combinaisons de variables générées par le plan d'expérience ;
6. l'analyse de sensibilité permettant d'identifier les variables d'entrée les plus influentes par rapport à une variable de sortie donnée.

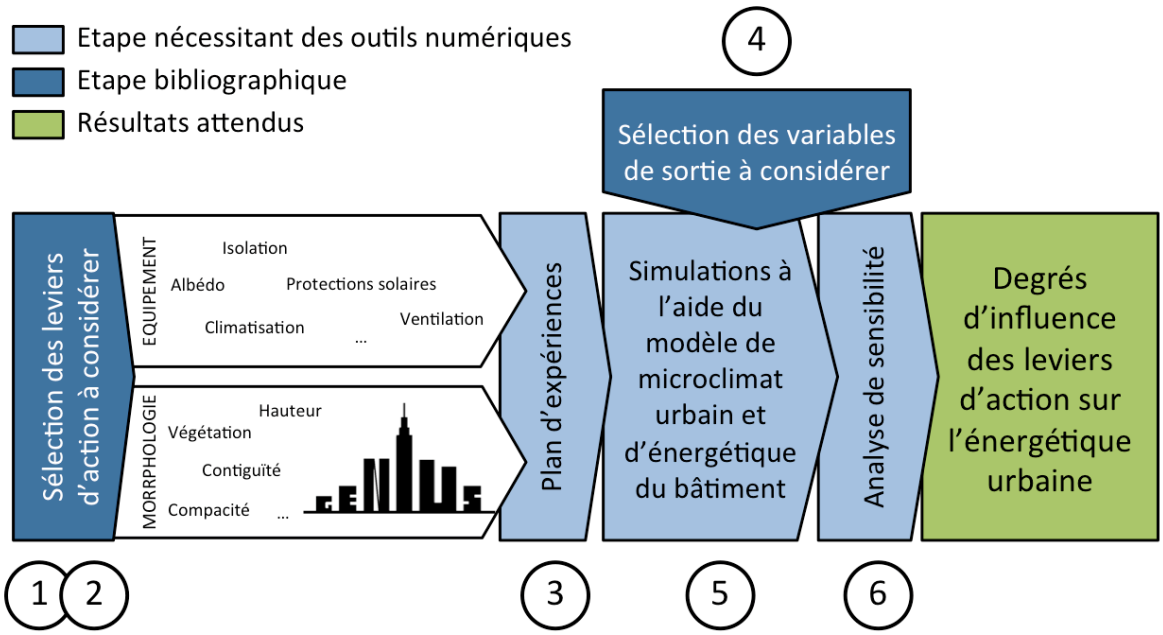


Figure 157 : Méthode générale du projet EPICURE (illustration de l'auteur)

In fine, une liste des dispositifs permettant d'agir sur l'énergétique urbaine sera créée. Ces mesures seront classées en fonction de leur degré d'influence. Il pourra s'agir de mesures liées au comportement des occupants (températures de consigne, etc.), à la matérialité de la ville (isolation thermique du bâti, albédo des surfaces, végétalisation, etc.), à la morphologie urbaine (type de quartier, densité, prospect, etc.), aux équipements techniques des bâtiments (rendement et type de climatiseurs, etc.), etc.

Cette liste permettra aux décideurs urbains de prioriser leurs actions. Dans un contexte où ce type de réglementation peut être long à mettre en œuvre, coûteux et difficilement accepté par les usagers, il est en effet primordial de donner la priorité aux actions les plus efficaces (Molina, 2012).

3.1.3. Perspectives

Les premiers résultats de ce projet en cours laissent imaginer de nombreuses perspectives.

Intégration à un outil SIG simplifié

La méthode de l'étude de sensibilité prévoit de postuler des modèles sous la forme de fonctions des variables d'entrée pour traduire par des équations simples le comportement

du logiciel TEB. Pour chaque type de quartier, on aura autant d'équations que de paramètres de sortie.

Il serait donc envisageable d'intégrer ces équations dans un outil simplifié utilisable par les professionnels de l'urbanisme, les décideurs urbains, les architectes, etc. Par exemple, ce mode de calcul simplifié pourrait être intégré à un logiciel SIG qui servirait de base à un outil d'aide à la décision multicritère.

Optimisation

La génération des plans d'expériences type de quartier par type de quartier nous permettra de déterminer quelle forme urbaine est la plus performante au regard de l'énergie consommée, quelle est celle qui l'est au regard de l'atténuation de l'ilot de chaleur urbain, etc. Comme précédemment, on pourra déterminer un ensemble de solutions optimales au regard de ces différents critères. Cependant, le plan d'expérience permettant de couvrir un vaste domaine des possibles, ces solutions pourront être plus performantes que celles proposées dans ACCLIMAT et MUSCADE.

Cette optimisation peut permettre de déterminer quel type de quartier est le plus performant au regard de l'énergétique urbaine. Cependant, la ville se construit par sa diversité et on ne peut pas préconiser un seul type car chacun répond à différentes fonctions sociales et économiques. L'optimisation devrait permettre de déterminer les combinaisons les plus performantes au sein d'un même type de quartier.

L'optimisation présente de nombreux avantages : D'une part elle permet d'atteindre une solution efficace, d'autre part, elle permet d'élargir le domaine des possibles en générant des options que le concepteur n'aurait peut-être pas envisagé (Geyer, 2009). Cette opportunité est particulièrement intéressante lorsque l'on se place dans un contexte prospectif et que l'on cherche à explorer des scénarios futurs contrastés et inédits.

Par ailleurs l'optimisation multicritère permet de comprendre l'arbitrage et ses conséquences lorsque l'on cherche à atteindre plusieurs objectifs contradictoires (par exemple une large surface de captation des apports solaires gratuits versus une faible surface de déperdition).

Bien sûr, des limitations existent, en particulier la forme très simplifiée de bâtiments ou de villes que l'on peut envisager. Seules de très récentes recherches prennent en compte la complexité de la réalité de la forme bâtie. On peut citer celle de Yuan, Ng et Chen (Yuan, Ng, & Chen, 2012) qui prennent en compte des enveloppes complexes dans l'optimisation du

bâtiment vis-à-vis de la ventilation naturelle.

Un des arguments le plus souvent opposé à l'optimisation reste le risque d'uniformisation des choix de conception qui en résultent. Il faut tout d'abord rappeler qu'en raison même de la nature des réponses apportées (un ensemble de solutions non dominées*), il n'existe pas de réponse unique. De plus, cette étude serait menée pour sept typologies différentes. Il est surtout nécessaire de rappeler que, comme toute étude de modélisation, c'est surtout l'interprétation des résultats qui fait la valeur d'une optimisation. Ce sont les leçons que nous tirerons des solutions optimales qui serviront à établir des recommandations et non les solutions obtenues elles-mêmes. En particulier, nous nous intéresserons aux valeurs des paramètres morphologiques qui distinguent une solution « optimale » des autres, et qui permet de satisfaire telle ou telle fonction.

Complexification de l'étude de sensibilité et d'optimisation

La troisième perspective de ce travail serait d'étendre l'étude de sensibilité à la plateforme ACCLIMAT dans sa totalité. Cela permettrait d'évaluer un ensemble de critères comme par exemple l'influence des politiques climatiques mondiales, l'influence du prix du pétrole sur l'expansion urbaine, etc.

* Voir glossaire

3.2. Utilisation de GENIUS dans le cadre du projet MApUCE

3.2.1. Problématique

Le projet MApUCE (Modélisation Appliquée et droit de l'Urbanisme : Climat urbain et Énergie) est la poursuite des projets ACCLIMAT et MUSCADE, il s'appuie donc sur leur méthodologie tout en y apportant des améliorations. Ce projet de quatre ans financé par l'ANR démarrera en 2014 et associera les laboratoires CNRM / GAME (Centre National de Recherche Météorologique / Groupe d'Étude de l'Atmosphère Météorologique), IRSTV (Institut de Recherche Sciences et Techniques de la Ville), LAVUE (Laboratoire Architecture Ville Urbanisme Environnement), LIENSs (LIttoral ENvironnement et Sociétés) et LRA (Laboratoire de Recherche en Architecture).

Comme on l'a vu dans le chapitre 2.8 de la deuxième partie de ce mémoire il existe des perspectives d'amélioration pour GENIUS, en particulier en ce qui concerne la classification typologique des quartiers. Le projet MApUCE a pour objectif, entre autres, de proposer les améliorations suivantes : (1) un choix de typologies des quartiers qui rend compte de la diversité architecturale française, (2) l'exploration de méthodes statistiques d'affectation pour une classification des quartiers plus rapide et plus précise, (3) l'amélioration du découpage de la carte initiale et (4) l'automatisation de la génération de la carte initiale.

Par ailleurs, MApUCE a également pour objectif d'affiner la prise en compte des aspects socio-économiques dans l'étude du triptyque ville-énergie-climat. Ainsi, un accent particulier sera mis sur l'influence des usages sur les consommations énergétiques. Un autre volet du projet concernant l'aspect règlementaire existe mais ne sera pas présenté ici.

3.2.2. Méthode

Le volet du projet MApUCE présenté dans ce mémoire et dont le détail se trouve en annexe 14 se décompose en sept étapes :

1. l'automatisation du calcul des indicateurs nécessaires en entrée de GENIUS ;
2. l'étude des bâtiments et des quartiers de France et la mise au point d'une typologie valable pour l'ensemble du territoire français ;
3. l'amélioration de la classification des quartiers par l'exploration de méthodes de classification supervisées ;
4. la classification automatique des quartiers ;
5. la caractérisation des quartiers d'un point de vue morphologique, énergétique et socio-économique ;

6. le développement d'un modèle pour prendre en compte le comportement énergétique des ménages ;
7. la simulation intégrée avec le modèle TEB.

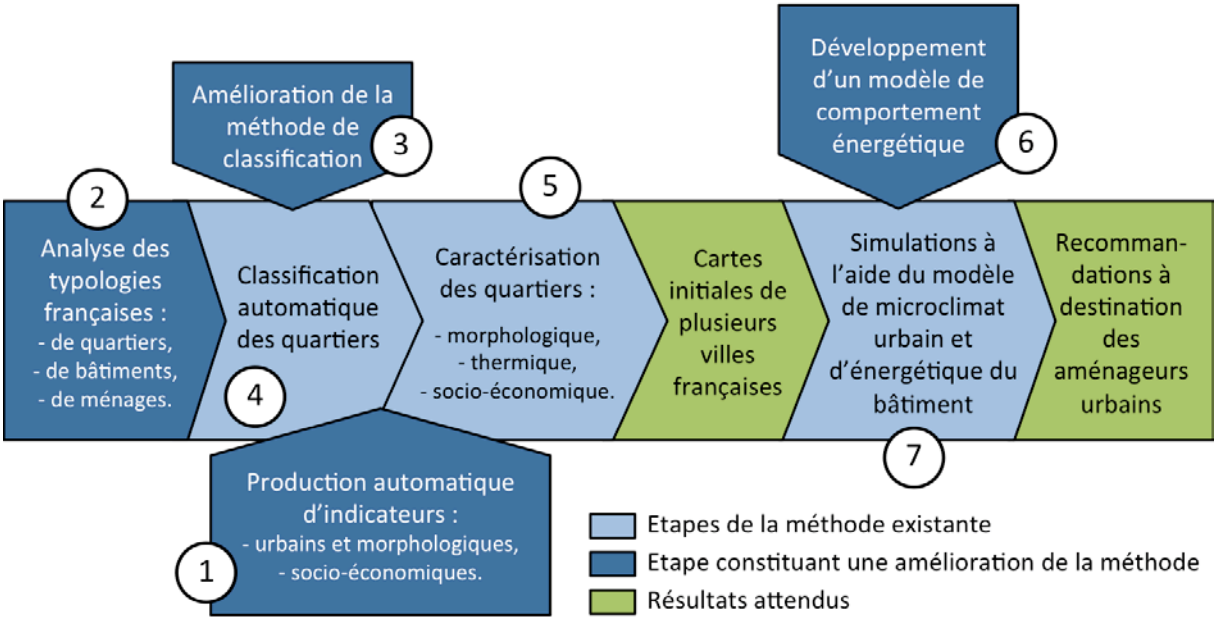


Figure 158 : Méthode du projet MApUCE (illustration de l'auteur)

3.2.3. Perspectives

L'automatisation et la généralisation de GENIUS à l'ensemble du territoire français revêt une importance primordiale pour une problématique qui dépend énormément du contexte - qu'il soit technique, architectural, urbain ou climatique.

Une fois cette automatisation mise en place, le portage vers un outil plus ergonomique utilisable par les décideurs urbains sera plus facilement envisageable.

Il reste cependant que ce type de projet demeure pour l'instant circonscrit au territoire français. Or on pourrait envisager d'utiliser ces méthodes dans d'autres pays. Les modèles NEDUM et TEB ont déjà été utilisés à l'étranger, il suffirait donc de trouver des bases de données adaptées pour étendre notre méthode à d'autres zones géographiques.

4. Conclusion de la troisième partie

Comme nous l'avons vu dans le chapitre 1, la descente d'échelle réalisée par GENIUS a des applications concrètes pour les projets de recherches.

Tout d'abord, elle permet d'apporter des informations compatibles avec les différentes échelles et niveaux de détail de l'énergétique urbaine : (1) les équipements, les matériaux, et la géométrie des édifices pour tout ce qui touche au bilan énergétique du bâtiment, (2) les types de surface et la géométrie des quartiers pour l'étude du microclimat urbain, (3) la typologie et l'âge des quartiers, le nombre d'habitants et la surface bâtie pour les modèles socio-économiques d'expansion urbaine.

Par ailleurs, GENIUS permet de faire évoluer ces informations dans le temps en étant couplé avec un modèle d'expansion urbaine. Ainsi il rend compatibles les différentes échelles temporelles des modèles avec la période d'étude séculaire.

Ainsi, dans le cadre des projets ACCLIMAT et MUSCADE, GENIUS a contribué aux échanges entre modèles et à la mise en place d'une méthode de recherche pluridisciplinaire sur l'énergétique urbaine.

Bien que des perspectives demeurent, ces projets ont permis d'illustrer par des exemples concrets les leviers d'actions sur les interactions complexes entre ville, climat et énergie et sur le paradoxe énergétique urbain. Dans le contexte toulousain, limiter l'étalement urbain, favoriser la compacité et la densité tout en végétalisant au maximum les espaces laissés libres semblent ainsi être des « solutions sans regret ».

Nous avons également mis en avant la nécessité de prises de décisions rapides et volontaristes, l'importance de mettre en œuvre des politiques de verdissement de la ville spécifiques (accompagnées d'un arrosage adapté), les avantages d'une expansion urbaine multipolaire par rapport à un dispositif de ceinture verte, la portée de la rénovation énergétique et le rôle des usagers dans les économies d'énergie.

Cependant, de nombreuses perspectives d'amélioration demeurent. De manière à faciliter la compréhension et l'appropriation de ces résultats par les décideurs urbains, deux pistes sont à explorer : celle de l'analyse multicritère et celle de l'étude de sensibilité. Comme on l'a vu, cette dernière fait l'objet d'un projet de recherche en cours, le projet EPICURE.

Le deuxième axe concerne l'amélioration des modèles et la prise en compte de nouveaux critères dans cette analyse pluridisciplinaire : transport, énergie primaire totale des

matériaux, énergies renouvelables, etc. sont autant de thématiques qui pourront venir compléter des modèles en constant développement.

Par ailleurs, comme dans beaucoup de projets touchant à l'énergétique urbaine, les critères sociaux-culturels sont sous représentés. En effet, la ville reste souvent considérée comme une machine thermique, dont on cherche à optimiser la morphologie au regard de critères techniques. Le risque est que cela se fasse au détriment de la qualité urbaine et architecturale et de la qualité de vie des habitants. Cependant, ces notions restent subjectives, variant d'un individu à l'autre, et sont donc très difficiles à évaluer par des modèles. Comme on l'a vu avec l'exemple du projet MApUCE, ce type de critère est progressivement pris en compte dans les études pluridisciplinaires de l'énergétique urbaine. Bien que beaucoup de chemin reste à parcourir, l'intégration progressive de disciplines telles que l'urbanisme, l'architecture et la sociologie présage d'une ouverture de la recherche en énergétique urbaine.

Conclusion générale

Le climat et la recherche de confort et d'économies d'énergie influencent depuis longtemps la construction des villes, que ce soit par la transmission de savoir-faire vernaculaires de générations en générations ou au travers de tracés planifiés comme ceux des villes romaines.

Cependant, cette capacité d'adaptation au fil du temps risque d'être mise à mal du fait des variations rapides du climat que les villes sont susceptibles de connaître dans les prochaines décennies, consécutivement à l'accroissement de concentration des GES, notamment d'origine anthropique. En outre, induit par la morphologie urbaine, la concentration d'activités humaines et la croissance des villes, l'effet d'ilot de chaleur urbain accentue les conséquences de ces dérèglements.

Les conséquences potentielles sont nombreuses : bouleversement des consommations de chauffage et de climatisation, inadéquation des systèmes de production et de distribution de l'énergie, mise en péril de la biodiversité, dégradation du confort et de la santé des occupants, etc.

Or, nous avons pu voir dans la première partie de ce mémoire que ces problématiques d'énergie et de climat urbains étaient **complexes et pluridisciplinaires**. En particulier, en ce qui concerne la densité bâtie de la ville et son impact sur l'énergétique urbaine, de nombreuses incertitudes demeurent. D'une part, celle-ci semble s'accompagner de bâtiments compacts et contigus qui consomment moins d'énergie pour le chauffage et la climatisation. D'autre part, une ville dense limite l'étalement urbain ce qui contribue globalement à limiter les consommations énergétiques liées aux déplacements (malgré les réserves relevées dans le chapitre 1.2.3 de la première partie). En ce qui concerne l'énergie grise des matériaux urbains, celle-ci semble limitée dans les villes denses, bien que la question nécessite d'être approfondie. A l'inverse, la densité bâtie semble défavorable à la problématique des énergies renouvelables. En effet, en milieu urbain dense, ombres portées, rugosité et grande emprise au sol du bâti diminuent le potentiel de production d'énergie solaire, éolienne, biomasse et géothermique. De même, la densité urbaine semble défavorable à l'effet d'ilot de chaleur urbain car elle correspond à une concentration d'activités humaines, de capacité de stockage d'énergie thermique dans les matériaux de construction, d'espaces peu végétalisés et de géométries contribuant au piégeage radiatif. Ces différents éléments ayant des effets contraires sur les consommations énergétiques et l'accentuation de l'effet d'ilot de chaleur urbain, nous ne pouvons pas trancher la question de la densité idéale d'une ville, c'est ce que nous avons appelé le **paradoxe énergétique urbain**.

De nombreuses questions comme celle-ci demeurent difficiles à trancher pour les décideurs préoccupés par l'énergétique urbaine. Les **leviers d'action sont donc difficiles à imaginer, à**

évaluer et à prioriser. Cette discipline est en effet en structuration en raison de sa complexité, de sa multiplicité et de son apparition relativement récente dans l'histoire des sciences. On se trouve donc face à un certain nombre de freins à la prise en compte des problématiques ville-énergie-climat dans la pratique. Ces difficultés nous rappellent qu'une ville n'est pas qu'une machine thermodynamique et que de nombreux autres aspects sont aussi importants, sinon plus, et contribuent aux performances d'une zone urbaine.

Les simulations numériques sont l'une des pistes pour croiser les différentes disciplines de l'énergétique urbaine. Cependant, nous avons mis en évidence que l'une des limites à la recherche pluridisciplinaire via des simulations numériques était **le manque de bases de données adaptées**.

Premièrement, les bases de données existantes ne centralisent pas toutes les données nécessaires aux disciplines de l'énergétique urbaine. En particulier, le champ de la climatologie urbaine souffre d'un manque de base de données précises à l'échelle de la ville (morphologie du bâti, matérialité, etc.) qui fait l'objet de plusieurs travaux de recherches.

Deuxièmement, le manque d'intégration des études actuelles est en grande partie dû aux différences d'échelles spatiales mobilisées par différentes disciplines. Si on prend l'exemple de la thermique du bâtiment et de l'étude du microclimat urbain, bien que ces disciplines partagent un savoir commun sur les bilans énergétiques, leurs échelles sont très différentes. L'étude du comportement thermique d'un bâtiment nécessite la connaissance d'informations détaillées comme la géométrie du bâtiment et les matériaux qui le composent. En ce qui concerne l'étude du microclimat urbain, les données nécessaires sont tout aussi vastes mais concernent plutôt l'échelle du quartier, voire de la ville. Entre l'échelle de la ville et celle du bâtiment, nous avons également noté un vide méthodologique qui ne permet pas de faire le lien entre les résultats des différentes disciplines. Les bases de données nécessaires aux études urbaines doivent donc répondre à ces différentes échelles et faire le lien entre elles.

Troisièmement, les échelles temporelles impliquées dans l'étude de l'énergétique urbaine compliquent la communication entre les différents modèles. D'une part, elles divergent grandement d'une discipline à l'autre. Par exemple, là où le confort à l'intérieur d'un bâtiment nécessite une simulation thermique dynamique sur une année complète avec un pas de temps inférieur ou égal à l'heure, la simulation des effets des changements climatiques est de l'ordre du siècle et le pas de temps dépasse souvent l'année. D'autre part, cet horizon temporel séculaire est en lui-même un défi scientifique. Or, nous avons vu au travers d'une revue de littérature que les modèles prospectifs existants ne permettaient pas de générer des bases de données suffisamment précises pour des études d'énergétique de la ville.

Nous avons ainsi proposé d'améliorer les méthodes d'obtention de données habituellement utilisées dans les différents domaines de l'énergétique urbaine. Ainsi, l'objet central de cette

thèse et la deuxième partie de ce mémoire concernent la méthode et le développement de **GENIUS, pour GENérateur d'Ilots UrbainS**. Cet outil génère des bases de données dont le contenu, le niveau de détail, l'emboitement d'échelles spatiales et l'évolution temporelle permettent à différentes disciplines d'étudier le même objet : la ville.

La méthode de GENIUS peut être décomposée en deux étapes : GENIUS synchronique et GENIUS diachronique. **La première étape concerne la génération d'une base de données adaptée aux différentes échelles spatiales** de l'énergétique urbaine. Cette base de données est une description initiale de la ville (par exemple le Paris actuel) sous la forme d'une représentation typologique. Cette méthode permet de couvrir un large territoire tout en fournissant un niveau de détail élevé à l'intérieur de chaque maille. Sur la base d'une étude bibliographique, un ensemble de sept archétypes urbains représentatifs des villes françaises a été défini : pavillon discontinus, pavillons continu, immeubles discontinus, immeubles continus, immeubles de grande hauteur, centre ancien et bâtiment d'activité. Un maillage de Paris et de Toulouse (nos cas d'étude) a ensuite été réalisé. Chaque maille a été caractérisée par des indicateurs morphologiques calculés à l'aide du logiciel ArcGIS. Nous avons ensuite sélectionné une méthode de classification automatique, l'analyse en composante principale, qui nous a permis d'identifier le type de chaque maille et de réaliser des cartes archétypales de Paris et Toulouse. Notre méthode se distingue des méthodes typologiques existantes par le fait qu'à chaque « individu » est associé un type de quartier mais également des caractéristiques propres. On connaît finalement pour chaque maille : son type de quartier, ses caractéristiques morphologiques propres (surface de plancher, hauteur, contiguïté, etc.) et ses caractéristiques techniques (matérialité, surfaces de baies, équipement de chauffage, climatisation et ventilation, protections solaires, etc.).

La deuxième étape de GENIUS consiste à faire évoluer ces données dans le temps afin de tenir compte des différentes échelles temporelles impliquées dans toute étude pluridisciplinaire. Il ne s'agissait pas ici de proposer un nouveau modèle prospectif d'expansion urbaine puisqu'il en existait déjà de nombreux de grande qualité. Dans ce travail, nous avons fait le choix de coupler notre modèle à un modèle prospectif existant, SLEDUM, afin d'y apporter de la précision en terme de forme urbaine. Notre travail a donc consisté à faire une descente d'échelle à partir des données produites par SLEDUM. Pour cela, des mécanismes d'évolution urbaine ont été définis sur la base d'observations des évolutions passées (forecasting) et sur la base de scénarios prospectifs établis par consultation d'experts. En définitive, GENIUS diachronique fait évoluer pour chaque maille : les types de quartiers, leur morphologie et leurs caractéristiques techniques.

Il n'existait jusqu'à présent que très peu de bases de données urbaines contenant autant de détails. Par ailleurs, aucun modèle prospectif d'expansion urbaine ne permettait de simuler avec tant de précision la forme urbaine et les caractéristiques des bâtiments. En ce sens,

notre travail, généralisable à d'autres cas d'études, est **une contribution à la recherche en énergétique urbaine**. Ces bases de données multi-scalaires et multidisciplinaires capables d'évoluer dans le temps peuvent ainsi constituer les entrées de différents modèles d'énergétique urbaine. L'objectif de ces modèles est d'identifier des leviers d'action pour réduire les consommations énergétiques de la ville, y limiter l'effet d'ilot de chaleur urbain, favoriser la production d'énergie renouvelable, en bref : agir sur l'atténuation et l'adaptation au changement climatique. GENIUS peut donc également présenter un intérêt pour les professionnels de l'urbanisme.

Afin d'illustrer les diverses **applications** de notre modèle, nous avons présenté dans la dernière partie le cas de deux projets de recherche prospectifs et pluridisciplinaires ayant pour objet d'étude les interactions entre changement climatique et développement urbain : les **projets MUSCADE (ANR) et ACCLIMAT**. Il s'agit de deux projets de recherches portés par Météo-France qui visent à étudier, de nos jours à 2100, les interactions entre structure de ville, procédés constructifs, consommation d'énergie, production d'énergie décentralisée, microclimat urbain et changement climatique. Ces projets étudient le cas des agglomérations Parisienne (MUSCADE) et Toulousaine (ACCLIMAT) à l'échelle du siècle afin de tenir compte de l'inertie de la structure urbaine et du changement climatique.

L'une des principales étapes de ces projets a consisté à construire un jeu de sept scénarios combinant hypothèses climatiques, macroéconomiques, urbaines et techniques. Sur cette base, notre modèle, GENIUS, couplé au modèle prospectif d'expansion urbaine SLEDUM, a permis de traduire les sept scénarios en sept villes futures (soit des bases de données urbaines tous les dix ans jusqu'en 2100 pour chaque scénario). Par la suite, l'utilisation de la modélisation numérique a permis de produire des résultats caractéristiques des sept scénarios : consommations de chauffage, de climatisation, ilot de chaleur urbain estival, étalement urbain, taux de végétalisation, répartition des types de quartier, distances moyenne parcourue par les ménages, etc. Dans le cadre de ces projets, GENIUS a ainsi contribué aux échanges entre modèles et à la mise en place d'une méthode de recherche pluridisciplinaire sur l'énergétique urbaine.

Les analyses thématiques et multicritère des résultats d'ACCLIMAT et de MUSCADE ont permis d'asseoir un certain nombre de **conclusions scientifiques**.
D'une part, **l'importance d'une action rapide** de contrôle de l'étalement urbain, de maitrise des formes architecturales (compacité) et de rénovation volontariste a été mise en avant. Les projets ont par exemple montré que la mise en œuvre de ces politiques après 2040 pourrait n'avoir que très peu d'effet en raison de l'inertie de l'évolution de la ville.
Nous avons également pu conclure que densité bâtie et végétalisation de la ville sont compatibles. A l'inverse, promouvoir la libération des sols n'est pas systématiquement

synonyme de verdissement de la ville. **Il est donc primordial de mettre en œuvre des politiques de végétalisation spécifiques dans la ville.**
D'autre part, le réchauffement climatique associé à l'effet d'ilot de chaleur urbain conduit à une réduction des consommations énergétiques combinées de chauffage et de climatisation, même dans le scénario le plus défavorable. Si on ne considère que le critère énergétique, il serait donc inutile de combattre l'effet d'ilot de chaleur urbain et cette question pourrait être écartée de l'analyse du paradoxe énergétique urbain. Cependant, le confort et la santé des occupants ainsi que la biodiversité pourraient être mis en péril par des températures trop extrêmes.
Pour limiter simultanément l'ilot de chaleur urbain et les consommations énergétiques, nous avons également confirmé que des **formes urbaines compactes et denses intégrant des éléments végétaux suffisamment arrosés et associées à des enveloppes performantes** du point de vue énergétique constituaient des stratégies efficaces. Bien que ces conclusions ne soient pas nouvelles, elles apportent une contribution à la question du paradoxe énergétique urbain : densité et compacité urbaine raisonnées ne semblent pas incompatibles avec une atténuation de l'effet d'ilot de chaleur urbain.
Par ailleurs, bien qu'il soit possible de réduire les consommations énergétiques et les émissions de GES associées, nous avons montré qu'en l'absence d'**efforts supplémentaires sur la production d'énergies décarbonées**, le « facteur 4 » serait difficilement atteint en 2050.

Ce travail de recherche a investigué des domaines de connaissance distincts : énergie, climatologie urbaine, urbanisme, etc. et a proposé une méthode de génération de bases de données communes à ces différentes disciplines. Il s'inscrit ainsi dans un cadre pluridisciplinaire tendant à créer des passerelles entre des champs qui ont encore peu l'habitude de se côtoyer. GENIUS et ses applications dans différents projets de recherche ne closent pas la problématique des facteurs influençant l'énergétique urbaine. Ils ouvrent au contraire **plusieurs perspectives de recherche** sur ce sujet.

La première perspective est directement liée à la méthode de développement de GENIUS. La **typologie des quartiers** qui a été proposée et les caractéristiques techniques qui lui ont été associées ont été développées pour Paris et Toulouse. Cependant, elles pourraient être élargies à la France, voir au-delà, de manière à pouvoir tirer des conclusions relatives aux avantages et aux inconvénients de différentes configurations urbaines vis à vis de contextes climatiques particuliers. Cette typologie pourrait également s'appuyer sur un découpage plus organique de la ville, basé sur ses tracés de voiries et, de fait, plus susceptible d'être stable dans le temps.

En ce qui concerne **l'identification automatique des types de quartiers** nous avons mené nos analyses sur l'ensemble des quartiers, rendant le processus long et difficile à généraliser

à d'autres cas d'études. L'une des perspectives de notre méthode est d'explorer des procédés statistiques de classification supervisée. Celles-ci sont caractérisées par une phase d'apprentissage qui consiste à établir des règles à partir de connaissances disponibles a priori. La classification serait donc plus rapide et intégrerait des règles expertes issues de professionnels de l'urbanisme. Ces deux perspectives font l'objet du projet de recherche MApUCE présenté dans le chapitre 2.1 de la troisième partie.

Le présent développement de GENIUS a respecté les capacités et les limites de SLEDUM. L'utilisation d'autres modèles ouvrirait des perspectives d'**évolution des bases de données dans le temps**. Par ailleurs, une partie des perspectives concerne les évolutions morphologiques des bâtiments dans GENIUS. Qu'il s'agisse de les valider ou de les traduire en objets SIG tridimensionnels, cela permettrait de valoriser le modèle.

Les projets de recherche ACCLIMAT et MUSCADE sont également à l'origine de nombreuses perspectives, en particulier en ce qui concerne l'amélioration des modèles et la **prise en compte de nouveaux critères dans l'analyse pluridisciplinaire** : transport, énergie primaire totale des matériaux, énergies renouvelables, etc. sont autant de thématiques qui pourront venir compléter des modèles en constant développement. Le fait que nous n'ayons pas déjà pris en compte la totalité de ces critères ne nous autorise pas à trancher la question du paradoxe énergétique urbain. Cependant, la méthode mise en place et les bases de données générées par GENIUS permettent d'envisager une intégration progressive de ces problématiques afin d'améliorer notre compréhension de la ville, du climat et de l'énergie.

Par ailleurs, afin de faciliter la **compréhension et l'appropriation de ces résultats** par les décideurs urbains, deux pistes sont à explorer : celle de l'analyse multicritère et celle de l'étude de sensibilité. Comme on l'a vu, cette dernière fait l'objet d'un projet de recherche en cours, le projet EPICURE.

A ces perspectives, touchant principalement au domaine des sciences physiques, s'ajoutent la nécessité d'interroger d'autres domaines tels que la politique, la sociologie ou l'économie. En effet, la question de l'énergétique urbaine, pour être intégrée consciemment à la pratique de l'aménagement urbain, doit devenir un enjeu politique. Cela nécessite de comprendre comment se crée une nouvelle préoccupation, comment la traduire efficacement dans des outils règlementaires, comment elle risque d'impacter le quotidien des habitants etc. Si l'on se contente de penser la ville comme une machine thermique, le risque est que cela se fasse au détriment de la qualité urbaine et architecturale et de la qualité de vie des citadins. L'intégration progressive de disciplines telles que l'urbanisme, l'architecture et la sociologie présage cependant d'une **ouverture de la recherche en énergétique urbaine**.

Pour finir, comme dans toute étude prospective, les résultats des projets ACCLIMAT et MUSCADE ne peuvent être considérés comme des prévisions absolues. C'est uniquement la **comparaison de leurs performances relatives** qui aura un sens et permettra de contribuer à la recherche en énergétique urbaine.

Confronté à la nécessité de prendre dans l'urgence des décisions qui impacteront le futur de leur ville à long terme, les décideurs sont aujourd'hui en demande croissante de connaissances et d'outils pour identifier et prioriser des leviers d'actions sur l'énergétique urbaine. En ce sens, ce travail est une contribution à la recherche en énergétique urbaine mais également à ses applications pour les praticiens de l'urbanisme.

Glossaire

A

L'**adaptation** désigne les actions visant à réduire la vulnérabilité du territoire et à l'adapter aux évolutions du climat (sècheresse, inondations, canicules, …). L'adaptation vient en plus et non à la place de la réduction des émissions de GES (voir atténuation) (ADEME, 2013). On distingue deux type d'adaptation : l'adaptation spontanée et l'adaptation planifiée (Ministère du Développement durable et de l'Energie, 2013a). La première est une adaptation à une contrainte climatique par « une réponse immédiate et non réfléchie d'un point de vue stratégique ». La deuxième résulte de « décisions stratégiques délibérées, fondées sur une perception claire des conditions qui ont changé - ou qui sont sur le point de changer - et sur les mesures qu'il convient de prendre pour revenir, s'en tenir ou parvenir à la situation souhaitée ».

D'après l'INSEE, une **aire urbaine** est « un ensemble de communes, d'un seul tenant et sans enclave, constitué par un pôle urbain (unité urbaine) de plus de 10 000 emplois, et par des communes rurales ou unités urbaines (couronne périurbaine) dont au moins 40 % de la population résidente ayant un emploi travaille dans le pôle ou dans des communes attirées par celui-ci. » (INSEE, 2012).

L'**albédo** caractérise la capacité d'un matériau à réfléchir la lumière du soleil (y compris les longueurs d'onde visibles, infrarouges et ultraviolets). Une valeur de 0 indique que la surface absorbe tout le rayonnement solaire, et une valeur de 1 que la surface réfléchi tout le rayonnement solaire (United States Environmental Protection Agency, 2008).

Les **aménités urbaines** désignent l'ensemble des caractéristiques et des qualités qui contribuent à l'agrément, à l'harmonie et aux aspects culturels de l'environnement urbain (URBANET, 2001). Il peut s'agir de parcs, d'espaces publics, de commerces de proximité, de services, d'établissement d'enseignement ou de santé, d'infrastructures de transport en commun et de transports doux …

L'**atténuation** désigne les actions visant à limiter l'ampleur du changement climatique en réduisant les émissions directes et indirectes de GES. Cela passe notamment par la réduction des consommations d'énergie et l'utilisation significative de ressources renouvelables. La poursuite de cet objectif permet également de réduire les dépenses locales et d'assurer, pour les collectivités, la continuité du service public (ADEME, 2013).

B

Le **back-casting** est une méthode de prospective consistant à définir des objectifs à long terme (par exemple la réduction par 4 des émissions de gaz à effet de serre), puis, par «projection à rebours», à construire plusieurs scénarios contrastés permettant de les atteindre (Morice et al., 2004).

Les besoins énergétiques résultent du bilan énergétique effectué sur un bâtiment. Il s'agit des besoins de chauffage ou de climatisation ressentis par les usagers compte tenu des conditions climatiques (écarts entre les températures de confort et les températures extérieures), des caractéristiques constructives de l'habitat (isolation, inertie), des apports énergétiques gratuits (dus à l'ensoleillement, l'occupation du logement, les équipements, etc.). On les mesure en kWh (Raux, Traisnel, Nicolas, Maïzia, & Delvert, 2005). Voir consommation énergétique.

C

La **canopée urbaine** fait référence au couvert végétal dans un contexte urbain, élément central de l'atténuation de l'effet d'ilot de chaleur urbain. On distingue souvent le comportement thermique de la ville en dessous et au-dessus de la canopée pour une compréhension plus fine (United States Environmental Protection Agency, 2008).

Une rue **canyon** désigne une rue relativement étroite et encadrée de bâtiments relativement haut de part et d'autre (Robinson & Stone, 2004).

On dit qu'une variable est centrée-réduite lorsqu'on lui soustrait son espérance et qu'on la divise par son écart type. Une variable centrée réduite a une espérance nulle, une variance égale à 1 et un écart type égal à 1. Ainsi, les variables ont une même moyenne et une même dispersion et sont indépendantes de l'unité choisie. On peut alors comparer plus aisément leurs variations.

Le concept de **ceinture verte** désigne le fait de créer une zone tampon composée de terres agricoles ou de milieux naturels autour d'une ville. Les objectifs de ce type d'aménagement du territoire peuvent être divers : (1) permettre une production agricole à proximité de la ville, (2) préserver un patrimoine rural et ou écologique, (3) permettre l'accès à ces espaces « naturels » aux citadins (notamment à des fins récréatives), (4) bénéficier des effets de ces espaces verts sur le microclimat et la qualité de l'air et (5) limiter l'étalement urbain (Hamson, 1969).

Le **CES (Coefficient d'emprise au sol)** se défini comme l'emprise au sol des bâtiments sur une unité de surface au sol (Moulinié & Naudin-Adam, 2005b).

Une **conurbation** est « une agglomération formée par la réunion de plusieurs centres urbains initialement séparés par des espaces ruraux » (INSEE, 2012).

COS (coefficient d'occupation du sol) : voir densité.

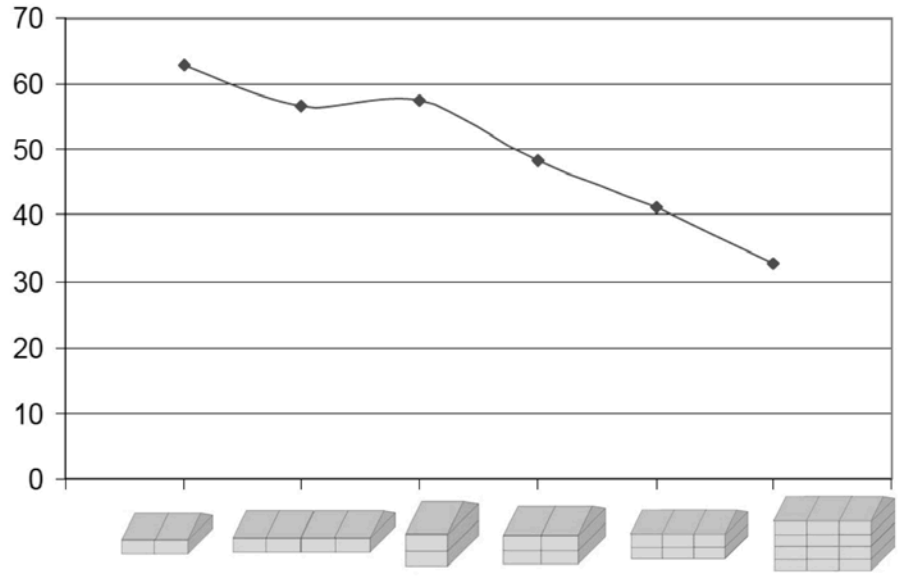
La **compacité** est un rapport entre la surface d'échange et le volume d'un bâtiment. Elle joue un rôle primordial dans le bilan thermique puisqu'elle permet, lorsqu'elle est assez faible, de réduire substantiellement les déperditions de chaleur par l'enveloppe. La compacité est liée à la forme du bâtiment et à son degré de contiguïté avec les bâtiments mitoyens : elle relève donc de propriétés de forme urbaine. Plusieurs définitions existent pour le coefficient de compacité.
Nous retiendrons la **compacité nette** qui se défini comme le rapport entre la surface d'enveloppe extérieure non contiguë du bâtiment, et son volume élevé à la puissance 2/3 (Raux et al., 2005). Cette formule à pour origine le calcul des déperditions au travers de l'enveloppe :

$$Déperdition = U_{moyen} \times Surface = Volume \times U_{moyen} \times \frac{1}{Volume^{1/3}} \times \frac{Surface}{Volume^{2/3}}$$

Les déperditions sont donc proportionnelles à trois termes :

- le coefficient de déperdition de l'enveloppe U_{moyen},
- le coefficient d'échelle $\frac{1}{Volume^{1/3}}$qui avantage les grands volumes,
- le coefficient de compacité $\frac{Surface}{Volume^{2/3}}$,

La **compacité brute** se calcule comme le rapport entre la surface d'enveloppe extérieure non contiguë du bâtiment et son volume (Salat, 2011a).
On retiendra également la **compacité utile** qui se défini comme le rapport entre la surface d'enveloppe extérieure non contiguë du bâtiment et sa surface de plancher (Adolphe et al., 2002).



Besoins énergétiques pour six configurations de logements (J.-P. Traisnel, 2006)

La contiguïté d'un bâtiment est caractérisée par le rapport de la surface verticale d'enveloppe adjacente à d'autres bâtiments à la surface d'enveloppe verticale donnant sur l'extérieur.
Pour un tissu urbain, la contiguïté moyenne sera obtenue en pondérant la valeur unitaire de contiguïté pour un bâtiment par sa surface de plancher, ce qui limitera l'effet des bâtiments de grande échelle (Adolphe et al., 2002).

Les consommations énergétiques correspondent à la quantité d'énergie utilisée par les divers équipements de chauffage et climatisation destinés à répondre aux besoins définis ci-dessus (Raux et al., 2005). Selon les cas, on prend également en compte les consommations des systèmes de chauffage de l'eau chaude sanitaire (ECS), de l'éclairage, de la ventilation mécanique, des auxiliaires, ainsi que les consommations d'électricité spécifique (équipements électroménager, bureautique…). On les mesure en kWh d'énergie primaire ou finale.

D

Les **densités urbaines désignent l'ensemble des densités caractérisant la forme urbaine. Celles-ci sont détaillées ci-après.**

La densité est le rapport entre un indicateur statistique (population, logement, surface,…) et une surface (P. Merlin & Choay, 1988). On distinguera principalement la densité construite et la densité humaine.

La **densité de population** désigne usuellement un nombre d'habitant par unité de surface au sol (généralement un quartier, une ville ou au-delà). Cela présente cependant l'inconvénient de ne pas rendre compte des portions de villes occupées par des bâtiments autres que résidentiels. Il arrive donc que l'on complète la densité de population avec la densité d'emplois ou d'entreprises. On peut alors calculer la densité d'activité humaine qui correspond à la somme de la densité de population et de la densité d'emploi (Moulinié & Naudin-Adam, 2005b).

La **densité construite** ou **densité bâtie** correspond au rapport de la surface de plancher construite à la surface au sol. Ainsi, la densité n'exprime pas la même réalité selon l'échelle considérée.

- A L'échelle du quartier, la densité permet de mesurer la relation espace privé / espace public (**densité brute**).
- A l'échelle de l'ilot, le périmètre est limité par l'espace public, la densité caractérise donc plus la morphologie urbaine (**densité nette**).
- A l'échelle de la parcelle, on parle de **coefficient d'occupation du sol** (COS). Cet indicateur est celui des règlements d'urbanismes. Il est notamment utilisé dans les plans locaux d'urbanisme pour définir un «droit à bâtir» maximal sur une parcelle.

Notons cependant que des formes urbaines très différentes peuvent avoir des densités comparables, la densité doit donc être évaluée en même temps que d'autres critères (coefficient d'emprise au sol, hauteur des bâtiments). (Moulinié & Naudin-Adam, 2005a, 2005b)

La **distance euclidienne** est une notion mathématique permettant de caractériser la proximité de deux individus statistiques. Lorsque ces individus sont caractérisés par p variables, on peut calculer leur distance euclidienne dans un espace à p dimensions par analogie à la distance géométrique dans le plan (Morgenthaler, 2007). Par exemple, si on considère les individus a et b caractérisés par les variables x_1 , x_2, … x_p, leur distance euclidienne est :

$$d(a,b) = \sqrt{(x_{a1} - x_{b1})^2 + (x_{a2} - x_{b2})^2 + \cdots + \left(x_{ap} - x_{bp}\right)^2}$$

Une **division cadastrale** est une appellation propre à la base de données de l'IGN (BD PARCELLAIRE). Elle correspond à « une section cadastrale quand celle-ci ne comporte pas de subdivision et à une subdivision de section cadastrale quand la section comporte plusieurs subdivisions. Les Divisions cadastrales d'une commune forment une partition de cette commune » (IGN, 2012a).

Dominance d'une solution : Dans le cadre d'une recherche multi-objectifs, on cherche à optimiser une fonction suivant plusieurs critères, dont certains peuvent d'ailleurs être antagonistes (par exemple les consommations de chauffage et le confort d'été). On définit alors la notion de dominance : on dit qu'un individu *A* domine un individu *B* si, quelque soit le critère considéré le point *A* est plus performant que le point *B* (voir figure ci-après). Une courbe ou une surface de Pareto est l'ensemble des solutions non dominées. Tout point de la courbe de Pareto est donc optimal dans la mesure où on ne peut améliorer la valeur d'un critère pour ce point sans diminuer la valeur d'au moins un autre critère.

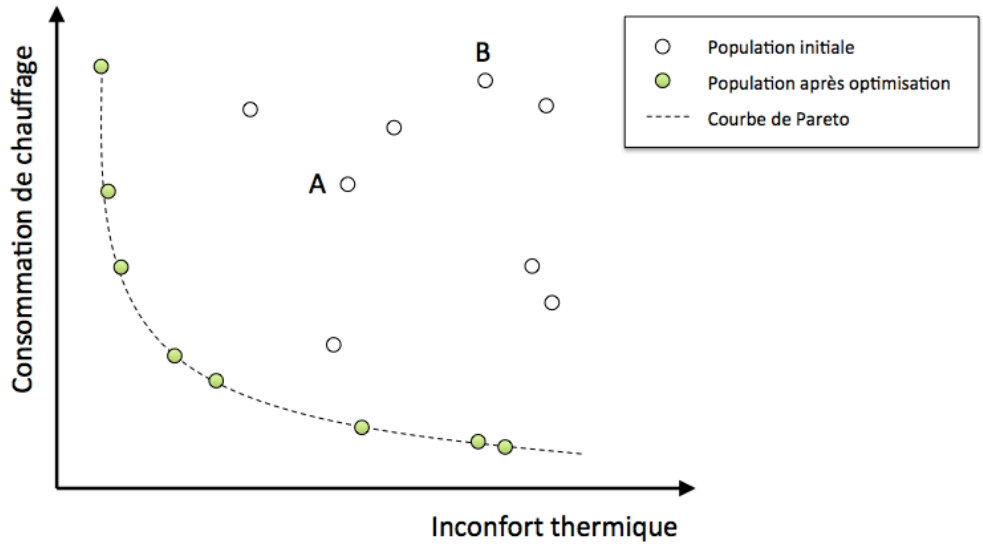


Figure 159 : Exemple de courbe de Pareto

E

L'écart type est une notion mathématique qui peut être appliquée à la statistique et qui permet de caractériser la dispersion de données. Il est défini comme la racine carrée de la variance (Saporta, 2011).
La variance elle-même se définie comme l'espérance des carrés des écarts à l'espérance.
Si on considère une variable x calculée pour n individus statistiques, son écart type se calculera donc de la manière suivante :

$$\sigma_x = Ecart\ type\ de\ x = \sqrt{\frac{\sum_{n\ individus}\left(x_{moyen} - x_n\right)^2}{Nombre\ d'individus - 1}}$$

L'**énergétique urbaine** (Maïzia, 2007a) est un terme issu de l'énergétique c'est à dire l'ensemble des sciences et techniques de la production de l'énergie, de ses emplois et des

conversion de ses différentes formes (Larousse 2010). A l'échelle urbaine, l'énergétique désigne donc :

- la production de l'énergie,
- sa consommation par les bâtiments, les transports, les procédés industriels, l'éclairage public, les matériaux de construction, etc.
- sa transformation en chaleurs au travers de ces différents procédés et les impacts de ce processus sur le confort à l'intérieur des bâtiments,
- son interaction avec le climat (microclimat urbain), les impacts de ce processus sur le confort à l'extérieur des bâtiments et les rétroactions de ce processus sur les éléments cité précédemment.

L'**énergie décentralisée** ou énergie répartie est un concept apparu à la fin des années 1990 aux Etats-Unis. Énergie répartie est la traduction littérale de Distributed Energy, qui désigne une nouvelle façon de fournir, de stocker, de distribuer et d'utiliser l'énergie. Il s'agit de développer localement un ensemble de modes de production d'énergies cohérents, diversifiés et optimisés pour réduire les émissions polluantes et rendre fiables et disponibles les énergies au niveau local. Le développement des énergies décentralisées passe par la mise en place d'un réseau spécifique ou « réseau intelligent ».

L'**énergie grise** désigne en général l'énergie nécessaire à l'élaboration d'un produit. On préfèrera parler **d'énergie procédé** (énergie consommée par les procédés de transformation, de transport, …) et **d'énergie matière** (énergie contenue dans la matière qui correspond à une mobilisation d'une matière première avec un pouvoir calorifique) (Cornillier & Vial, 2008). **L'énergie primaire totale** d'un produit, définie par la norme NF P01-010, relative au format de communication des données environnementales et sanitaires des produits de construction, est égale à l'addition des énergies matière et procédé (AFNOR, 2004).

L'**énergie finale** est l'énergie délivrée aux consommateurs pour être convertie en énergie utile : électricité, essence, gaz, gazole, fioul domestique. La règlementation thermique actuelle (RT2005) propose, pour l'électricité, un facteur de conversion de 2,58 entre l'énergie finale et l'énergie primaire. Pour les autres énergies on considère un facteur égal à 1.

L'**énergie primaire** est la première forme de l'énergie directement disponible dans la nature (bois, charbon, gaz naturel, pétrole, vent, rayonnement solaire, énergie hydraulique, géothermique…). L'énergie primaire n'est pas toujours directement utilisable et fait donc l'objet de transformations : raffinage du pétrole pour avoir de l'essence ou du gazole; combustion du charbon pour produire de l'électricité dans une centrale thermique...

L'**énergie renouvelable** comptabilise les énergies qui sont créées à partir d'une ressource considérée comme renouvelable et dont la mise en œuvre n'entraîne en aucune façon l'extinction de la ressource initiale. Sont donc prises en compte les ressources qui sont cultivées, renouvelées ou régénérées à une vitesse supérieure à celle de son épuisement (solaire, éolienne, biomasse, géothermie, hydraulique...). Cette énergie est produite localement mais peut être réinjectée dans le réseau ou stockée, distribuée et consommée localement.

L'**étalement urbain** « représente le phénomène d'expansion géographique des aires urbaines par l'implantation en périphérie, au détriment de larges zones principalement agricoles, de types d'habitat peu denses (banlieues pavillonnaires, maisons individuelles). Cette dilatation de l'espace urbain se traduit par une diminution de la densité des zones urbanisées du fait d'une extension géographique plus rapide que la croissance démographique. En d'autres termes, l'étalement urbain décrit le fait que les villes croissent en surface et que le territoire s'artificialise à un rythme beaucoup plus important que ne l'imposerait le seul facteur démographique. Ce phénomène peut s'accompagner d'un dépeuplement concomitant des centres villes, autant en termes d'habitations que d'activités. […] L'étalement urbain est une forme de croissance urbaine mais il ne doit pas être confondu avec celle-ci : la croissance urbaine peut se réaliser sans nécessairement augmenter la surface de l'aire urbaine, par redensification du tissu urbain existant. » (Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie, 2010)

L'**évapotranspiration** est la somme de la transpiration végétale et de l'évaporation directe à partir des surfaces d'eau libre et des sols nus et (A. Musy, 2005)

F

Le **forecasting** est une méthode de prospective consistant à définir un scénario de référence (par prolongement de tendances passées ou par assertion de certaines évolutions en cours), ainsi que plusieurs scénarios contrastés (construits en supposant des ruptures volontaristes ou contraintes), puis à déduire de leur comparaison des interprétations sur les futurs possibles et les stratégies envisageables (Morice et al., 2004).

Le **facteur de vue du ciel** correspond à la portion de ciel observable à partir de la surface considérée selon une projection stéréographique. Ce facteur varie entre 0 et 1 (1 correspondant au cas d'une surface plane sans obstacle). (Adolphe et al., 2002).

La **forme urbaine** ou morphologie urbaine est une notion complexe. D'après le dictionnaire de l'urbanisme et de l'aménagement (P. Merlin & Choay, 1988), parler de morphologie

urbaine suppose la reconnaissance d'une « architecture urbaine, spécifique à la ville ». Il s'agit ici de la répartition de bâtiments privés ou public et d'espaces libres : rues, places, parc, jardins, …
On retiendra dans ce travail la définition de la morphologie urbaine au sens de la forme physique de l'objet urbain construit (bâti et non bâti). On notera cependant que cet objet n'est constant ni dans l'espace ni dans le temps. En effet, la forme de la ville se présente avec une dimension historique, résultat de son évolution dans le temps. De plus, la ville est le résultat d'une juxtaposition de formes urbaines hétéroclites.

G

La **gentrification** désigne la tendance à l'embourgeoisement d'un quartier populaire (Larousse, 2009).

Les GES ou gaz à effet de serre sont contenus naturellement dans la basse atmosphère terrestre. Ils permettent de retenir une partie de la chaleur apportée par le rayonnement solaire, condition nécessaire à la vie sur terre telle que nous la connaissons. Or, les GES ont atteint au cours de la dernière décennie des niveaux de concentration jamais enregistrés. Le recours aux énergies fossiles (gaz naturel, pétrole, charbon) dans l'industrie, les transports, le résidentiel – tertiaire depuis le milieu du 19ème siècle explique en partie cette évolution.
On compte six GES principaux : le dioxyde de carbone (CO2), le méthane (CH4), le protoxyde d'azote (N2O) et les gaz fluorés (HFC, PFC et SF6). L'AFNOR a donc défini un facteur « contribution au changement climatique » qui prend en compte l'ensemble des émissions atmosphériques participant au phénomène d'effet de serre. Cet indice est exprimé en kg équivalent CO_2 qui est la référence d'agrégation des autres gaz qui n'ont pas le même effet. Par exemple, 1kg de CH_4 (méthane) participe 21 fois plus à l'effet de serre qu'1kg de CO_2. De même, 1kg de N_2O (protoxyde d'azote, 310 fois plus qu'1 kg de CO_2) (ADEME, 2013; AFNOR, 2004).

I

L'effet d'**ilot de chaleur urbain** désigne une augmentation de la température de l'air en ville par rapport au milieu rural proche (Oke, 1987).

Un **ilot urbain** désigne un bâtiment ou un ensemble de bâtiments séparés du reste de la ville par des espaces publics (routes, trottoirs, places publiques, …) (Panerai et al., 1999).

Un **indicateur** est un outil permettant d'évaluer une situation, un phénomène, un objet ou un ensemble statistique. Il peut être quantitatif ou qualitatif, objectif ou subjectif. Les indicateurs sont souvent utilisés pour l'aide à la décision (Council of Europe, 2005).

Les **IRIS** (Ilots Regroupés pour l'Information Statistique) sont un découpage du territoire en mailles de taille homogène servant à diffuser les statistique de l'INSEE. La taille visée des IRIS est de 2 000 habitants par maille élémentaire. « Les communes d'au moins 10 000 habitants et une forte proportion des communes de 5 000 à 10 000 habitants sont découpées en IRIS. Ce découpage constitue une partition de leur territoire. […] Par extension, afin de couvrir l'ensemble du territoire, on assimile à un IRIS chacune des communes non découpées en IRIS. » (INSEE, 2012). Les contours des IRIS sont diffusés par l'IGN.

M

La **métropolisation** est une croissance de population organisée autour des villes (Ascher, 2010). La métropole se distingue de la ville classique par le fait que la limite entre urbain et rural y est moins présente. Il se forme ainsi de vastes espaces urbanisés mais discontinus, intégrant dans un même ensemble de la ville dense, du bourg, du néo-rural, …

Un **microclimat** désigne un climat dans une petite aire et qui varie significativement du climat global de la région. Les microclimats peuvent être d'origine naturelle ou humaine. Voir ilot de chaleur urbain (United States Environmental Protection Agency, 2008).

Le phénomène de **mitage** désigne une multiplication des résidences dans un espace rural (Larousse, 2009).

La **mobilité locale** est défini par l'INSEE comme les « déplacements des personnes de 6 ans ou plus, faits à l'occasion d'activités situées dans un rayon de 80 km à vol d'oiseau autour du domicile et sur le territoire national » (Commissariat général au développement durable, 2010). Elle concerne donc majoritairement les déplacements domicile/travail (week-end ou vacances).

La **mobilité longue distance** est défini par l'INSEE comme les « déplacements des personnes de 6 ans ou plus, faits à l'occasion d'activités situées dans un rayon de plus de 80 km à vol d'oiseau autour du domicile » (Commissariat général au développement durable, 2010). Elle concerne donc majoritairement les déplacements de loisirs (week-end ou vacances).

La **mobilité quotidienne** désigne le nombre de déplacements réalisés par jour et par personne (Commissariat général au développement durable, 2010).

Morphologie urbaine : voir forme urbaine.

P

Le terme de **paramètre** désigne une grandeur mesurable destinée à caractériser une situation, un phénomène, un objet ou un ensemble statistique (Larousse, 2009).

D'après l'INSEE, un **pôle urbain** est « une unité urbaine offrant au moins 10 000 emplois et qui n'est pas située dans la couronne d'un autre pôle urbain » (INSEE, 2012).

La **paupérisation** est un phénomène social par lequel des groupes sociaux ou des quartiers se trouvent plongés dans une situation d'appauvrissement de plus en plus profond (Larousse, 2009)

La **prospective** est d'après le dictionnaire Larousse une science « ayant pour objet l'étude des causes techniques, scientifiques, économiques et sociales qui accélèrent l'évolution du monde moderne, et la prévision des situations qui pourraient découler de leurs influences conjuguées ». Même si cette définition nous donne une idée simple de ce que peut être la prospective, il semble nécessaire de préciser que d'après Michel Godet, la perspective se distingue justement de la prévision par « un postulat de liberté face à des avenir multiples et indéterminés » (Godet, 2007a). On pourra donc résumer ainsi la définition de la prospective : une science qui étudie les évolutions possibles du monde, leurs causes et leurs conséquences.

Le **prospect** correspond au rapport entre la hauteur des bâtiments et la distance qui les sépare. (Adolphe et al., 2002).

Périurbanisation : voir métropolisation. Désigne une urbanisation diffuse et sans continuité du bâti, observable dans les zones rurales entourant les centres urbains.

R

Le réseau intelligent est la traduction de l'anglais « smart grid ». Il s'agit d'un réseau de distribution de l'énergie caractérisé par un flux bidirectionnel d'électricité et d'informations. Le réseau intelligent doit être capable de contrôler et commander les installations de production, de stockage et d'utilisation de l'énergie. Ainsi, il peut permettre de récupérer des informations sur l'usage que les particuliers, entreprises et administrations font de leurs

équipements (chauffage, ECS…) et d'optimiser les systèmes de production et de stockage en conséquence.
Utilisant les technologies des réseaux informatiques, le smart grid gère des informations en temps réel pour permettre l'équilibre quasi-instantané de l'offre et la demande (U.S. Department of Energy, 2008)

S

Un logiciel **SIG** (Système d'Information Géographique) est un système informatique de matériels, logiciels, données et workflows permettant de collecter, stocker, analyser et diffuser des informations géographiques. Les logiciels SIG représentent généralement des informations sur les cartes sous la forme de couches de données utilisées pour l'analyse et la visualisation.

La captation **solaire passive** désigne la captation du rayonnement solaire par des procédés architecturaux ne nécessitant pas d'apports énergétiques complémentaires. Cela suppose une conception des bâtiments permettant d'utiliser le rayonnement solaire pour l'éclairage naturel, le chauffage des locaux et/ou la climatisation les locaux. Le solaire passif s'oppose au solaire actif qui désigne les panneaux solaires thermiques ou photovoltaïques.

T

L'expression de **tache urbaine**, bien que très répandue, ne possède pas de véritable définition. Elle désigne en général la portion de territoire occupée par une ville. D'une étude à l'autre, ce qui définit la ville ou le territoire artificialisé peut varier. Dans le cadre d'une étude commandé par le CERTU et réalisée par le CET de Lyon, il a par exemple été choisi de définir la tache urbain comme les espaces artificialisés de la base de données Corine Land Cover (CERTU & CETE de Lyon, 2005).

L'expression **tissu urbain** assimile les cellules construites et les vides d'un milieu urbain à l'entrelacement des fils d'un textile (P. Merlin & Choay, 1988). Elle désigne donc l'ensemble des éléments physiques qui contribuent à la forme urbaine : le réseau viaire, la division parcellaire, le rapport entre les espaces bâtis et non bâtis, la dimension, la forme et le style des bâtiments ainsi que les rapports qui relient ces éléments. Le tissu urbain est très lié à l'histoire de la ville (héritage des structures antérieures).

Les **transports doux** désignent des modes de transport actif**,** non motorisés comme la marche, mais pouvant être mécanisés comme le vélo, les rollers, la planche à roulettes, les poussettes, etc.

Le terme de **typologie urbaine** renvoie à plusieurs définitions. Il désigne de façon générale un élément représentatif d'une classe d'individus ou un « schéma général de structure » (P. Merlin & Choay, 1988). Le classement typologique écarte donc les individus non représentatifs pour constituer une abstraction rendant compte de la réalité.
La typologie est donc établie selon un certain nombre de critères. En urbanisme ces critères peuvent relever des groupes sociaux, de l'usage, de la morphologie… Dans ce dernier cas la morphologie et la typologie peuvent être articulées par une analyse historique ou par une analyse selon des invariants formels (hauteur, densité,…).

U

D'après l'INSEE, une **unité urbaine** est « 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 habitants » (INSEE, 2012).

L'indice de confort **UTCI (Universal Thermal Climate Index)** a récemment été développé par un organisme de coopération scientifique (COST Action 730) afin d'évaluer le confort extérieur. L'UTCI est défini par une température de référence qui provoquerait la même sensation de confort (ou d'inconfort) thermique que l'environnement concerné. L'environnement de référence est défini avec une humidité relative de 50%, sans mouvement d'air et une température radiante égale à la température de l'air. La sensation de confort thermique est évaluée au travers d'un modèle complexe, le modèle de thermorégulation multi-nodal de Fiala (Fiala, Havenith, Bröde, Kampmann, & Jendritzky, 2012), simplifié à une équation d'ordre 6 (Bröde et al., 2009).

V

Une **variable** désigne un éléments qui peut prendre des valeurs différentes à l'intérieur d'un ensemble, d'un système, d'une relation (Larousse, 2009).

Le **volume passif** correspond à la portion du bâtiment pouvant être éclairé et ventilé naturellement. On calcule cet indicateur simplifié comme le volume situé au niveau des façades extérieures sur une épaisseur située à moins de deux fois la hauteur sous plafond (Baker & Steemers, 2004; Salat, 2011a).

Bibliographie

Abdelli, A. (2007). *Optimisation multicritère d'une chaîne éolienne passive*. Institut National Polytechnique de Toulouse-INPT. Consulté à l'adresse http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00553540/

ADEME. (2002, avril). Eau Chaude Solaire - Manuel pour la conception, le dimensionnement et la réalisation des installations collectives.

ADEME. (2006, juin). Synthèse des exposés et débats de la journée d'étude : « Inscription de critères environnementaux dans les documents d'urbanisme et dans les documents contractuels des opérations d'aménagement ».

ADEME. (2013). Centre de ressources pour les Plans Climat-Energie Territoriaux. Consulté 21 juin 2013, à l'adresse http://www.pcet-ademe.fr/

Adolphe, L. (2001). A simplified model of urban morphology: application to an analysis of the environmental performance of cities. *Environment and Planning B*, *28*(2), 183–200. doi:10.1068/b2631

Adolphe, L. (2003). Morphologic, a GIS devoted to the analysis of microclimate of outdoor urban spaces. In *EGS-AGU-EUG Joint Assembly* (Vol. 1, p. 226). Consulté à l'adresse http://adsabs.harvard.edu/abs/2003EAEJA.....226A

Adolphe, L., Bonhomme, M., Dubois, C., & Martins, T. (2013). Integrating sustainable development in the modelling process of urban projects. *Article à publier*.

Adolphe, L., Châtelet, A., Boussoualim, Aït-Ameur, Barlet, Casal, … Deboulbé, E. (2002). *SAGACités Vers un Système d'Aide à la Gestion des Ambiances urbaines - RAPPORT FINAL* (MENRT- Direction de la Technologie.).

AFNOR. (2004). NF P01-010 Qualité environnementale des produits de construction - Déclaration environnementale et sanitaire des produits de construction.

Agence d'Urbanisme de l'Agglomération Nantaise. (2005). Quartier de ville, Quartier de vie - Habitat et formes urbaines".

Aguiléra, A., Madre, J.-L., & Mignot, D. (2004). Métropolisation, formes urbaines et mobilité. Présentation du dossier. *Cahiers scientifiques du transport (Les)*, (45). Consulté à l'adresse http://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00068411/

Alexander, P. J. (2012). Empirical and modelled relationships between urban classification and urban climate. In *Proceedings of ICUC8 Dublin*. Dublin.

Allen, P. M. (1997). *Cities and regions as self-organizing systems: models of complexity*. Routledge. Consulté à l'adresse

http://books.google.fr/books?hl=fr&lr=&id=LhV3r3tC6oMC&oi=fnd&pg=PR9&dq=allen+cities+and+regions&ots=oHfDaXzpjh&sig=HECxunLwvXSX4qxtp0lXTU7A7E4

Alonso, W. (1964). Location and land use. Toward a general theory of land rent. *Location and land use. Toward a general theory of land rent.* Consulté à l'adresse http://www.cabdirect.org/abstracts/19641802976.html

Alzoubi, H. H., & Alshboul, A. A. (2010). Low energy architecture and solar rights: Restructuring urban regulations, view from Jordan. *Renewable Energy*, *35*(2), 333‑342. doi:10.1016/j.renene.2009.06.017

Amati, M., & Taylor, L. (2010). From Green Belts to Green Infrastructure. *Planning Practice and Research*, *25*(2), 143‑155. doi:10.1080/02697451003740122

Arantes, L., Baverel, O., & Quenard, D. (2012). A morpho-energetic optimization tool for a low energy and density reasoned city area. In *Cities in Transformation, Research and Design*. Milan, Italie.

Arantes, L., Baverel, O., Rollet, P., & Quenard, D. (2011). A simple method to consider energy balance in the architectural design of residential buildings. In *Proceedings of the 2011 Symposium on Simulation for Architecture and Urban Design* (p. 76–83). Consulté à l'adresse http://dl.acm.org/citation.cfm?id=2048546

Arantes, L., Rollet, P., Baverel, O., & Quenard, D. (2010). For a rationalized refurbishment of the 1960s-70s towers: the Core-Skin-Shell concept. *The Sustainable World*, *142*, 275.

ARCCCN. (2013, mai). ARCADIA: Adaptation and Resilience in Cities: Analysis and Decision making using Integrated Assessment. *Site internet de l'ARCC CN (Adaptation and Resilience to a Changing Climate Coordination Network)*. Consulté 5 juillet 2013, à l'adresse http://www.arcc-cn.org.uk/project-summaries/arcadia/

Ascher, F. (2010). *Les nouveaux compromis urbains: Lexique de la ville plurielle*. Editions de l'Aube.

ASPECT. (2012). Site internet du projet ANR Aspect 2050. Consulté 7 septembre 2013, à l'adresse http://www.aspect2050.fr/projet

Assassin, S. (2013, avril). *Prise en compte du climat dans l'aménagement urbain du centre ancien de Foix*. Journée Climat et aménagement de la DREAL.

Atelier Parisien d'URbanisme. (2007). *Consommations d'énergie et émissions de gaz à effet de serre liées au chauffage des résidences principales parisiennes (Energy consumption and greenhouse gas emissions related to heating of Parisian housing)*. APUR. Consulté à l'adresse http://www.apur.org/sites/default/files/documents/246.pdf

AUCAME. (2010). *Répertoire des formes urbaines résidentielles de Caen-Métropole (Inventory of residential urban forms of Caen)*. Agence d'étude d'Urbanisme de Caen-Métropole.

Augiseau, V. (2012). Quelles relations entre formes urbaines et énergie ? In *Etat de l'art en Europe: apports et limites des Plans Climat-Energie Territoriaux à l'aune des connaissances scientifiques* (Vol. 2, p. 102). Consulté à l'adresse http://www.aspect2050.fr/files/ASPECT_Etat-art_T1.pdf

Bailey, K. D. (1994). *Typologies and Taxonomies: An Introduction to Classification Techniques*. SAGE.

Baker, N., & Steemers, K. (2004). *Energy and environment in architecture: a technical design guide*. Taylor & Francis. Consulté à l'adresse http://books.google.fr/books?hl=fr&lr=&id=VU3bvo4ZLukC&oi=fnd&pg=PA1&dq=N.+Baker,+K.+Steemers++Energy+and+Environment+in+Architecture&ots=Rga4rYOAwj&sig=tPq6R8-oYLinRr05S60rjgqQTEc

Ball, G. H., & Hall, D. J. (1965). *ISODATA, a novel method of data analysis and pattern classification*. DTIC Document. Consulté à l'adresse http://oai.dtic.mil/oai/oai?verb=getRecord&metadataPrefix=html&identifier=AD0699616

Banham, R. (1984). *Architecture of the Well-Tempered Environment*. University of Chicago Press.

Banos, A., & Sanders, L. (2012). Vers une cartographie sémantique des modèles urbains : des individus aux systèmes de villes. In *Modelisation urbaine : de la représentation au projet*. Paris: Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie.

Batty, M. (2008). How tall can we go? How compact can we get? The real questions of urban sustainability. *Environment and Planning B: Planning and Design*, *35*(1), 1‑2. doi:10.1068/b3501ed

Batty, M., & Longley, P. A. (1994). *Fractal cities: a geometry of form and function*. Academic Press. Consulté à l'adresse http://discovery.ucl.ac.uk/1370661/

Bauquis, P.-R. (2004). Quelles energies pour les transports au XXIe siecle? *Les cahiers de*. Consulté à l'adresse http://www.ifpenergiesnouvelles.fr/content/download/68879/1489789/version/7/file/ECO55_BAUQUIS_JAN_2004.pdf

Bechtel, B. (2012). Classification of local climate zone from multitemporal remote sensing data. In *Proceedings of ICUC8 Dublin*. Dublin.

Berghauser-Pont, I., & Haupt, P. (2007). The Spacemate: density and the typomorphology of the urban fabric. *Urbanism laboratory for cities and regions: progress of research issues in urbanism*. Consulté à l'adresse

http://books.google.fr/books?hl=fr&lr=&id=NGnDm7c5xngC&oi=fnd&pg=PA11&dq=berghauser+pont+haupt+the+spacemate&ots=-PfsyTfw3F&sig=HvWHGoYBVHm1ww6ghjq2YTp4s04

Bertaud, A. (2004). The spatial organization of cities: deliberate outcome or unforeseen consequence? Consulté à l'adresse http://escholarship.org/uc/item/5vb4w9wb.pdf

Bertaud, A., & Malpezzi, S. (2003). The spatial distribution of population in 48 world cities: Implications for economies in transition. *Rapport, World Bank*. Consulté à l'adresse http://ww.bus.wisc.edu/realestate/documents/Complete%20Spatial%20Distribution%20of%20Population%20in%2050%20World%20Ci.pdf

Boarnet, M. G., & Crane, R. (2001). *Travel by design: The influence of urban form on travel*. Oxford University Press, USA. Consulté à l'adresse http://books.google.fr/books?hl=fr&lr=&id=f7EtoDfL6yYC&oi=fnd&pg=PA1&dq=Boarnet+M,+Crane+R.+Travel+by+design.+The+influence+of+urban+form+on+travel&ots=coMRhmLooY&sig=FV44JqQ7zT7gSy-N1qKWlfO0HUg

Bocher, E., & Petit, G. (2012). OrbisGIS: Geographical Information System designed by and for research. *Innovative Software Development in GIS*, 23–66.

Bourbia, F., & Awbi, H. . (2004). Building cluster and shading in urban canyon for hot dry climate. *Renewable Energy*, *29*(2), 291‑301. doi:10.1016/S0960-1481(03)00171-X

Bourges, B. (1991). *European simplified methods for active solar system design*. Kluwer Academic Publishers.

Breheny, M. (1995). The compact city and transport energy consumption. *Transactions of the Institute of British Geographers*, 81–101.

Bröde, P., Fiala, D., Blazejczyk, K., Epstein, Y., Holmér, I., Jendritzky, G., … Shitzer, A. (2009). Calculating UTCI equivalent temperature. *Environmental Ergonomics XIII, University of Wollongong, Wollongong*, 49–53.

Brownstone, D., & Golob, T. F. (2009). The impact of residential density on vehicle usage and energy consumption. *Journal of Urban Economics*, *65*(1), 91–98.

Bruse, M. (1999). Simulating microscale climate interactions in complex terrain with a high-resolution numerical model: a case study for the Sydney CBD area. In *Proceedings International Conference on Urban Climatology & International Congress of Biometeorology, Sydney, Australia* (p. 8–12). Consulté à l'adresse http://envi-met.net/documents/papers/CBDSimu1999.PDF

Bueno, B., Norford, L., Pigeon, G., & Britter, R. (2011). Combining a detailed building energy model with a physically-based urban canopy model. *Boundary-layer meteorology*, *140*(3), 471–489.

Bureau d'études AXENNE. (2007). DIAGNOSTIC ENERGIES RENOUVELABLES DU TERRITOIRE DE L'AGGLOMERATION LYONNAISE A FIN 2006, ET ETUDE DU POTENTIEL A L'HORIZON 2020. Grand Lyon Communauté Urbaine.

Bureau d'études Explicit. (2011). Plan Climat de Sénart - Identification des potentiels de maîtrise de l'énergie et de développement des énergies renouvelables. Consulté 21 novembre 2012, à l'adresse http://www.senart.com/environnement/plan-climat/le-profil-climat-de-senart/gisements-et-potentiels

Bureau d'études Futur Facteur 4, Bureau d'étude CRP Consulting, Bureau d'études Écologie Urbaine, Bureau d'études Énergies Demain, & Bureau d'études Anewworld. (2012). Plan climat - Le Plan d'actions de la Communauté urbaine du Grand Toulouse et de la Ville de Toulouse.

Butera, F. (2011). Towards the renewable built environment. *Urban Energy Transition: From Fossil Fuels to Renewable Power*, *10*, 329.

Cabinet de conseil Utopies. (2007). Entreprises & Construction Durable. Consulté 6 septembre 2013, à l'adresse http://www.constructiondurable.com/pages/batimentdurable.php?id=62

Cace, J., ter Horst, E., Syngellakis, K., Niel, M., Clement, P., Heppener, R., & Peirano, E. (2007). *Urban wind turbines - Guidlines for small wind turbines in the built environment* (p. 1–41). Consulté à l'adresse http://urban-wind.org/pdf/SMALL_WIND_TURBINES_GUIDE_final.pdf

Campbell, N., Stankovic, S., Graham, M., Parkin, P., van Duijvendijk, M., de Gruiter, T., … Blanch, M. (2001). Wind Energy For The Built Environment (Project Web)". *A report for Joule III Contract No JOR3-CT98-01270*. Consulté à l'adresse http://www.bdsp.com/web/pdfs/project%20web%20summary%20(2002).pdf

Capeluto, I. G., & Shaviv, E. (2001). On the use of 'solar volume'for determining the urban fabric. *Solar Energy*, *70*(3), 275–280.

Carpentier, F. G. (2012). *Analyse multidimensionnelle des données*. GEAI Université de Brest.

Castello, M. (2004). *La géothermie*. ADEME & BRGM. Consulté à l'adresse http://www.google.fr/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CCQQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.brgm.fr%2Fbrgm%2Fgeothermie%2Ffichiers%2Fenjeux_GTH_num002.pdf&ei=8dmsUNryDLSV0QXMnIDYAQ&usg=AFQjCNGrFFojSUrmxt2s_KWrkKZh2VoUAg&sig2=Izx08aCVb6uUvYngqQ7BKw

Cayla, J.-M., Allibe, B., & Laurent, M.-H. (2010). From practices to behaviors: Estimating the impact of household behavior on space heating energy consumption. In *ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings*. Consulté à l'adresse http://hal.cirad.fr/hal-00509187/

CERMA. (1999). AUDIENCE - Projet Européen de formation des architectes à la maitrise des ambiances. Consulté 27 août 2013, à l'adresse http://audience.cerma.archi.fr/

CERTU, & CETE de Lyon. (2005). *Les bases de données géographiques d'occupation du sol : volet tache urbaine - Descriptif et comparatif de 6 bases de données*.

Cervero, R., & Wu, K.-L. (1997). Polycentrism, commuting, and residential location in the San Francisco Bay area. *Environment and Planning A*, *29*(5), 865–886.

Chance, T. (2009). Towards sustainable residential communities; the Beddington Zero Energy Development (BedZED) and beyond. *Environment and Urbanization*, *21*(2), 527‑544. doi:10.1177/0956247809339007

Charmes, E. (2010). La densification en débat. *Etudes foncières*, (145), 20–23.

Chen, H., Jia, B., & Lau, S. S. Y. (2008). Sustainable urban form for Chinese compact cities: Challenges of a rapid urbanized economy. *Habitat International*, *32*(1), 28–40.

Cheng, V., Steemers, K., Montavon, M., & Compagnon, R. (2006). Urban form, density and solar potential. *PLEA, Geneva, Switzerland*. Consulté à l'adresse http://www.usp.br/fau/cursos/graduacao/arq_urbanismo/disciplinas/aut0221/Material_de_Apoio/Cidades/Cheng_Plea2006_Solar_Density.pdf

Chevalier, J. (2010, mars). *Energie grise des bâtiments - Définition et règles de calcul*. CSTB présenté à Journée thématique du PREBAT « vers des bâtiments à énergie positive ». Consulté à l'adresse http://rp.urbanisme.equipement.gouv.fr/puca/activites/prebat_310310/Jacques_CHEVALIER.pdf

Ching, J. (2012). WUDAPT: Conceptual framework for an international community urban morphology database to support meso-urban and climate models. *Urban Climate News*, (n°45).

Ching, J., Taha, H., Williams, D., Brown, M., Burian, S., Chen, F., … McPherson, T. (2009). National urban database and access portal tool. *Bulletin of the American Meteorological Society*, *90*(8), 1157–1168.

Chouillou, D. (2012, juillet). Guide d'utilisation de la plateforme ACCLIMAT.

Christen, A., van der Laan, M., Kellett, R., & Tooke, T. R. (2012). Context sensitive scaling of energy use simulations. In *ICUC8 Dublin*. Dublin.

CIRED. (2013). Centre International de Recherche sur l'Environnement et le Développement. Consulté 6 août 2013, à l'adresse http://www.centre-cired.fr/

Clanché, F., & Rascol, O. (2011). Le découpage en unités urbaines de 2010. *INSEE première*, (1364).

Clark, C. (1958). Transport-maker and breaker of cities. *Town Planning Review*, *28*(4), 237.

Clarke, K. C., Gazulis, N., Dietzel, C., & Goldstein, N. C. (2007). A decade of SLEUTHing: lessons learned from applications of a cellular automaton land use change model. *Classics from IJGIS. Twenty years of the international journal of geographical information systems and science*, 413–425.

Clerval, A. (2008, décembre 4). *La gentrification à Paris intra-muros : dynamiques spatiales, rapports sociaux et politiques publiques*. Université Panthéon-Sorbonne - Paris I. Consulté à l'adresse http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00347824

Close, J. (1996). The Integration of photovoltaics within high rise buildings in the dense urban environments of SE Asia, consideration of legislation to promote it and to maintain solar energy access. *Renewable energy*, *8*(1), 471–474.

Coillot, M. (2013). *Évaluation environnementale à l'échelle urbaine - Rapport de stage*.

Colombert, M. (2008a). *Contribution à l'analyse de la prise en compte du climat urbain dans les différents moyens d'intervention sur la ville*. Paris Est. Consulté à l'adresse http://www.theses.fr/2008PEST0233

Colombert, M. (2008b). *Contribution à l'analyse de la prise en compte du climat urbain dans les différents moyens d'intervention sur la ville (Contribution to the analysis of various means to take into account urban climate in urban planning)*. Université Paris-Est. Consulté à l'adresse http://hal.archives-ouvertes.fr/tel-00470536/

Colombert, M. (2012). Enjeux climatiques et pistes d'intervention en milieu urbain. *Cahier des territoures*.

Colombert, M., Salagnac, J.-L., Morand, D., & Diab, Y. (2012). Le climat et la ville : la nécessité d'une recherche croisant les disciplines. *VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement*, (Hors-série 12). doi:10.4000/vertigo.11811

Commissariat général au développement durable. (2009, mai). Émissions gaz à effet de serre - Évolutions des émissions totales en France de 1970 à 2008. Consulté 25 juin 2013, à l'adresse http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/energie-climat/r/emissions-gaz-effet-serre.html?tx_ttnews%5Btt_news%5D=20668&cHash=d30c9ca1c323baf2a6288a8afc98270e

Commissariat général au développement durable. (2010). Glossaire de l'enquête nationale transports et déplacements, 179.

Commissariat général au développement durable. (2012a). Quatrième rapport annuel au Parlement sur la mise en œuvre des engagements du Grenelle Environnement. Ministère de l'Ecologie, du Développement durable et de d'Energie. Consulté à l'adresse http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/4e_rapport_grenelle_finale_COMPLET-2.pdf

Commissariat général au développement durable. (2012b, décembre). Chiffres clés de l'énergie - Édition 2012. Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie. Consulté à l'adresse http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/fileadmin/documents/Produits_editoriaux/Publications/Reperes/2012/reperes-chiffres-cles-energie-2012.pdf

Commissariat général au développement durable. (2013, juin). Chiffres clés des énergies renouvelables - Édition 2013. Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie. Consulté à l'adresse http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Rep_-_chiffres_cles_energies.pdf

Communauté métropolitaine de Québec. (2010). Exemples de densité sur le territoire de la Communauté métropolitaine de Québec (Examples of density on the territory of the Quebec Metropolitan Community). Communauté métropolitaine de Québec.

Cornillier, C., & Vial, E. (2008). L'Analyse de Cycle de Vie (ACV) appliquée aux produits bois: bilan énergétique et prise en compte du carbone biomasse. In *IXème colloque Sciences et Industrie du Bois* (Vol. 21). Consulté à l'adresse http://www.citemaison.fr/upload/cm/lucf/File/Documents/L_Analyse_de_Cycle_de_Vie_(ACV)_appliquee_aux_produits_bois_Cornillier_Vial_ACV_Bois_Arbora08_CC_2.pdf

Council of Europe. (2005). *Social cohesion indicators*. [Strasbourg]: COE.

Coutard, O., & Rutherford, J. (2009). Les réseaux transformés par leurs marges : développement et ambivalence des techniques « décentralisées ». *Flux*, *n° 76-77*(2), 6‑13.

Crozet, Y., Orfeuil, J.-P., & Massot, M.-H. (2001). Mobilité urbaine: cinq scénarios pour un débat. Consulté à l'adresse http://hal.archives-ouvertes.fr/halshs-00180275/

Daliphard, J. (2001). Les évolutions de la réglementation thermique entre 1988 et 2000. *Acoustique & techniques*, (24), 24–26.

Dall'O', G., Galante, A., & Pasetti, G. (2012). A methodology for evaluating the potential energy savings of retrofitting residential building stocks. *Sustainable Cities and Society*, *4*(0), 12‑21. doi:10.1016/j.scs.2012.01.004

Darley. (2007). Les constructions de logements en diffus dans le tissu urbain existant. IAU IDF.

Darley, A., & Zunino, G. (2010, mars). Évolutivité des tissus urbains. IAU IDF. Consulté à l'adresse http://www.iau-idf.fr/detail/etude/evolutivite-des-tissus-urbains.html

De Groot, E., Spiekman, M., & Opstelten, I. (2006). Dutch research into user behaviour in relation to energy use of residences. In *Proceedings PLEA Conference*. Consulté à l'adresse http://architecture.ucd.ie/Paul/PLEA2008/content/papers/oral/PLEA_FinalPaper_ref_361.pdf

De la Barra, T., & Rickaby, P. A. (1982). Modelling regional energy use: a land use, transport and energy evaluation model. *Environment and Planning B*, *9*(4), 429–443.

De Munck, C. (2013). *Modélisation de la végétation urbaine et des stratégies d'adaptation au changement climatique pour l'amélioration du confort climatique et de la demande énergétique en ville*.

De Munck, C., Pigeon, G., Masson, V., Meunier, F., Bousquet, P., Tréméac, B., … Marchadier, C. (2013). How much can air conditioning increase air temperatures for a city like Paris, France? *International Journal of Climatology*, *33*(1), 210‐227. doi:10.1002/joc.3415

Defacto. (2012). Quartier d'affaires de la Défense. *Defacto, établissement public de gestion du quartier d'affaire de la Défense*. Consulté 24 juillet 2013, à l'adresse http://www.ladefense.fr/fr/tours

Desjardins, X. (2010). 20 ans après que retenir de la courbe de Newman et Kenworthy ? (20 years later, what to remember of Newman and Kenworthy curve?). *Etudes foncières*, (145), 27‐29.

Desplat, J., Lauffenburger, M., Salagnac, J. L., Kounkou-Arnaud, R., Lemonsu, A., Colombert, M., & Masson, V. (2009). PROJET EPICEA, ETUDE PLURIDISCIPLINAIRE DES IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE A L'ECHELLE DE L'AGGLOMERATION PARISIENNE. Présenté à Fifth Urban Research Symposium 2009. Consulté à l'adresse http://siteresources.worldbank.org/INTURBANDEVELOPMENT/Resources/336387-1256566800920/6505269-1268260567624/Desplat.pdf

Dettwiller, J. (1978). L'évolution séculaire de la température à Paris. *FRA*, *6*(13), 95–130.

Deymier, G., & Nicolas, J.-P. (2005). Modèles d'interaction entre transport et urbanisme : état de l'art et choix du modèle pour le projet SIMBAD. Rapport intermédiaire n°1. Consulté à l'adresse http://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00101342

Diday, E., Celeux, G., Govaert, G., Lechevallier, Y., & Ralambondrainy, H. (1989). Classification automatique des données. *Dunod, Paris*, *49*, 80.

Diday, Edwin. (1982). *Eléments d'analyse de données*. Bordas Editions.

Dubois, C. (2009). *Le guide de l'éolien, techniques et pratiques*. Editions Eyrolles. Consulté à l'adresse http://books.google.fr/books?hl=fr&lr=&id=Qh0rLDY6BXQC&oi=fnd&pg=PA6&dq=Le+guide+de+l%27%C3%A9olien,+techniques+et+pratiques&ots=yMX2lwT9Of&sig=hFTIkLqIZnwl0bokKserPxK-tyg

Dubois, C., & Bergeron, O. (2012). Adapting cities to climate change: heat and urban form. In *Proceedings of ICUC8 Dublin*. Dublin.

Dujin, A., Moussaoui, I., Mordret, X., & Maresca, B. (2011). Les usages de l'énergie dans les entreprises du secteur tertiaire. Consulté à l'adresse http://www.lesenr.fr/actualites/Etude_CREDOC.pdf

Dunteman, G. H. (1989). *Principal Components Analysis*. SAGE.

Dupuy, G. (1991). *L'urbanisme des réseaux: théories et méthodes*. Armand Colin Editeur. Consulté à l'adresse http://documents.irevues.inist.fr/handle/2042/29654

Echenique, M. H., & Williams, I. N. (1980). Developing theoretically based urban models for practical planning studies. *Sistemi Urbani*, *1*, 13–23.

Echenique, Marcial H., Flowerdew, A. D., Hunt, J. D., Mayo, T. R., Skidmore, I. J., & Simmonds, D. C. (1990). The MEPLAN models of Bilbao, Leeds and Dortmund. *Transport Reviews*, *10*(4), 309–322.

Escofier, B., & Pagès, J. (2008). *Analyses factorielles simples et multiples: objectifs, méthodes et interprétation*. Dunod. Consulté à l'adresse http://books.google.fr/books?hl=fr&lr=&id=nK5m_y1v2DkC&oi=fnd&pg=PA1&dq=Analyses+factorielles+simples+et+multiples&ots=oXarnvJ6TX&sig=mhMDgkiIgQO95L-7eATys9iWN38

Escourou, G. (1981). *Climat et environnement, les facteurs locaux du climat (Climate and environment, the local climate factors)*. Masson.

ESRI. (2013). ArcGIS Ressources - Manuels en ligne. Consulté 13 septembre 2013, à l'adresse http://resources.arcgis.com/fr/help/main/10.1/index.html#//00qn0000001p000000

ESRU. (2002). The ESP-r System for Building Energy Simulation User Guide Version 10 Series. University of Strathclyde.

Ewing, R. (1997). Is Los Angeles-style sprawl desirable? *Journal of the American planning association*, *63*(1), 107–126.

Fathy, H. (1986). Natural energy and vernacular architecture. Consulté à l'adresse http://www.osti.gov/energycitations/product.biblio.jsp?osti_id=6094230

Fernandez, P., & Lavigne, P. (2009). *Concevoir des bâtiments bioclimatiques: Fondements et méthodes*. Le Moniteur Editions.

Ferrand, N. (2010). *Approche morphologique de l'urbanisation: Lyon et son agglomération de 1945 à 2005 : données, outils et méthodes*. Consulté à l'adresse http://perso.numericable.fr/geohistoire-lyon/these.php

Fiala, D., Havenith, G., Bröde, P., Kampmann, B., & Jendritzky, G. (2012). UTCI-Fiala multi-node model of human heat transfer and temperature regulation. *International journal of biometeorology*, *56*(3), 429–441.

Fouad, A. O. (2007). *Morphologie urbaine et confort thermique dans les espaces publics: étude comparative entre trois tissus urbains de la ville de Québec (Urban morphology and*

thermal comfort in public spaces: a comparative study of three urban fabric of the city of Quebec). Université Laval.

Fouchier, V. (1997). Les densités urbaines et le développement durable, le cas des villes nouvelles et de l'Ile-de-france. *Paris, Secrétariat général des villes nouvelles*.

GEODE. (2013). Laboratoire GEODE. Consulté 6 août 2013, à l'adresse http://w3.geode.univ-tlse2.fr/presentation.php

Geyer, P. (2009). Component-oriented decomposition for multidisciplinary design optimization in building design. *Advanced Engineering Informatics*, *23*(1), 12‑31. doi:10.1016/j.aei.2008.06.008

GIEC, Pachauri, R. K., & Reisinger, A. (2008). *Bilan 2007 des changements climatiques rapport de synthèse*. Geneve: GIEC.

Gill, S. E., Handley, J. F., Ennos, A. R., & Pauleit, S. (2007). Adapting cities for climate change: the role of the green infrastructure. *Built Environment (1978-)*, 115–133.

Giraud, P.-N. (1999). Un scenario energetiques tendanciel pour la France a l'horizon 2020. *Realites Industrielles-Annales des Mines*, 24–30.

Godet, M. (2007a). *Manuel de prospective stratégique - Tome 1 - 3ème édition - Une indiscipline intellectuelle*. Dunod.

Godet, M. (2007b). *Manuel de prospective stratégique - Tome 2 - 3ème édition - L'Art et la méthode*. Dunod.

Gordon, P., & Richardson, H. W. (1997). Are compact cities a desirable planning goal? *Journal of the american planning association*, *63*(1), 95–106.

Grazi, F., & Van den Bergh, J. C. J. M. (2008). Spatial organization, transport, and climate change: Comparing instruments of spatial planning and policy. *Ecological Economics*, *67*(4), 630‑639. doi:10.1016/j.ecolecon.2008.01.014

Grenelle 2. LOI n° 2010-788 du 12 juillet 2010 portant engagement national pour l'environnement (2010).

Griffiths, J. F. (1976). *Climate and the Environment: The Atmospheric Impact on Man*. Paul Elek Incorporated.

Grimmond, C. S. B., & Oke, T. R. (1999). Aerodynamic Properties of Urban Areas Derived from Analysis of Surface Form. *Journal of Applied Meteorology*, *38*(9), 1262‑1292. doi:10.1175/1520-0450(1999)038<1262:APOUAD>2.0.CO;2

Grosso, M. (1998). Urban form and renewable energy potential. *Renewable energy*, *15*(1), 331–336.

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.

Gusdorf, F., & Hallegatte, S. (2007). Behaviors and housing inertia are key factors in determining the consequences of a shock in transportation costs. *Energy Policy*, *35*(6), 3483–3495.

Gusdorf, F., Hallegatte, S., & Lahellec, A. (2008). Time and space matter: how urban transitions create inequality. *Global Environmental Change*, *18*(4), 708–719.

Haas, R., Auer, H., & Biermayr, P. (1998). The impact of consumer behavior on residential energy demand for space heating. *Energy and buildings*, *27*(2), 195–205.

Haase, D., & Schwarz, N. (2009). Simulation models on human-nature interactions in urban landscapes: a review including spatial economics, system dynamics, cellular automata and agentbased approaches. *Living Reviews in Landscape Research*, *3*(2), 1–45.

Hallegatte, S., Viguié, V., Masson, V., Lemonsu, A., Pigeon, G., Beaulant, A.-L., … Salagnac, J.-L. (2013). *VURCA PROJECT - Cities vulnerability to future heat waves & adaptation strategies - Projet methodology and results* (No. N° ANR-08-VULN-013/VURCA).

Hamson, P. (1969). The Green Belt saga. *Radlett Green Belt Society, London*. Consulté à l'adresse http://londongreenbeltcouncil.org.uk/lgbc%20website/the%20green%20belt%20story.html

Hang, J., Sandberg, M., & Li, Y. (2009). Effect of urban morphology on wind condition in idealized city models. *Atmospheric Environment*, *43*(4), 869‑878. doi:10.1016/j.atmosenv.2008.10.040

Hansen, W. G. (1959). How accessibility shapes land use. *Journal of the American Institute of Planners*, *25*(2), 73–76.

Hayoun, L.-P., & Arrigoni, A. (2011). *Les installations photovoltaïques: conception et dimensionnement des installations raccordées au réseau*. Paris: Eyrolles.

Hego Deveza Barrau, A. (2011). *Droit et intégration des énergies renouvelables: Les règles juridiques relatives au développement et à l'utilisation des énergies renouvelables dans le bâtiment*. Editions L'Harmattan.

Heymann, Y. (1993). CORINE land cover: Technical guide. Commission of the European Communities, Office for Official Publication of the European Communities, Luxembourg.

Hiller, M. D., Beckman, W. A., & Mitchell, J. W. (2000). TRNSHD—a program for shading and insolation calculations. *Building and Environment*, *35*(7), 633–644.

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.

Houet, T., Masson, V., Bonhomme, M., Moine, M.-P., Marchadier, C., Bretagne, G., … Pigeon, G. (2014). Article soumis - Projecting 2100 urban growth to assess urban climate changes on Toulouse urban area (France): Combining forecasting/backcasting scenarios and land change models. In *Land transformations: between global challenges and local realities*. Berlin.

Huang, S.-L., & Hsu, W.-L. (2003). Materials flow analysis and emergy evaluation of Taipei's urban construction. *Landscape and urban planning*, *63*(2), 61–74.

Hui, S. C. . (2001). Low energy building design in high density urban cities. *Renewable Energy*, *24*(3–4), 627‑640. doi:10.1016/S0960-1481(01)00049-0

IAU - IDF. (2008). Base de connaissance sur le Mode d'occupation du sol (Mos). Consulté 18 juillet 2013, à l'adresse http://www.iau-idf.fr/?1026

IEA. (2009). Cities, towns and renewable energy - Yes in my front yard.

IES. (2013). IES-VE User Guides. Consulté 9 septembre 2013, à l'adresse http://www.iesve.com/support/userguides

IGN. (2012a, juin). BD Parcellaire Version 1.2 - Descriptif de contenu.

IGN. (2012b, octobre). *Etat d'avancement du projet de convergence parcellaire*.

INSEE. (2009a). Ile-de-France - Les grandes aires urbaines régionales au 1er janvier 2009. *www.insee.fr*. Consulté 2 août 2013, à l'adresse http://www.insee.fr/fr/themes/tableau.asp?reg_id=20&ref_id=tertc01206

INSEE. (2009b). Les quartiers centraux d'affaires. *Géographie de l'emploi 2006 en Ile-de-France*. Consulté à l'adresse http://www.insee.fr/fr/insee_regions/idf/themes/dossiers/geographie_emploi/docs/geo_emploi_52.pdf

INSEE. (2009c). Midi-Pyrénées - Les grandes aires urbaines régionales au 1er janvier 2009. *www.insee.fr*. Consulté 2 août 2013, à l'adresse http://www.insee.fr/fr/themes/tableau.asp?reg_id=7&ref_id=tertc01206

INSEE. (2010a). Ile-de-France - Principales agglomérations régionales au 1er janvier 2010. *www.insee.fr*. Consulté 2 août 2013, à l'adresse http://www.insee.fr/fr/themes/tableau.asp?reg_id=20&ref_id=tertc01204

INSEE. (2010b). Midi-Pyrénées - Principales agglomérations régionales au 1er janvier 2010. *www.insee.fr*. Consulté 2 août 2013, à l'adresse http://www.insee.fr/fr/themes/tableau.asp?reg_id=7&ref_id=tertc01204

INSEE. (2012). Définitions et méthodes. Consulté 16 juillet 2013, à l'adresse http://www.insee.fr/fr/methodes/default.asp?page=definitions/liste-definitions.htm

INSEE. (2013a, janvier). Commune de Paris - Chiffres clés - Résumé statistique.

INSEE. (2013b, janvier). Commune de Toulouse - Chiffres clés - Résumé statistique.

International Atomic Energy Agency. (2005). *Energy indicators for sustainable development: guidelines and methodologies*. Vienna: International Atomic Energy Agency.

Ishizaka, A., & Nemery, P. (2013). Multi-attribute utility theory. In *Multi-Criteria Decision Analysis* (p. 81–113). John Wiley & Sons Ltd. Consulté à l'adresse http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/9781118644898.ch4/summary

Jackson, T. L., Feddema, J. J., Oleson, K. W., Bonan, G. B., & Bauer, J. T. (2010). Parameterization of urban characteristics for global climate modeling. *Annals of the Association of American Geographers*, *100*(4), 848–865.

Jianwen, M., & Bagan, H. (2005). Land-use classification using ASTER data and self-organized neutral networks. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, *7*(3), 183‑188. doi:10.1016/j.jag.2005.01.003

Juricic, van den Ham, & Kurvers. (2012). Robustness of a building Relationship between building characteristics and energy use and health and comfort perception. In *Proceedings of the 7th NCEUB conference*. Windsor, UK. Consulté à l'adresse http://nceub.commoncense.info/uploads/W1234%20Juricic.pdf

Jusuf, S. K., & Wong, N. H. (2009). Development of empirical models for an estate level air temperature prediction in Singapore. In *Proceedings of the Second International Conference on Countermeasures to Urban Heat Islands* (p. 21–23). Consulté à l'adresse http://heatisland2009.lbl.gov/docs/221410-jusuf-doc.pdf

Knowles, R. L., Berry, R. D., & Solar Energy Research Institute. (1980). *Solar Envelope Concepts: Moderate Density Building Applications*. Solar Energy Information Data Bank.

Kolokotroni, M., & Aronis, A. (1999). Cooling-energy reduction in air-conditioned offices by using night ventilation. *Applied Energy*, *63*(4), 241–253.

Korsu, E., Massot, M.-H., Orfeuil, J.-P., & Proulhac, L. (2012). Simuler pour évaluer l'espace des possibles : applications aux stratégies résidentielles et aux politiques de mobilité. In *Modelisation urbaine : de la représentation au projet*. Paris: Ministère de l'Ecologie, du Développement durable et de d'Energie.

Kotharkar, R. (2012). Urban climate fields classification for an Indian city: Nagpur, India. In *Proceedings of ICUC8 Dublin*. Dublin.

Kounkou-Arnaud, R., Lemonsu, A., & Desplat, J. (2011). Evolution du climat urbain de Paris dans la perspective du changement climatique (Evolution of urban climate of Paris in the

context of climate change). In *Proceedings of 2R2CV*. Université Paul Verlaine - Metz, France. Consulté à l'adresse http://www.univ-metz.fr/recherche/labos/cegum/2R2CV/Actes/Kounkou-Arnaud.pdf

Koussa, C. (2011). *Implantation d'un système d'information géographique 3D sur Internet pour la gestion des modèles urbains*. Consulté à l'adresse http://scd-theses.u-strasbg.fr/2131/01/KOUSSA_Chokri_2011.pdf

Krizek, K. J. (2003). Neighborhood services, trip purpose, and tour-based travel. *Transportation*, *30*(4), 387–410.

Kuzmyak, J. R., Pratt, R. H., Douglas, G. B., & Spielberg, F. (2003). Land Use and Site Design-Traveler Response to Transportation System Changes. Consulté à l'adresse http://www.worldtransitresearch.info/research/3057/

Lafore, J. P., Stein, J., Asencio, N., Bougeault, P., Ducrocq, V., Duron, J., … Arellano, J. V.-G. de. (1997). The Meso-NH Atmospheric Simulation System. Part I: adiabatic formulation and control simulations. *Annales Geophysicae*, *16*(1), 90‑109. doi:10.1007/s00585-997-0090-6

Laigle, L., Laterrasse, J., Farah, M., Peter, M., Bachmann, T., Fulda, A. S., … Aulagnier, S. (2012). *Etat de l'art en Europe: apports et limites des Plans Climat-Energie Territoriaux à l'aune des connaissances scientifiques* (Vol. 2). Consulté à l'adresse http://www.aspect2050.fr/files/ASPECT_Etat-art_T1.pdf

Landes, E., & Martin, G. (2009, semptembre). Comment développer un projet de parc éolien. *Energie et Développement Durable*, (864).

Lapillonne, B., & Chateau, B. (1981). The medee models for long term energy demand forecasting. *Socio-Economic Planning Sciences*, *15*(2), 53‑58. doi:10.1016/0038-0121(81)90049-5

Larivière, I., & Lafrance, G. (1999). Modelling the electricity consumption of cities: effect of urban density. *Energy Economics*, *21*(1), 53‑66. doi:10.1016/S0140-9883(98)00007-3

Larose, D. T. (2005). *Des données à la connaissance: Une introduction au data-mining*. Vuibert informatique.

Larousse. (2009). *Le Petit Larousse 2010*. Larousse.

LAVUE, CSTB, & EDF. (2012). *Energihab - Rapport de recherche final*.

Lawley, D. N., & Maxwell, A. E. (1962). Factor analysis as a statistical method. *Journal of the Royal Statistical Society. Series D (The Statistician)*, *12*(3), 209–229.

Lebart, L., Morineau, A., & Piron, M. (1995). *Statistique exploratoire multidimensionnelle* (Vol. 3). Dunod Paris. Consulté à l'adresse http://www.lavoisier.fr/livre/notice.asp?id=3ROWOOA3SSXOWB

Léger, J. M. (2010). Densification des lotissements. Les pavillonnaires font de la résistance. *Etudes foncières*, *145*, 12–15.

Leroy, A. (2009). *Simulation thermique dynamique Le Grand Mothais*. Consulté à l'adresse http://fr.calameo.com/read/000000742e7b088c16568

Leurent, F. (2012). Les modèles d'usage du sol et transport : où la géographie et l'économie se rejoignent. In *Modelisation urbaine : de la représentation au projet*. Paris: Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie.

Leveiller, T. (2011). Analyse de l'expansion passée de l'agglomération parisienne - Étude du Mode d'occupation du sol de l'IAU-IdF. Rapport Projet MUSCADE.

Levinson, D. M., & Kumar, A. (1997). Density and the journey to work. *Growth and Change*, *28*(2), 147–172.

Liébard, A., & De Herde, A. (2005). *Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatiques: Concevoir, édifier et aménager avec le développement durable*. Moniteur.

Long, N., & Kergomard, C. (2005). Classification morphologique du tissu urbain pour des applications climatologiques (Morphological classification of the urban fabric for climate applications). *Revue Internationale de Géomatique*, *15*, 487‑ 512.

Lowry, I. S. (1964). *A model of metropolis*. Consulté à l'adresse http://www.prgs.edu/content/dam/rand/pubs/research_memoranda/2006/RM4035.pdf

MacQueen, J. (1967). Some methods for classification and analysis of multivariate observations. In *Proceedings of the fifth Berkeley symposium on mathematical statistics and probability* (Vol. 1, p. 14). Consulté à l'adresse http://books.google.fr/books?hl=fr&lr=&id=IC4Ku_7dBFUC&oi=fnd&pg=PA281&dq=some+methods+for+classifi+cation+and+analysis+of+multivariate+observations.&ots=nMZgC1MftO&sig=EcaRFwbE93VV4uiEQ3cTYI_oM6w

Maïzia, M. (2007a). L'énergétique urbaine et la morphologie des villes. L'analyse du bâti parisien. In *Les Annales de la Recherche Urbaine* (p. 79–85). Consulté à l'adresse http://hal.archives-ouvertes.fr/halshs-00177784/

Maïzia, M. (2007b). Pompe à chaleur et habitat. Prospective des consommations d'énergie et des émissions de CO2 dans l'habitat: les gisements offerts par les pompes à chaleur. *Les Cahiers du CLIP*, *18*, 1–47.

Maïzia, M. (2010). Densité énergétique versus densité urbaine. *Etudes foncières*, *La densification en débat*(145), 20–23.

Maïzia, M., Sèze, C., Berge, S., Teller, J., Reiter, S., & Ménard, R. (2009). Energy requirements of characteristic urban blocks. *Proc. of CISBAT 2009-Renewables in a changing climate-From Nano to urban scale*. Consulté à l'adresse http://orbi.ulg.ac.be/handle/2268/31629

Marchadier, C. (2012, juin). CONSTRUCTION DES SCENARIOS MUSCADE « Bâti, Technologies & Usages ». CNRM.

Marchadier, C., Bretagne, G., Viguié, V., Adolphe, L., Salagnac, J.-L., & Hidalgo, J. (2012). How to define and assess city adaptation strategies? In *ICUC8 Dublin*. Dublin.

Mardia, K. V., Kent, J. T., & Bibby, J. M. (1980). Multivariate analysis. Consulté à l'adresse http://www.citeulike.org/group/302/article/553295

Maresca, B., Dujin, A., & Picard, R. (2009). La consommation d'énergie dans l'habitat entre recherche de confort et impératif écologique. *Cahier de recherche*, (n°264). Consulté à l'adresse http://credoc.fr/pdf/Rech/C264.pdf

Marique, A. F., & Reiter, S. (2012). A method for evaluating transport energy consumption in suburban areas. *Environmental Impact Assessment Review*, *33*(1), 1–6.

Marsh, A. J. (1996). Performance modelling and conceptual design. In *International IBPSA Conference, The University of New South Wales, Sydney, Australia*. Consulté à l'adresse http://companyshed.com/1023649200/documents/1996_IBPSA.pdf

Martilli, A. (2007). Current research and future challenges in urban mesoscale modelling. *International journal of climatology*, *27*(14), 1909–1918.

Martilli, A. (2012). An idealized study of city structure, urban climate, energy consumption. In *ICUC8 Dublin*. Dublin.

Masson, V. (2000). A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models. *Boundary-layer meteorology*, *94*(3), 357–397.

Masson, V., Marchadier, C., Hallegatte, S., Viguié, V., Moine, M.-P., Bretagne, G., … Pigeon, G. (2012). Adapting cities to Climate Change : a systemic modelling approach. In *ICUC8 Dublin*. Dublin.

Méquignon, M., Ait Haddou, H., Thellier, F., & Bonhomme, M. (2013). Greenhouse gases and building lifetimes. *Building and Environment*, *68*, 77‑86. doi:10.1016/j.buildenv.2013.05.017

Merlin, A. (2010). Le rôle stratégique des réseaux électriques dans la mise en øeuvre d'une politique énergétique européenne. *REE. Revue de l'électricité et de l'électronique*, (2), 126–128.

Merlin, P., & Choay, F. (1988). *Dictionnaire de l'urbanisme et de l'aménagement*. Presses Universitaires de France.

Météo-France. (2010). Le climat en France. Consulté 15 juillet 2013, à l'adresse http://climat.meteofrance.com/chgt_climat2/climat_france?89461.path=climatnormales%252FFRANCE

Mialet, F. (2006). *Le renouveau de l'habitat intermédiaire*. CERTU / PUCA. Consulté à l'adresse http://renaudie.scup.pro/IMG/pdf/Puca.pdf

Milliex, J.-M. (2003, juin). Densités vécues et formes urbaines : étude de quatre quartiers parisiens. APUR.

Mindali, O., Raveh, A., & Salomon, I. (2004). Urban density and energy consumption: a new look at old statistics. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, *38*(2), 143–162.

Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable. (2004). Plan Climat 2004. Consulté à l'adresse http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/ecologie/pdf/PLAN-CLIMAT-2004-2.pdf

Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable. (2006). Actualisation 2006 du Plan Climat 2004- -2012. Consulté à l'adresse http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/plan-climat-2006.pdf

Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie. (2007, mars). Exigences réglementaires pour la rénovation énergétique des batiments. Consulté 6 août 2013, à l'adresse http://www.developpement-durable.gouv.fr/Chapitre-II-La-RT-existant-globale.html

Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie. (2010, janvier 18). Etalement urbain. Consulté 10 juillet 2013, à l'adresse http://www.developpement-durable.gouv.fr/Quelques-definitions.html

Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie. Décret relatif à l'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN). , Pub. L. No. 2011-1371 (2011).

Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie. (2013, Juilet). La réglementation thermique 2012. Consulté 6 août 2013, à l'adresse http://www.developpement-durable.gouv.fr/Chapitre-I-La-reglementation.html

Ministère de l'Économie et des Finances. Décret du portant règlement d'administration publique pour l'application des articles 32 et 33 de la loi de finances du 27 avril 1946 relatifs à l'institut national de la statistique et des études économiques pour la métropole et la France d'outre-mer. , Pub. L. No. n° 46-1432 (1946). Consulté à l'adresse http://www.insee.fr/fr/insee-statistique-publique/default.asp?page=connaitre/decret-1946.htm

Ministère du Développement durable et de l'Energie. (2011, juillet). Plan national d'adaptation de la France aux effets du changement climatique 2011 - 2015.

Ministère du Développement durable et de l'Energie. (2013a, juin). Différents types d'adaptation. Consulté 7 septembre 2013, à l'adresse http://www.developpement-durable.gouv.fr/Differents-types-d-adaptation.html

Ministère du Développement durable et de l'Energie. (2013b, juillet). Contenu du plan national d'adaptation. Consulté 7 septembre 2013, à l'adresse http://www.developpement-durable.gouv.fr/Contenu-du-plan-national-d.html

Moine, M.-P. (2012, Aout). *A multidisciplinary modeling platform to draw possible futures of urban climate*. ICUC8 Dublin.

Molina, G. (2012). Lutte contre le changement climatique : les acteurs de l'aménagement entre coopération, reconversion et concurrence. *Métropolitiques*. Consulté à l'adresse http://www.metropolitiques.eu/Lutte - contre - le - changement.html

Montavon, M. (2010). *Optimisation of Urban Form by the Evaluation of the Solar Potential*.

Morel, C., & Bonneaud, F. (2012, janvier). Conjuguer qualité architecturale et qualité énergétique. *Alternatives économiques*, *Le bâtiment à l'heure du développement durable*(n°53), pp. 17‑ 18.

Morgenthaler, S. (2007). *Introduction à la statistique*. PPUR presses polytechniques.

Morice, N., Traisnel, J. P., Delvert, K., Macraigne, S., Pochet, P., Raux, C., … others. (2004). Etat de l'art et synthèse en matière de prospective. ETHEL. Rapport R1. Consulté à l'adresse http://halshs.archives-ouvertes.fr/docs/00/10/11/86/PDF/ETHEL_Rapport_R1.pdf

Moulinié, C., & Naudin-Adam, M. (2005a). Appréhender la densité 1 - Les repères historiques (Understanding density 1 - Historical landmarks). *Note rapide sur l'occupation du sol. Institut d'Aménagement et d'Urbanisme de la Région d'Ile-de-France*, (383).

Moulinié, C., & Naudin-Adam, M. (2005b). Appréhender la densité 2 - Les indicateurs de densité (Understanding density 2 - Indicators of density). *Note rapide sur l'occupation du sol. Institut d'Aménagement et d'Urbanisme de la Région d'Ile-de-France*, (383).

Moussaoui, I. (2007). De la société de consommation à la société de modération. In *Annales de la recherche urbaine* (p. 113–119). Consulté à l'adresse http://research.edf.com/fichiers/fckeditor/Commun/Innovation/articles/ARU103moussaoui.pdf

Multon, B., & Ruer, J. (2003). Stocker l'électricité: oui, c'est indispensable et c'est possible. Pourquoi, où, comment? *Publication ECRIN en contribution au débat national sur l'énergie*. Consulté à l'adresse http://ecrin.asso.free.fr/pdf/energies.pdf

Musy, A. (2005, février). Cours Hydrologie générale - Laboratoire d'Hydrologie et Aménagements (HYDRAM) - Institut des Sciences et Technologies de l'Environnement (ISTE) - Ecole Polytechnique Fédérale (EPFL). Consulté 2 juillet 2013, à l'adresse http://echo2.epfl.ch/e-drologie/

Musy, M. (2012). L'étude des microclimats urbains : champ de recherche à l'interface entre climatologie, urbanisme et génie-civil. *VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement*, (Hors-série 12). doi:10.4000/vertigo.11841

Nakamura, Y., & Oke, T. R. (1988). Wind, temperature and stability conditions in an east-west oriented urban canyon. *Atmospheric Environment (1967)*, *22*(12), 2691–2700.

Nations Unies. (2009). Accord de Copenhague. Consulté à l'adresse http://unfccc.int/resource/docs/2009/cop15/fre/l07f.pdf

Nessi, H. (2010). Formes urbaines et consommation d'énergie dans les transports (Urban forms and energy consumption in transport). *Etudes foncières*, (145), 30‑ 32.

Newman, P. W. G., & Kenworthy, J. R. (1989). Gasoline consumption and cities. *Journal of the American Planning Association*, *55*(1), 24–37.

Niemann, E. (2006). L'énergie grise dans la filière bâtiment et travaux publics. MGC / DRAST.

Observatoire de la ville. (2007). Réflexions et propositions du comité d'experts de l'observatoires de la ville. Formes d'habitat et densités urbaines, risques et opportunités pour les villes de demain.

Oke, T. R. (1982). The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, *108*(455), 1–24.

Oke, T. R. (1987). *Boundary Layer Climates*. Psychology Press.

Oke, T. R. (1988). Street design and urban canopy layer climate. *Energy and buildings*, *11*(1), 103–113.

Olgyay, V. (1973). *Design with Climate*. Princeton University Press.

Oliveira, V., & Silva, M. (2013). Urban form and energy. *Urban Morphology*, *17*(1). Consulté à l'adresse http://www.urbanform.org/online_public/2013_1.shtml

Oliver, P. (1997). *Encyclopedia of vernacular architecture of the world: Theories and principles*. Cambridge University Press.

Organisation for Economic Co-operation and Development. (2011). Towards Green Growth - Monitoring Progress, OECD Indicators.

OURANOS. (2013). Environnement bâti - Projets en cours. Consulté 5 juillet 2013, à l'adresse http://www.ouranos.ca/fr/programmation-scientifique/impacts-et-adaptation/environnement-bati.php#projetsencours

Owens, S. (1995). A response to Michael Breheny. *Transactions of the Institute of British Geographers*, 381–384.

Pagliara, F., & Wilson, A. (2010). The state-of-the-art in building residential location models. In *Residential location choice* (p. 1–20). Springer. Consulté à l'adresse http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-12788-5_1

Panerai, P. (2010). Proposition de l'équipe Panerai : Reims 2020 – Le grand projet urbain. Consulté 22 juillet 2013, à l'adresse http://www.reims2020.fr/grand-projet-urbain/propositions/construire-ville-durable.html

Panerai, P., Castex, J., & Depaule, J.-C. (1997). *Formes urbaines: de l'îlot à la barre*. Editions Parenthèses.

Panerai, P., Demorgon, M., & Depaule, J. C. (1999). *Analyse urbaine (Urban analysis)*. Parenthèses. Consulté à l'adresse http://en.scientificcommons.org/8186064

Parisi, G. (2013). *Mise au point d'un indicateur de densité perçue - Rapport de stage*.

Parlement Européen. Directive relative à la promotion de l'utilisation de l'énergie produite à partir de sources renouvelables (2009).

Percebois, J. (2004). Ouverture à la concurrence et régulation des industries de réseaux: le cas du gaz et de l'électricité. Quelques enseignements au vu de l'expérience européenne. *Économie publique*, (12). Consulté à l'adresse http://economiepublique.revues.org/348

Perera, N. G. R. (2012). Mapping « Local Climate Zones » and relative warming effects in Colombo, Sri Lanka. In *Proceedings of ICUC8 Dublin*. Dublin.

Perez, R., Ineichen, P., Seals, R., Michalsky, J., & Stewart, R. (1990). Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance. *Solar energy*, *44*(5), 271–289.

Pigeon, G., Lemonsu, A., Masson, V., & Hidalgo, J. (2008). De l'observation du microclimat urbain à la modélisation intégrée de la ville (From the observation of urban microclimate to an integrated modeling of the city). *La Météorologie*, (62). doi:10.4267/2042/19174

Potvin, A., Demers, D., DuMontier, C., & Giguère-Duval, H. (2012). Assessing seasonal microclimatic performance of urban environments. In *ICUC8 Dublin*. Dublin.

Prado, R. T. A., & Ferreira, F. L. (2005). Measurement of albedo and analysis of its influence the surface temperature of building roof materials. *Energy and Buildings*, *37*(4), 295–300.

QUALITEL. (2008, janvier). Habitat & Environnement Référentiel Millésime 2008.

Rakotomalala, R. (2005). TANAGRA: un logiciel gratuit pour l'enseignement et la recherche (TANAGRA: free software for teaching and research). In *Proceedings of EGC* (Vol. 2, p. 697–702). Consulté à l'adresse http://eric.univ-lyon2.fr/~ricco/tanagra/fichiers/le_logiciel_tanagra_egc_2005.pdf

Ratti, C., Baker, N., & Steemers, K. (2005). Energy consumption and urban texture. *Energy and buildings*, *37*(7), 762–776.

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.

Raux, C., Traisnel, J.-P., Nicolas, J.-P., Maïzia, M., & Delvert, K. (2005). Bilans énergétiques Transport-Habitat et méthodologie BETEL. ETHEL. Rapport R2. Consulté à l'adresse http://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00101248

Ringenbach, N. (2004). *Bilan radiatif et flux de chaleur en climatologie urbaine: mesures, modélisation et validation sur Strasbourg (Radiation balance and heat fluxes in urban climatology: measurements, modeling and validation on Strasbourg)*.

Robinson, D., Campbell, N., Gaiser, W., Kabel, K., Le-Mouel, A., Morel, N., … Stone, A. (2007). SUNtool–A new modelling paradigm for simulating and optimising urban sustainability. *Solar Energy*, *81*(9), 1196–1211.

Robinson, D., & Stone, A. (2004). Solar radiation modelling in the urban context. *Solar Energy*, *77*(3), 295–309.

Roboam, X. (2005). Le petit éolien: marchés, applications, architectures et gestion d'énergie: L'Energie éolienne. *REE. Revue de l'électricité et de l'électronique*, (5), 51–58.

Rogers, R. (2000). *Des villes pour une petite planète*. Le Moniteur Editions.

Roy, B. (1991). The outranking approach and the foundations of ELECTRE methods. *Theory and decision*, *31*(1), 49–73.

Saaty, T. L. (1990). How to make a decision: the analytic hierarchy process. *European journal of operational research*, *48*(1), 9–26.

Sacre, C. (1983). Le confort dans les espaces extérieurs : analyse microclimatique (Comfort in outdoor spaces: microclimatic analysis). CSTB de Nantes.

Salagnac, J.-L. (2007a). Lessons from the 2003 heat wave: a French perspective. *Building Research & Information*, *35*(4), 450‑457. doi:10.1080/09613210601056554

Salagnac, J.-L. (2007b). Lessons from the 2003 heat wave: a French perspective. *Building Research & Information*, *35*(4), 450‑457. doi:10.1080/09613210601056554

Salagnac, J.-L. (2013). *Description des paramètres bâti dans le cadre des projets ACCLIMAT et MUSCADE*.

Salat, S. (2007). Energy and bioclimatic efficiency of urban morphologies–towards a comparative analysis of Asian and European cities. In *Proceedings of the International Conference on Sustainable Building Asia* (p. 161–166). Consulté à l'adresse http://www.urba2000.com/club-ecomobilite-DUD/IMG/pdf/CSTB.morpho_U_.pdf

Salat, S. (2011a). *Les villes et les formes: Sur l'urbanisme durable*. Hermann.

Salat, S. (2011b). Scale Hierarchy, Urban Typologies and Energy. Présenté à National Congress on Energy and Spatial Planning, Delph.

Salomon, T., Mikolasek, R., & Peuportier, B. (2005). Outil de simulation thermique du bâtiment, COMFIE. *Journée SFT-IBPSA,«Outils de simulation thermo-aéraulique du bâtiment*, 8.

Sandrini, C. (2005). *Politique urbaine et mémoire collective, la monumentalisation de Paris depuis l'Occupation*. Université de Paris 8.

Santamouris, M., & Dascalaki, E. (2002). Passive retrofitting of office buildings to improve their energy performance and indoor environment: the OFFICE project. *Building and Environment*, *37*(6), 575–578.

Santiago, J. (2013). *Etude du cas test 10 D* (No. 1JS_Epicure).

Saporta, G. (2011). *Probabilités, analyse des données et statistique*. Editions TECHNIP.

Schärlig, A. (1985). *Décider sur plusieurs critères: panorama de l'aide à la décision multicritère* (Vol. 1). PPUR presses polytechniques. Consulté à l'adresse http://books.google.fr/books?hl=fr&lr=&id=rjzpgkTX7SEC&oi=fnd&pg=PA15&dq=Sch%C3%A4rlig+&ots=ShFCu2U7Fh&sig=dUqXGATTTeQKSGPve-B2Sd2WafI

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.

Searle, S. R., Casella, G., & McCulloch, C. E. (2009). *Variance Components*. John Wiley & Sons.

Sidler. (2002). *Etude des paramètres influant sur les consommations de climatisation dans les immeubles de bureaux*. ENERTECH, ADEME, ARENE, Région PACA.

Smit, R., Brown, A. L., & Chan, Y. C. (2008). Do air pollution emissions and fuel consumption models for roadways include the effects of congestion in the roadway traffic flow? *Environmental Modelling & Software*, *23*(10-11), 1262‑1270. doi:10.1016/j.envsoft.2008.03.001

Smith, C., & Levermore, G. (2008). Designing urban spaces and buildings to improve sustainability and quality of life in a warmer world. *Energy Policy*, *36*(12), 4558‑4562. doi:10.1016/j.enpol.2008.09.011

Souami, T. (2007). L'intégration des technologies énergétiques dans l'action urbaine: Eclairages théoriques d'expériences européennes. In *Annales de la recherche urbaine* (p. 6–17). Consulté à l'adresse http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsidt=19560699

Souami, T. (2009). Conceptions et représentations du territoire énergétique dans les quartiers durables. *Flux*, *n° 76-77*(2), 71‑81.

Stankovic, S. (2006). Sustainable urban Neighbourhoods. In *Proceedings of PLEA*. Genève.

Steadman, P. (1977). Energy and patterns of land use. *JAE*, *30*(3), 62–67.

Steele, J. (2005). *Architecture écologique: Une histoire critique*. Actes Sud.

Steemers, K. (2003). Energy and the city: density, buildings and transport. *Energy and buildings*, *35*(1), 3–14.

Steemers, K., Baker, N., Crowther, D., Nikolopoulou, M., & Clocquet, R. (1996). Project ZED, Modelling environmental characteristics of urban forms. *Solar Energy in Architecture and Urban Planning, HS Stephens, Bedford*, 4–7.

Stewart, I., & Oke, T. (2009). Classifying Urban Climate Field Sites by « Local Climate Zones ». *International Association for Urban Climate*, (34).

Sultana, S. (2000). Some effects of employment centers on commuting times in the Atlanta metropolitan area, 1990. *Southeastern Geographer*, *40*(2), 225–233.

Tablada, A., De Troyer, F., Blocken, B., Carmeliet, J., & Verschure, H. (2009). On natural ventilation and thermal comfort in compact urban environments – the Old Havana case. *Building and Environment*, *44*(9), 1943‑1958. doi:10.1016/j.buildenv.2009.01.008

Terreneuve Achitectes. (2010). Crèche Herold and PMI, Paris | TERRENEUVE | Architectes DPLG. Consulté 7 septembre 2013, à l'adresse http://www.terreneuve.fr/en_US/projets/tous-les-projets/creche-herold-paris

The Martin Center for architectural and urban studies - Department of architecture - University of Cambridge. (1997). Project ZED (toward Zero Emission urban Development). Cambridge (U.K.): European Commission D.G. XII - Science, research and development.

Thomas, L., & Cousins, W. (1996). The compact city: A successful, desirable and achievable urban form? In *The compact city: A sustainable urban form?* (p. 53–65). Routledge. Consulté à l'adresse http://books.google.fr/books?hl=fr&lr=&id=ZAeZti784w4C&oi=fnd&pg=PA44&dq=Thomas,+L.,+%26+Cousins,+W.+(1996).+The+compact+city:+A+successful,+desirable+and+achievable+urban+form.&ots=1SdB-I-_Fx&sig=JMu5_b9PpstkeR-dAxWvWsvZr4U

TNS Sofres. (2007). *Les français et leur habitat, perception de la densité et des formes d'habitat (The French and their habitat, perception of density and urban forms of housing)*. Observatoire de la Ville. Consulté à l'adresse http://www.observatoire-de-la-ville.com/publications/les-etudes-tns-sofres.html

Tobler, W. R. (1970). A computer movie simulating urban growth in the Detroit region. *Economic geography*, *46*, 234–240.

Traisnel, J. P. (2001). Habitat et développement durable, bilan rétrospectif et prospectif (Habitat and sustainable development, retrospective and prospective review). *Les cahiers du CLIP*, *13*, 5–72.

Traisnel, J.-P. (2006). Cours Urbanisme et énergie - Quartiers durables.

Traisnel, J.-P., & Maïzia, M. (2004). Habitat et développement durable: les perspectives offertes par le solaire thermique. *Les cahiers du CLIP*, *16*, 5–72.

Tsai, Y. H. (2005). Quantifying urban form: Compactness versus' sprawl'. *Urban Studies*, *42*(1), 141.

Tufféry, S. (2010). *Data mining et statistique décisionnelle: L'intelligence des données*. Editions TECHNIP.

Twinn, C. (2003). BedZED. *Arup Journal*, *38*(1), 10–16.

U.S. Department of Energy. (2008). The smart grid : an introduction, DOE's Office of Electricity Delivery and Energy Reliability.

UN - Habitat. (2006). State of the world's cities 2006/7. United Nations Human Settlements Programme.

United States Environmental Protection Agency. (2008, octobre). Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies. Consulté à l'adresse http://www.epa.gov/heatisland/resources/compendium.htm

URBANET. (2001). Glossaire d'Urbanet (Urban Education Network). Consulté 10 juillet 2013, à l'adresse http://www.schole.it/urban-education.org/gloss/env_urb.html

Van de Coevering, P., & Schwanen, T. (2006). Re-evaluating the impact of urban form on travel patternsin Europe and North-America. *Transport policy*, *13*(3), 229–239.

Van Moeseke, G. (2012). Solar and Internal Gains in Low-Energy and Passive Houses. Présenté à PLEA 2012, Lima. Consulté à l'adresse http://dial.academielouvain.be/vital/access/services/Download/boreal:115270/PDF_01

Verburg, P. H., Schot, P. P., Dijst, M. J., & Veldkamp, A. (2004). Land use change modelling: current practice and research priorities. *GeoJournal*, *61*(4), 309–324.

Vettorato, D., Geneletti, D., & Zambelli, P. (2011). Spatial comparison of renewable energy supply and energy demand for low-carbon settlements. *Cities*, *28*(6), 557‑566. doi:10.1016/j.cities.2011.07.004

Viguié, V. (2012). *Urban dynamics modelling, application to economics assessment of climate change*. Université Paris-Est. Consulté à l'adresse http://www.centre-cired.fr/IMG/pdf/these-2.pdf

Viguié, V., & Hallegatte, S. (2010). Technical report on NEDUM model development. Consulté à l'adresse http://www.cnrm.meteo.fr/vurca/IMG/pdf/vurca_nedum_1d.pdf

Waddell, P., Borning, A., Noth, M., Freier, N., Becke, M., & Ulfarsson, G. (2003). Microsimulation of urban development and location choices: Design and implementation of UrbanSim. *Networks and Spatial Economics*, *3*(1), 43–67.

Wallemacq, V., Marique, A. F., & Reiter, S. (2011). Development of an urban typology to assess residential environmental performance at the city scale. *Plea 2011: Architecture & Sustainable Development'*, 119.

Wang, B. (2013). Les impacts de la morphologie urbaine sur le vent : performance d'énergie éolienne à l'échelle de quartier — Résumé de thèse. Consulté 29 août 2013, à l'adresse http://lra.toulouse.archi.fr/lra/activites/theses/Biao_Wang

Wang, W., Zmeureanu, R., & Rivard, H. (2005). Applying multi-objective genetic algorithms in green building design optimization. *Building and Environment*, *40*(11), 1512‑1525. doi:10.1016/j.buildenv.2004.11.017

Wegener, M. (2004). Overview of land-use transport models. *Handbook of transport geography and spatial systems*, *5*, 127–146.

Weidknnet, P. (2012). Cours de master 1 - Habitat social en Europe 1780 - 1980. ENSA Toulouse.

Wiederkehr, P., Gilbert, R., Crist, P., & Caïd, N. (2004). Environmentally Sustainable Transport (EST): Concept, Goal, and Strategy–The OECD's EST Project. *EJTIR*, *4*(1), 11–25.

Wines, J. (2008). *L'architecture verte*. Taschen.

Wong, N. H., Kardinal Jusuf, S., Aung La Win, A., Kyaw Thu, H., Syatia Negara, T., & Xuchao, W. (2007). Environmental study of the impact of greenery in an institutional campus in the tropics. *Building and Environment*, *42*(8), 2949‑2970. doi:10.1016/j.buildenv.2006.06.004

World Resources Institute. (1995). Environmental Indicators: A Systematic Approach to Measuring and Reporting on Environmental Policy Performance in the Context of Sustainable Development.

Yuan, C., Ng, E., & Chen, L. (2012). Optimizing natural ventilation performance at high-density cities by CFD and morphometric methods. In *8th International Conference on Urban Climate*. Dublin.

Liste des tableaux

Tableau 1 : Énergie primaire totale des matériaux de construction pour trois ensembles urbains (J. P. Traisnel, 2001)..... 32
Tableau 2 : Parts de la voirie dans la consommation d'énergie (construction initiale) par mètre carré de logement pour trois ensembles urbains (J. P. Traisnel, 2001)..... 32
Tableau 3 : Différents types de géothermie..... 43
Tableau 4 : Scénario technologique d'implantation de PAC pour des maisons individuelles (MI) et des immeubles collectifs (IC) (Maïzia, 2007b)..... 46
Tableau 5 : Données nécessaires pour la thermique du bâtiment..... 58
Tableau 6 : Résultats chiffrés de la modélisation avec PLEIADE COMFIE (Leroy, 2009)..... 60
Tableau 7 : Données nécessaires pour l'architecture bioclimatique..... 61
Tableau 8 : Données nécessaires pour l'approvisionnement et la distribution énergétique.. 64
Tableau 9 : Données nécessaires pour le microclimat urbain..... 67
Tableau 10 : Données nécessaires pour les réseaux de transports..... 70
Tableau 11 : Données nécessaires pour les urbanistes..... 73
Tableau 12 : Le paradoxe énergétique urbain – Tableau de synthèse..... 86
Tableau 13 : Effet de la densité urbaine sur les besoins énergétiques de la ville (Hui, 2001) 89
Tableau 14 : Concordance entre la modélisation synchronique de GENIUS et les objectifs fixés..... 127
Tableau 15 : Chiffres clés de densité de population à Toulouse et Paris (INSEE, 2009a, 2009c, 2010a, 2010b, 2013a, 2013b)..... 130
Tableau 16 : Chiffres clés du climat (Météo-France, 2010)..... 130
Tableau 17 : Comparaison des trois méthodes typologiques..... 136
Tableau 18 : Les sept quartiers types retenus..... 139
Tableau 19 : Correspondance entre les LCZ et nos quartiers types..... 140
Tableau 20 : Indicateurs statistiques pour quatre types de résolutions..... 142
Tableau 21 : Classement des maillages par pertinence selon quatre critères..... 145
Tableau 22 : Paramètres retenus pour caractériser le tissu urbain..... 157
Tableau 23 : Comparaison non exhaustive de logiciels SIG - réinterprétation d'après (Koussa, 2011)..... 166
Tableau 24 : Récapitulatif des méthodes de classification automatiques..... 178
Tableau 25 : Principaux logiciels de statistique et de traitement des données (Tufféry, 2010)..... 179
Tableau 26 : Paramètres retenus pour la classification automatique des mailles..... 185
Tableau 27 : Valeurs propres..... 186
Tableau 28 : Contribution des variables aux axes..... 187
Tableau 29 : Critères de décimation des groupes d'ilots..... 191
Tableau 30 : Caractéristiques des cinq groupes trouvés par la méthode ACP modifiée..... 191

Tableau 31 : Cinq groupes trouvés par la méthode k-means 193
Tableau 32 : Cinq groupes trouvés par la méthode des cartes de Kohonen 194
Tableau 33 : Table de contingence ACP / k-means 196
Tableau 34 : Table de contingence ACP / Kohonen 196
Tableau 35 : Table de contingence k-means / Kohonen 197
Tableau 36 : Comparaison des résultats obtenus pour les trois quartiers 199
Tableau 37 : Pourcentage de territoire attribué aux bureaux par rapport au territoire urbanisé total 205
Tableau 38 : Principales hypothèses pour les caractéristiques techniques des quartiers types 211
Tableau 39 : Correspondance entre les classes du MOS et les quartiers types 212
Tableau 40 : Corrélation par quartier type 214
Tableau 41 : Caractéristiques morphologiques des 7 types de quartiers 222
Tableau 42 : Scénarios technologiques 249
Tableau 43 : Évolution morphologique des quartiers 256
Tableau 44 : Coefficients a et b pour le calcul des hauteurs moyennes des quartiers 262
Tableau 45 : Indicateurs d'évaluation de la ville (Chouillou, 2012) 293
Tableau 46 : Traduction des scénarios systémiques en variables GENIUS et SLEDUM 302
Tableau 47 : Indicateurs d'expansion de Toulouse produits par SLEDUM 303
Tableau 48 : Récapitulatif des hypothèses et évolutions typologiques du scénario 1 310
Tableau 49 : Récapitulatif des mutations de type de quartier dans le scénario 1 310
Tableau 50 : Récapitulatif des hypothèses et évolutions typologiques du scénario 2 311
Tableau 51 : Récapitulatif des mutations de type de quartier dans le scénario 2 311
Tableau 52 : Récapitulatif des hypothèses et évolutions typologiques du scénario 3 312
Tableau 53 : Récapitulatif des mutations de type de quartier dans le scénario 3 312
Tableau 54 : Récapitulatif des hypothèses et évolutions typologiques du scénario 4 313
Tableau 55 : Récapitulatif des mutations de type de quartier dans le scénario 4 313
Tableau 56 : Récapitulatif des hypothèses et évolutions typologiques du scénario 5 314
Tableau 57 : Récapitulatif des mutations de type de quartier dans le scénario 5 314
Tableau 58 : Récapitulatif des hypothèses et évolutions typologiques des scénarios 6 et 7 315
Tableau 59 : Récapitulatif des mutations de type de quartier dans les scénarios 6 et 7 315
Tableau 60 : Récapitulatif des évolutions morphologiques 318
Tableau 61 : Traduction des scénarios systémiques en variables technologiques 321
Tableau 62 : Propriétés thermique des bâtiments selon les sept scénarios 322
Tableau 63 : Consommation de chauffage et de climatisation (kWh/m^2/an) 326
Tableau 64 : Premier jeu d'indicateurs agrégés (1) agrégation simple (2) agrégation par représentativité 337
Tableau 65 : Classement des scénarios selon 3 méthodes d'aide à la décision multicritère 340

Liste des figures

Figure 1 : Évolution des consommations d'énergie finale en France par secteur en million de tonnes équivalent pétrole (Commissariat général au développement durable, 2012b) 19
Figure 2 : Évolution des émissions de gaz à effet de serre en France par secteur en million de tonnes de CO_2 (Commissariat général au développement durable, 2009) 20
Figure 3 : Besoins énergétiques de chauffage pour plusieurs configurations de quartiers (Adolphe, 2001) 22
Figure 4 : Besoins de chauffage de trois morphologies urbaines en fonction de différentes performances d'isolation de l'enveloppe (J. P. Traisnel, 2001) 23
Figure 5 : Volumes passifs dans trois tissus urbains (Salat, 2011b) 24
Figure 6 : Illustration du volume passif sur une coupe (Ratti et al., 2005) 24
Figure 7 : Consommation de carburant et densité urbaine d'après (Newman & Kenworthy, 1989) (version française publiée par Frédéric Héran, 2001) 26
Figure 8 : Relation entre la structure spatiale et l'efficacité des transports publics d'après Bertaud (version publiée par Laigle, 2012) 29
Figure 9 : Différents éléments de l'énergie primaire totale ou énergie grise (Chevalier, 2010) 31
Figure 10 : Évolution de la consommation d'énergie primaire en millions de tonnes équivalent pétrole (Commissariat général au développement durable, 2013) 33
Figure 11 : Différents prospects (illustration de l'auteur) 36
Figure 12 : Différents facteurs de vue du ciel à Toulouse (Adolphe et al., 2002) 37
Figure 13 : Enveloppe solaire - à gauche : accès solaire aux façades Sud, A droite : accès solaire à toutes les façades (Capeluto & Shaviv, 2001) 37
Figure 14 : Trois des 6 types de l'étude (Cheng et al., 2006) 38
Figure 15 : Potentiel photovoltaïque en fonction de la densité bâtie brute pour les 6 types de quartiers (Cheng et al., 2006) 39
Figure 16 : Prototype du projet WEB (Campbell et al., 2001) 41
Figure 17 : Préconisation du projet WINEUR (Cace et al., 2007) 41
Figure 18 : Carte du potentiel de production d'énergie bois (Vettorato et al., 2011) 42
Figure 19 : Carte comparative entre besoins énergétiques et capacité de production d'énergies renouvelables (solaire, géothermique, biomasse, hydrologique) (Vettorato et al., 2011) 42
Figure 20 : Carte du potentiel énergétique en géothermie profonde du BRGM (Castello, 2004) 45
Figure 21 : Consommations et émissions de CO_2 globales avec et sans PAC selon une simulation statique établie sur le parc de logements existant en 2000 (Maïzia, 2007b) 46
Figure 22 : Projections du GIEC relatives au réchauffement à la surface du globe selon plusieurs scénarios (GIEC et al., 2008). 50

Figure 23 : Évolution de la température en deux points de Toulouse, le 25 février 2005 (Pigeon et al., 2008) 51
Figure 24 : Principaux facteurs et différentes échelles influençant l'intensité de l'îlot de chaleur urbain (illustration de l'auteur) 52
Figure 25 : Illustration du piégeage radiatif (Griffiths, 1976) 54
Figure 26 : Modification de l'évapotranspiration en milieu urbain (United States Environmental Protection Agency, 2008) 55
Figure 27 : Modélisation d'un bâtiment et de ses abords avec le logiciel PLEIADE COMFIE (Leroy, 2009) 59
Figure 28 : Évolution des températures dans deux zones thermiques durant la semaine la plus chaude de l'année et pour trois niveaux d'isolation des murs (Leroy, 2009) 59
Figure 29 : Illustration du projet de la crèche Hérold (Terreneuve Achitectes, 2010) 62
Figure 30 : Vitrage en premier et second jour pour favoriser l'éclairage naturel (Cabinet de conseil Utopies, 2007) 63
Figure 31 : Protections solaires (Cabinet de conseil Utopies, 2007) 63
Figure 32 : Modélisation de BEDZED avec le logiciel SUNTOOL (Stankovic, 2006) 64
Figure 33 : Besoins de chaleur pour BEDZED pour un jour représentatif de chaque mois (kWh/m2/an) (Stankovic, 2006) 65
Figure 34 : Besoins d'électricité pour BEDZED pour un jour représentatif de chaque mois (kWh/m2/an) (Stankovic, 2006) 65
Figure 35 : Taux de couverture des besoin par des sources renouvelable – Dimensionnement de l'usine de cogénération sur les besoin d'eau chaude sanitaire (Stankovic, 2006) 66
Figure 36 : Taux de couverture des besoin par des sources renouvelable – Dimensionnement de l'usine de cogénération sur les besoin d'électricité (Stankovic, 2006) 66
Figure 37 : Quatre cas d'aménagement (A) situation actuelle (B) la foret est remplacée par des bâtiments (C) aucune végétation (D) végétalisation de tous les espaces libres 68
Figure 38 : Températures nocturnes simulées par ENVI-MET pour les quatre cas d'aménagement (A) situation actuelle (B) aucune végétation (C) la foret est remplacée par des bâtiments (D) végétalisation de tous les espaces libres 69
Figure 39 : Carte synthétique des contraintes climatiques en automne (Potvin, Demers, DuMontier, & Giguère-Duval, 2012) 72
Figure 40 : Ensoleillement du centre ancien de Foix le 20 mars (Assassin, 2013) 75
Figure 41 : Plan d'aménagement du centre ancien de Foix (Assassin, 2013) 76
Figure 42 : Vue de l'aménagement du centre ancien de Foix (Assassin, 2013) 76
Figure 43 : Assiette de calcul des densités brute et nette (Moulinié & Naudin-Adam, 2005b) 78
Figure 44 : Trois formes urbaines différentes avec des densités de population identiques (Moulinié & Naudin-Adam, 2005b) 79
Figure 45 : Formes urbaines et densités (illustration de l'auteur) 81
Figure 46 : Simplification des formes urbaines au cours du temps (Salat, 2011b) 82

Figure 47 : Le paradoxe énergétique urbain et la densité de la ville – Représentation simplifiée (illustration de l'auteur) 85
Figure 48 : Évolution des consommation d'éclairage, de chauffage et de climatisation en fonction de l'angle d'obstruction entre bâtiments de bureaux (Steemers, 2003) 90
Figure 49 : Caractéristiques des cinq villes de l'étude (Martilli, 2012) 91
Figure 50 : Consommation de transport, de climatisation et indice de confort pour différentes densités de population (Martilli, 2012) 91
Figure 51 : Le concept Core-Skin-Shell (illustration de l'auteur d'après (Arantes et al., 2010)) 92
Figure 52 : Structures fractales idéalisées et structure fractale de la ville (Salat, 2011a) 93
Figure 53 : Sondage APUMP – Parmi les thématiques environnementales suivantes, quelles sont celles auxquelles vous êtes sensibles ? 97
Figure 54 : Sondage APUMP – Dans le cas où ces thématiques ne sont pas prise en compte dans votre pratique professionnelle, quelles en sont les raisons ? 97
Figure 55 : Effet de différents systèmes de climatisation sur l'ilot de chaleur urbain (de Munck et al., 2013) 101
Figure 56 : Échelles des problématiques énergétiques (illustration de l'auteur) 105
Figure 57 : Étude typo-énergétique de Christen : Consommation énergétique de cinq des douze types de bâtiments en fonction des cinq tailles de bâtiments 108
Figure 58 : La « Spacematrix » de Berghauser-Pont et Haupt permet de classer un quartier en fonction de ses caractéristiques morphologiques 109
Figure 59 : Typologies LCZ de Stewart et Oke 110
Figure 60 : Classification des modèles prospectifs urbains (illustration de l'auteur) 113
Figure 61 : Croissance urbaine simulée par un modèle DLA avec le modèle SMArtUrb (Banos & Sanders, 2012) 114
Figure 62 : Exemple de l'évolution de Paris réelle (noir) et simulée par NEDUM (vert) entre 1900 et 2008 117
Figure 63 : Exemple de l'évolution de densité de population dans Paris -Réelle (gris) et simulée par NEDUM (vert) 118
Figure 64 : Logo de GENIUS 122
Figure 65 : Synthèse des objectifs de la modélisation synchronique de GENIUS (illustration de l'auteur) 123
Figure 66 : Synthèse des objectifs de la modélisation diachronique de GENIUS (illustration de l'auteur) 124
Figure 67 : Modélisation synchronique - Schéma de principe (illustration de l'auteur) 126
Figure 68 : Modélisation diachronique - Schéma de principe(illustration de l'auteur) 128
Figure 69 : Emprises des zones d'étude (illustration de l'auteur) 131
Figure 70 : Familles de références de l'APUR (Atelier Parisien d'URbanisme, 2007) 133
Figure 71 : Ilots simplifiés du projet ZED 134

Figure 72 : Paramètres descriptifs d'une typologie urbaine – Structure de l'arbre (illustration de l'auteur) 150
Figure 73 : Paramètres descriptifs d'une typologie urbaine – Axe « Bâtiment » (1) (Tsai, 2005), (2) (Adolphe et al., 2002), (3) (Long & Kergomard, 2005), (5) (AUCAME, 2010), (7) (Atelier Parisien d'URbanisme, 2007), (8) (Moulinié & Naudin-Adam, 2005b) et (9) (Salat, 2011a) 151
Figure 74 : Paramètres descriptifs d'une typologie urbaine – Axe « Bloc » (2) (Adolphe et al., 2002), (3) (Long & Kergomard, 2005), (4) (Fouad, 2007), (7) (Atelier Parisien d'URbanisme, 2007), et (9) (Salat, 2011a) 152
Figure 75 : Paramètres descriptifs d'une typologie urbaine – Axe « Découpage foncier » (2) (Adolphe et al., 2002), (3) (Long & Kergomard, 2005), (4) (Fouad, 2007), (5) (AUCAME, 2010), (6) (Communauté métropolitaine de Québec, 2010), (7) (Atelier Parisien d'URbanisme, 2007), (8) (Moulinié & Naudin-Adam, 2005b) et (9) (Salat, 2011a) 153
Figure 76 : Paramètres descriptifs d'une typologie urbaine – Axe « Espace public» (2) (Adolphe et al., 2002), (3) (Long & Kergomard, 2005), (4) (Fouad, 2007), (5) (AUCAME, 2010), (6) (Communauté métropolitaine de Québec, 2010), (7) (Atelier Parisien d'URbanisme, 2007), (8) (Moulinié & Naudin-Adam, 2005b) et (9) (Salat, 2011a) 154
Figure 77 : Paramètres descriptifs d'une typologie urbaine – Axe « Insertion dans le tissu urbain» (1) (Tsai, 2005), (2) (Adolphe et al., 2002), (3) (Long & Kergomard, 2005), (4) (Fouad, 2007), (5) (AUCAME, 2010), (6) (Communauté métropolitaine de Québec, 2010), (7) (Atelier Parisien d'URbanisme, 2007), (8) (Moulinié & Naudin-Adam, 2005b) et (9) (Salat, 2011a) 155
Figure 78 : Emboitement des échelles (illustration de l'auteur) 155
Figure 79 : Exemple de Toolbox 167
Figure 80 : Exemple du calcul de paramètre « compacité » pour un maillage de 250 mètres pas 250 mètres de la commune de Paris (illustration de l'auteur) 168
Figure 81 : Différentes méthodes de classification automatiques (illustration de l'auteur) 170
Figure 82 : Principe de la classification par ACP sur deux axes (illustration de l'auteur) 172
Figure 83 : Principe de la classification ascendante hiérarchique (illustration de l'auteur) 174
Figure 84 : Principe de la méthode des centres mobiles (illustration de l'auteur) 175
Figure 85 : Schéma d'un neurone réel et d'un neurone formel (illustration de l'auteur d'après (Larose, 2005)) 176
Figure 86 : Exemple d'un petit réseau de neurones (illustration de l'auteur d'après (Larose, 2005)) 177
Figure 87 : Graphiques de corrélations 183
Figure 88 : Projection des mailles sur les deux premiers axes de l'ACP (illustration de l'auteur) 188
Figure 89 : Échelle de densité bâtie brute pour les typologies de la région (Moulinié & Naudin-Adam, 2005a) 189

Figure 90 : Projection des mailles sur l'axe 1 et un axe figurant la densité bâtie brute (illustration de l'auteur) 190
Figure 91 : Répartition des classes de l'ACP en fonction de la densité bâtie brute (abscisse) et de la hauteur (ordonnée) (illustration de l'auteur) 192
Figure 92 : Répartition des classes k-means en fonction de la densité bâtie brute (abscisse) et de la hauteur (ordonnée) (illustration de l'auteur) 193
Figure 93 : Répartition des classes des cartes de Kohonen en fonction de la densité bâtie brute (abscisse) et de la hauteur (ordonnée) (illustration de l'auteur) 195
Figure 94 : Illustration des inerties totale, intra-classes et inter-classes (illustration de l'auteur) 198
Figure 95 : Carte obtenue pour Paris et son agglomération (illustration de l'auteur) 200
Figure 96 : Carte obtenue pour Paris (illustration de l'auteur) 201
Figure 97 : Répartition des usages dans Paris et les communes environnantes (illustration de l'auteur) 205
Figure 98 : Répartition des emplois dans Paris et les communes environnantes (INSEE, 2009b) 206
Figure 99 : Les six grandes périodes passées de construction (illustration de l'auteur) 207
Figure 100 : Rénovation et réglementation thermique (Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie, 2007) 209
Figure 101 : Carte de validation de la zone d'étude (illustration de l'auteur) 213
Figure 102 : Carte de validation de la zone bâtie (illustration de l'auteur) 214
Figure 103 : Diagramme d'analyse croisée des erreurs (illustration de l'auteur) 216
Figure 104 : illustration du type de quartier « pavillon discontinu » (illustration de l'auteur) 217
Figure 105 : illustration du type de quartier « pavillon continu » (illustration de l'auteur) .. 218
Figure 106 : illustration du type de quartier « immeuble discontinu » (illustration de l'auteur) 219
Figure 107 : illustration du type de quartier « immeuble continu » (illustration de l'auteur) 219
Figure 108 : illustration du type de quartier « centre ancien » (illustration de l'auteur) 220
Figure 109 : illustration du type de quartier « immeuble de grande hauteur » (illustration de l'auteur) 220
Figure 110 : illustration du type de quartier « bâtiment d'activités » (illustration de l'auteur) 221
Figure 111 : Extension multipolaire de Toulouse avec SLEDUM entre 2010 (en gris) et 2100 (en noir) 238
Figure 112 : Évolution des consommation d'énergie primaire entre 1972 et 2020 d'après un scénario tendanciel (Giraud, 1999) 240
Figure 113 : Principe de transformation d'une trame urbaine de grands ensembles (Darley & Zunino, 2010) 244

Figure 114 : Principe de transformation d'une trame pavillonnaire (Darley & Zunino, 2010) 245
Figure 115 : Exemples de mutations des tissus urbains pavillonnaires (Darley & Zunino, 2010) 245
Figure 116 : Résumé des mutations possibles entre types de logement (illustration de l'auteur) 247
Figure 117 : Attribution des types de quartier en fonction de la densité (illustration de l'auteur) 252
Figure 118 : Attribution des types de quartier en fonction de la densité – Scénario « formes urbaines compactes » (illustration de l'auteur) 253
Figure 119 : Attribution des types de quartier en fonction de la densité – Scénario « formes urbaines verticales » (illustration de l'auteur) 254
Figure 120 : Organigramme simplifié de calcul des paramètres (illustration de l'auteur) 257
Figure 121 : Hauteur moyenne des bâtiments en fonction de la densité bâtie brute – Pavillons discontinus (illustration de l'auteur) 258
Figure 122 : Hauteur moyenne des bâtiments en fonction de la densité bâtie brute – Pavillons continus (illustration de l'auteur) 258
Figure 123 : Hauteur moyenne des bâtiments en fonction de la densité bâtie brute – Immeubles discontinus (illustration de l'auteur) 259
Figure 124 : Hauteur moyenne des bâtiments en fonction de la densité bâtie brute – Centre ancien (illustration de l'auteur) 259
Figure 125 : Hauteur moyenne des bâtiments en fonction de la densité bâtie brute – Immeubles continus (illustration de l'auteur) 260
Figure 126 : Hauteur moyenne des bâtiments en fonction de la densité bâtie brute – Immeubles de grande hauteur (illustration de l'auteur) 261
Figure 127 : Hauteur moyenne des bâtiments en fonction de la densité bâtie brute – Bâtiments d'activités (illustration de l'auteur) 261
Figure 128 : Les grandes périodes de construction envisagées (illustration de l'auteur) 264
Figure 129 : Attribution des types pour les quartiers dont l'année majoritaire de construction est supérieure à 1949 (illustration de l'auteur) 268
Figure 130 : Comparaison des cartes initiales en 1962 (à gauche) et en 2008 (à droite) (illustration de l'auteur) 269
Figure 131 : Calcul de la densité bâtie par pas de temps – schéma de principe (illustration de l'auteur) 270
Figure 132 : Validation graphique – types d'ilots 272
Figure 133 : Validation graphique - différentiel des types (illustration de l'auteur) 273
Figure 134 : Validation ciblée sur le Front de Seine (illustration de l'auteur) 276
Figure 135 : Validation ciblée sur Champs-sur-Marne (illustration de l'auteur) 277
Figure 136 : Validation ciblée sur La Défense (illustration de l'auteur) 278

Figure 137 : Méthode générale des projets ACCLIMAT et MUSCADE (illustration de l'auteur) 288
Figure 138 : Méthode de définition des scénarios (illustration de l'auteur) 290
Figure 139 : Scénario systémique 1 « ville réactive » 295
Figure 140 : Scénario systémique 2 « ville réfléchie » 296
Figure 141 : Scénario systémique 3 « ville dynamique » 297
Figure 142 : Scénario systémique 4 « ville verte » 298
Figure 143 : Scénario systémique 5 « ville en crise» 299
Figure 144 : Scénario systémique 6 « ville passive» 299
Figure 145 : Scénario systémique 7 « ville climatiquement néfaste» 300
Figure 146 : Évolution de Toulouse selon SLEDUM entre 2010 (en gris) et 2100 (en rouge) 304
Figure 147 : Toulouse en 2010 selon GENIUS : répartition des types de quartier sur la ville (trait plein) et sur le pôle urbain (trait pointillé) 308
Figure 148 : Toulouse en 2100 selon GENIUS : répartition des types de quartier sur la ville (trait plein) et sur le pôle urbain (trait pointillé) 309
Figure 149 : Légende du Tableau 63 325
Figure 150 : Ilot de chaleur urbain moyen en été (°C) sur la commune de Toulouse (trait plein) et sur le pôle urbain toulousain (trait pointillé) – illustration de l'auteur à partir des données du projet ACCLIMAT 328
Figure 151 : Profil de l'ilot de chaleur urbain moyen en été à Toulouse (illustration de l'auteur) 330
Figure 152 : Profil des ilots de chaleur urbain moyen en été à Toulouse (illustration de l'auteur) 334
Figure 153 : Diagramme parallèle pour l'analyse multicritère des scénarios (illustration de l'auteur) 338
Figure 154 : Diagrammes radars pour l'analyse multicritère des scénarios (illustration de l'auteur) 339
Figure 155 : Analyse des scénarios selon deux critères (illustration de l'auteur) 341
Figure 156 : Analyse des scénarios selon les critères énergie et climat (illustration de l'auteur) 342
Figure 157 : Méthode générale du projet EPICURE (illustration de l'auteur) 349
Figure 158 : Méthode du projet MApUCE (illustration de l'auteur) 353
Figure 159 : Exemple de courbe de Pareto 370

Annexes

Annexe 1 : Questionnaire 416

Annexe 2 : Analyse bibliographique des paramètres de la forme urbaine 427

Annexe 3 : Principe de calcul du coefficient de corrélation de Pearson 443

Annexe 4 : Matrice de corrélation des paramètres 444

Annexe 5 : Détail des méthodes de classification 447

Annexe 6 : Origines des erreurs d'identification dans la carte initiale de GENIUS 456

Annexe 7 : Validation chiffrée de GENIUS sur le passé 462

Annexe 8 : Simplification morphologique des formes futures 470

Annexe 9 : Fiches bilan ACCLIMAT 479

Annexe 10 : Méthode ELECTRE III 507

Annexe 11 : Exemples d'habitat intermédiaire 508

Annexe 12 : Utilisation de GENIUS pour l'évaluation du potentiel solaire 512

Annexe 13 : Méthode du projet EPICURE 538

Annexe 14 : Méthode du projet MApUCE 542

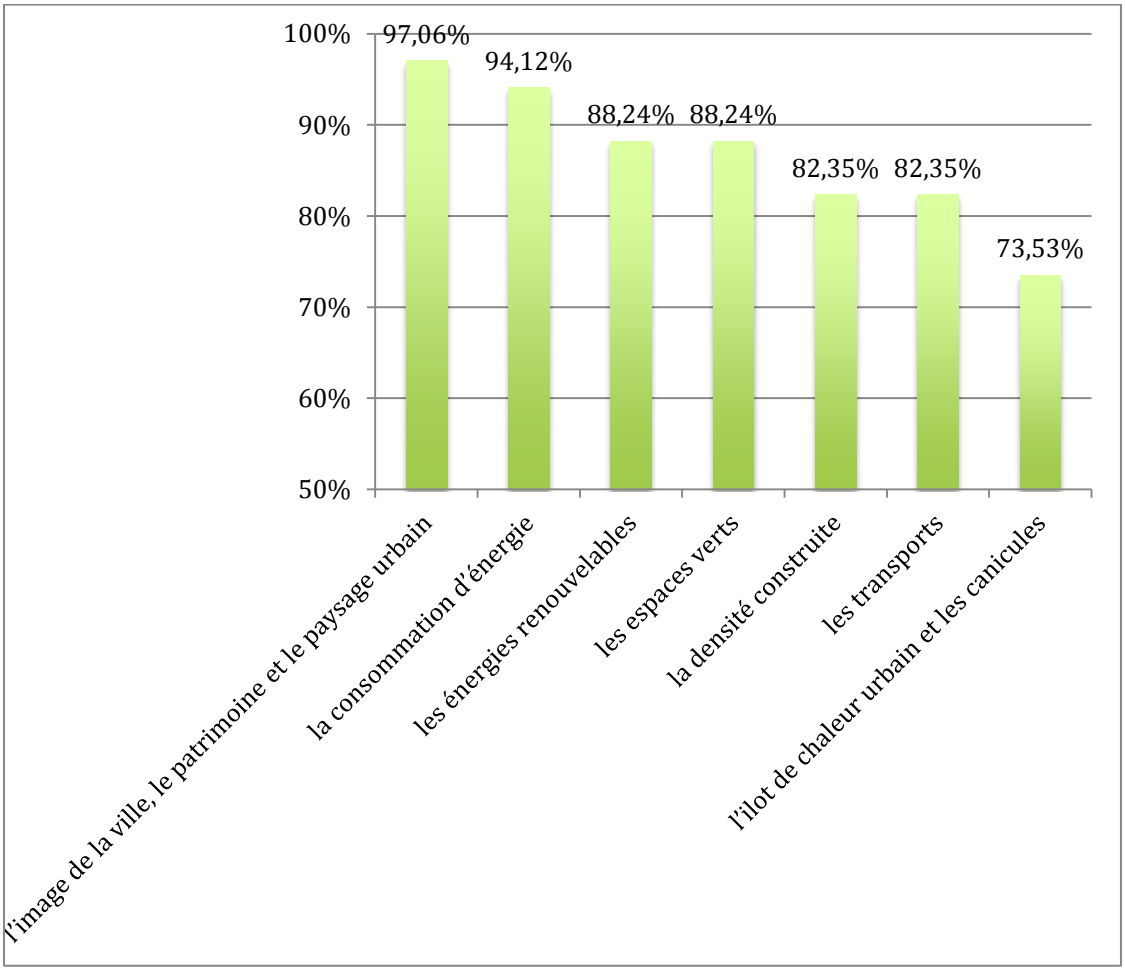
Annexe 1 : Questionnaire

Ce questionnaire se divise en deux parties. La première se concentre sur les attentes des urbanistes vis-à-vis d'un outil d'aide à la décision pour la prise en compte de problématiques environnementales dans la planification urbaine. La deuxième partie à pour objectif la validation des nos hypothèses concernant les quartiers types et leurs évolutions.

Ce questionnaire n'a été soumis qu'aux urbanistes adhérant APUMP (Association des Professionnels de l'Urbanisme de Midi-Pyrénées). L'échantillon est de 25 réponses pour 150 envois.

Questionnaire - Partie 1

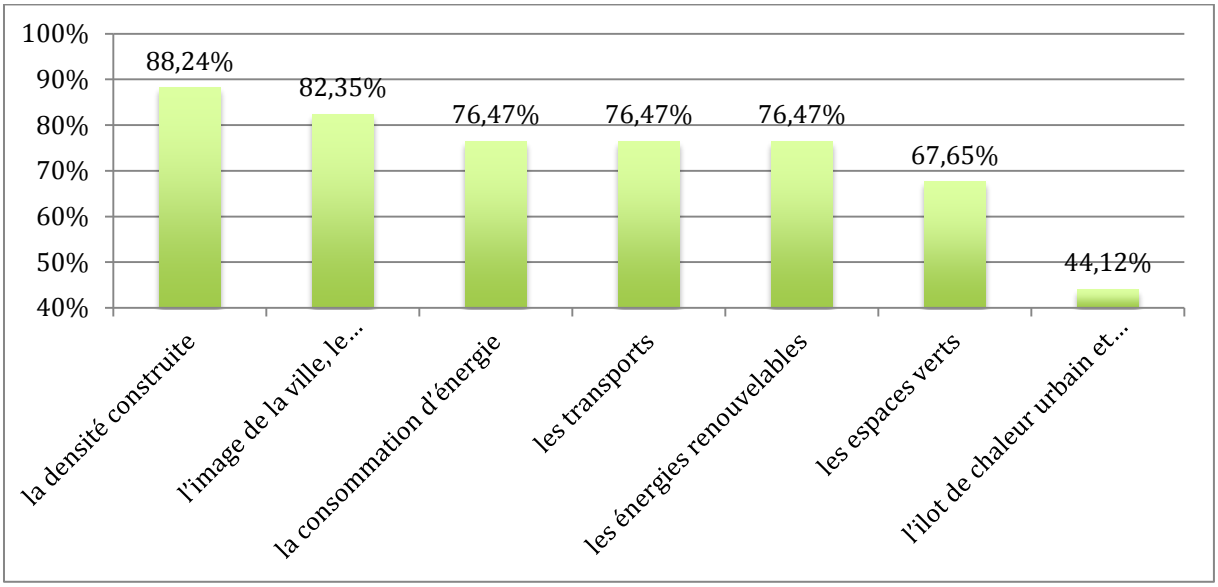
Êtes-vous sensible aux questions environnementales suivantes ?



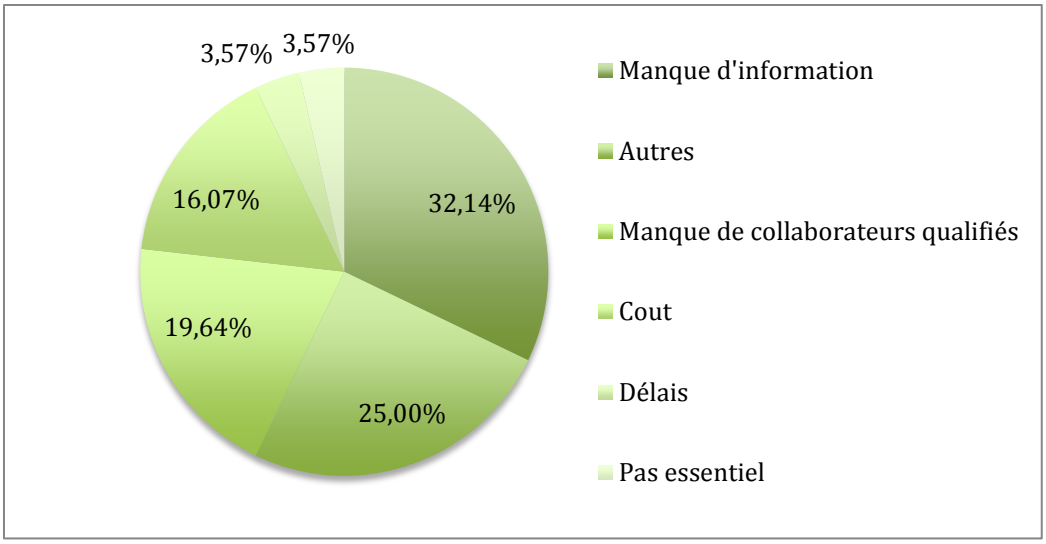
Autres suggestions :

- Gestion de l'eau dans les espaces urbains
- Déplacements doux
- Usages et qualité de vie, Ambiances et la convivialité, Mixité sociale et fonctionnelle
- Biodiversité
- Coût global et choix des matériaux
- Ambiances sonores urbaines
- Maîtrise de l'étalement urbain
- Amélioration des paysages périurbains
- Distance emploi / habitat

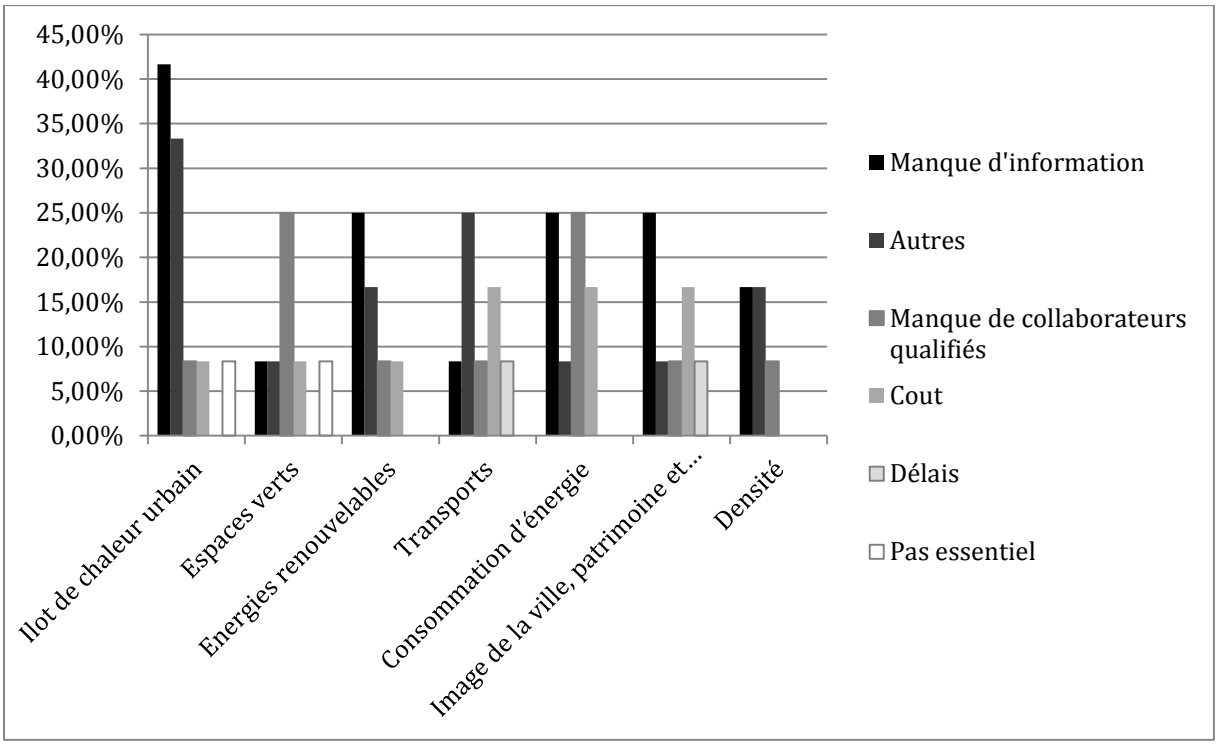
Prenez-vous en compte ces questions dans votre pratique professionnelle ?



Si les points ci-dessous ne sont pas pris en compte, quelle en est la raison ?



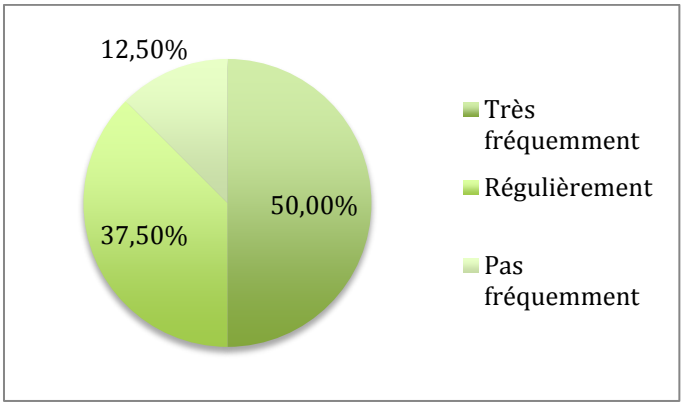
Remarque : C'est sur les sujets les moins traités, comme l'ilot de chaleur urbain, que le manque d'information est majoritairement évoqué.



Quel(s) outil(s) utilisez-vous pour prendre en compte ces problématiques ?

Les outils SIG sont les plus cités.
On retrouve aussi : Modélisation thermique du bâtiment, CFD, formation.

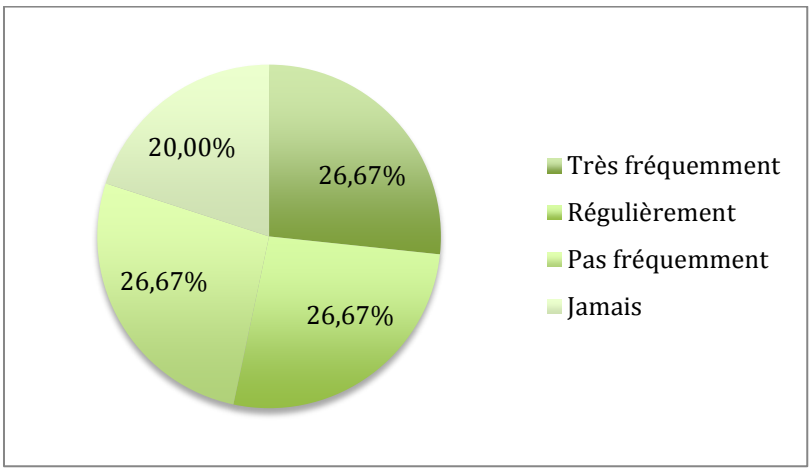
Utilisez-vous des Bases de Données Urbaines (BDU) ?



Si oui, précisez lesquelles :

Les bases de données de l'IGN sont principalement citées : photo aériennes, BD Topo, MNT, MNE, BD ortho, Carte IGN. L'outil géoportail est fréquemment cité.
Les photos aériennes de sources diverses, en particulier celles issues des bases de données de Google Earth.
La base de données INSEE apparait également.

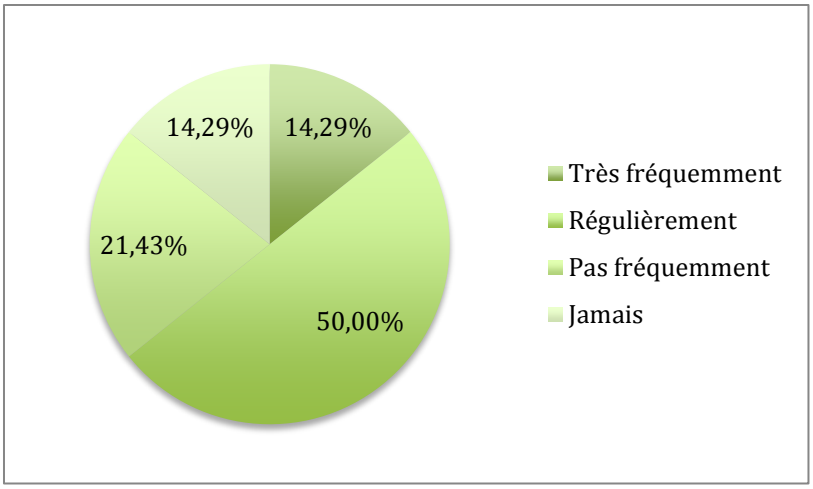
Utilisez-vous des logiciels SIG ?



Si oui, précisez lesquels :

MapInfo, ArcView, GvSig, SIG internes aux organismes.

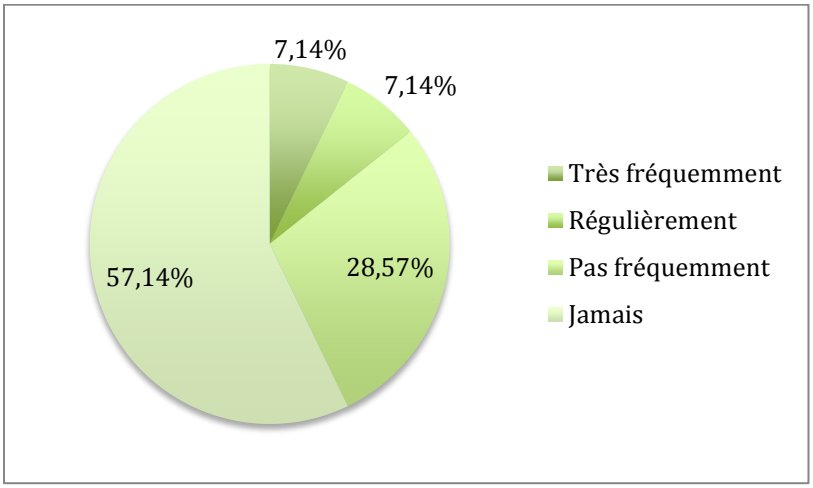
Avez-vous recours à des AMO (Assistant à Maitrise d'Ouvrage) ou à des bureaux d'études ?



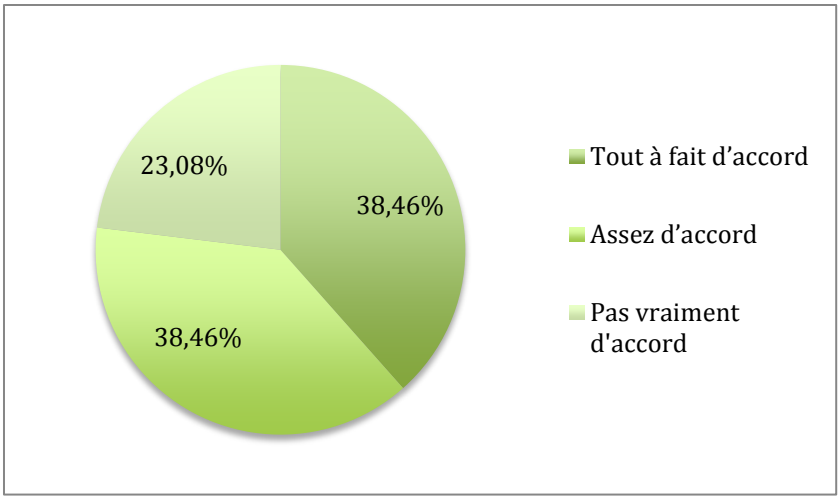
Si oui, précisez dans quel domaine :

- Aménagement urbain
- Aménagement de ZAC
- Planification règlementaire
- Patrimoine
- VRD
- Environnement
- Déplacements
- Gestion de l'eau

Utilisez-vous des outils d'aide à la décision ?



Si vous n'en utilisez pas déjà un, seriez-vous intéressé par un outil d'aide à la décision lié aux problématiques environnementales :



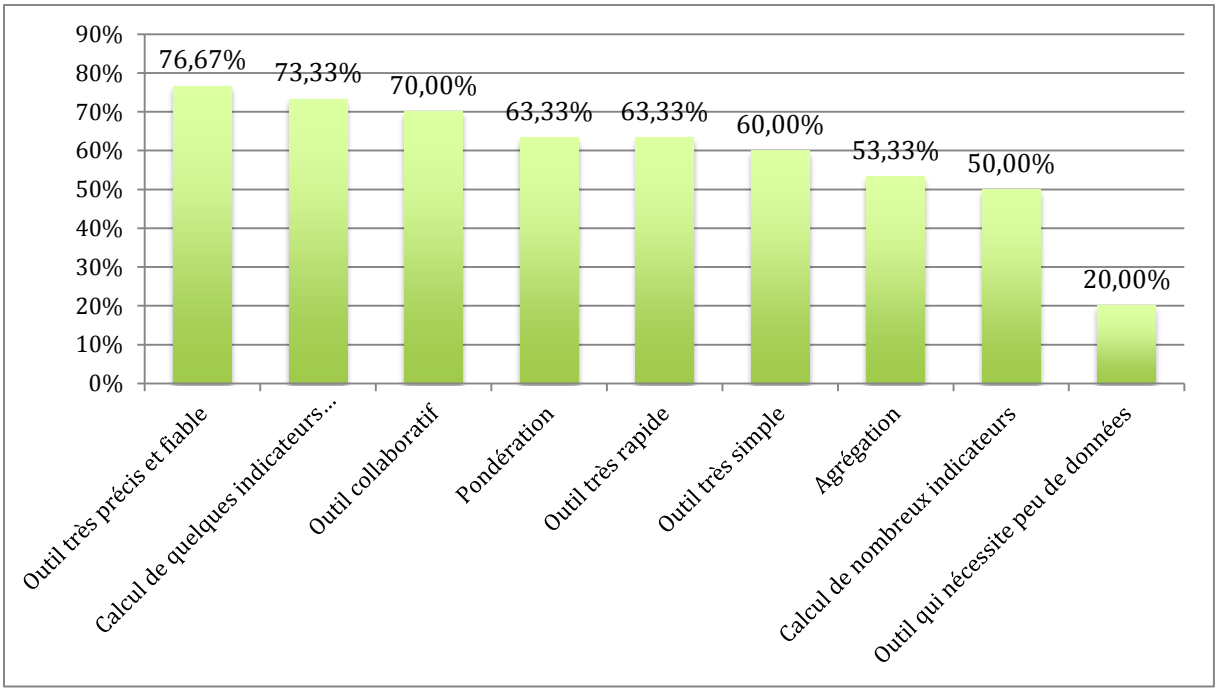
Si oui, quelles thématiques pourraient être traitées dans cet outil :

- Evaluer les performances énergétiques des quartiers et des équipements publics (chauffage, climatisation, confort dans les espaces publics et dans le bâtiment…)
- Evaluer la production énergétique décentralisée de quartiers
- Cibler les zones à densifier ou à préserver,
- Diagnostiquer les systèmes de transport en zone urbaine, péri urbaine et rurale.
- Aider à l'implantation des équipements publics.
- Qualifier les espaces urbains
- Zones à végétaliser

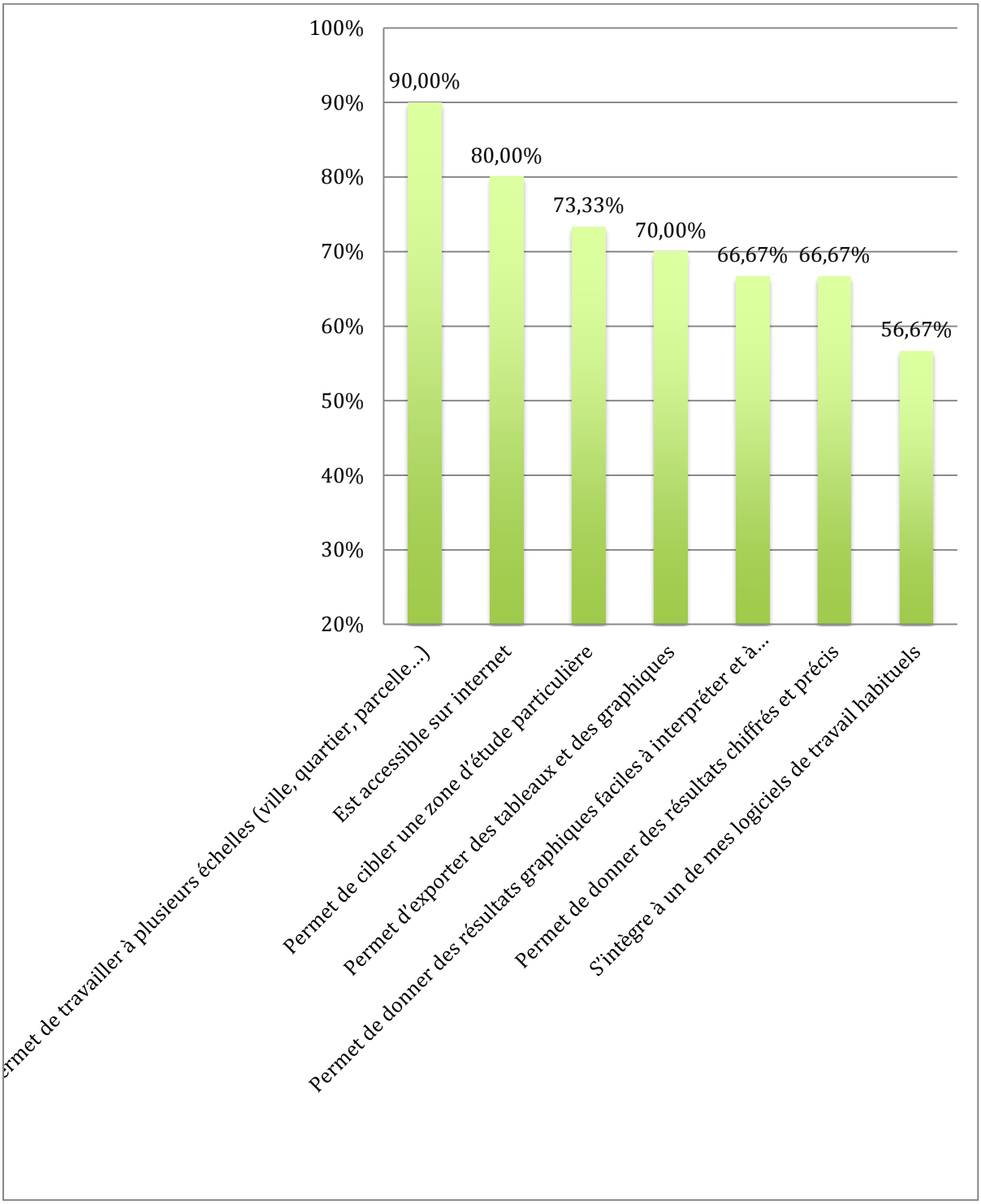
- Approches intégrées

Notons que le diagnostic des zones sensibles à la canicule, pourtant proposé en exemple, n'a suscité aucune sollicitation.

Selon vous, un outil est une bonne aide à la décision s'il remplit les critères suivants :


90%
80%
70%
60%
50%
40%
30%
20%
10%
0%
76,67%
73,33%
70,00%
63,33%
63,33%
60,00%
53,33%
50,00%
20,00%
Outil très précis et fiable
Calcul de quelques indicateurs…
Outil collaboratif
Pondération
Outil très rapide
Outil très simple
Agrégation
Calcul de nombreux indicateurs
Outil qui nécessite peu de données

Dans l'idéal, l'interface de l'outil aura les qualités suivantes :

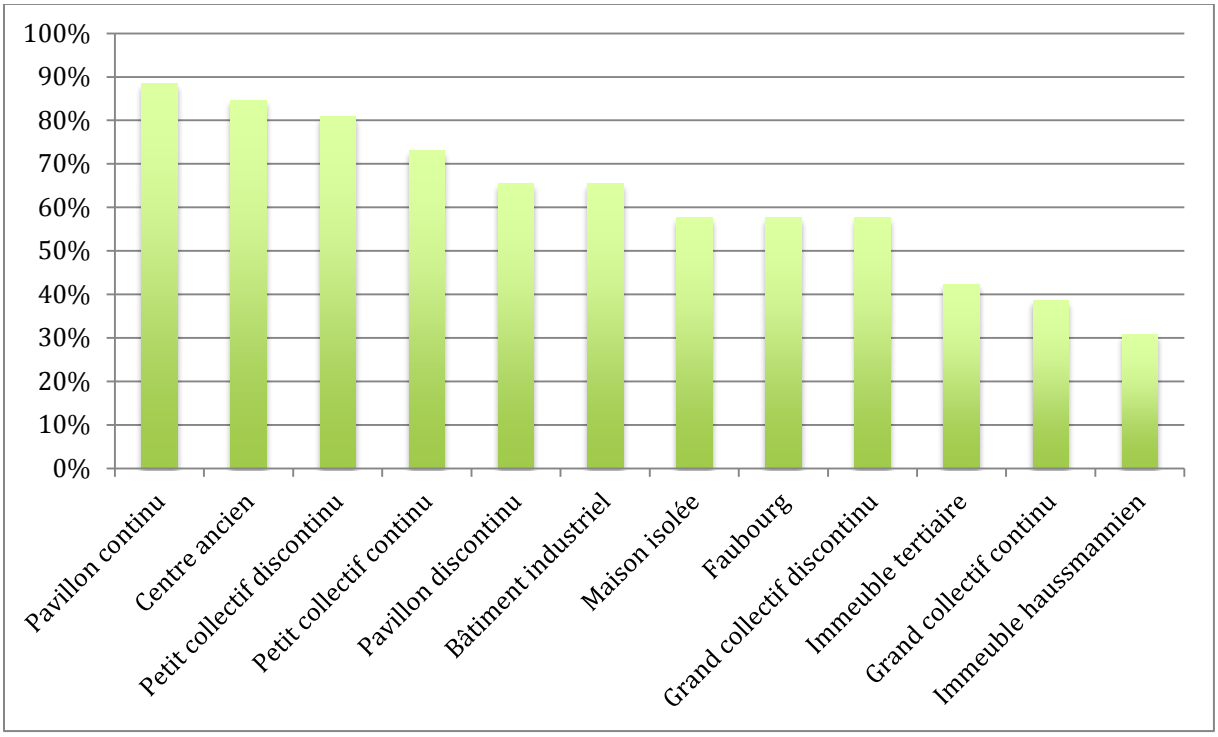


Questionnaire - Partie 2

En analyse urbaine, on a souvent recours à des « typologies » : des types de bâtiments représentatifs d'un ensemble de bâtiments. Dans votre ville, quelles typologies vous semblent pertinentes :

Les pourcentages présentés ici sont des pourcentages pondérés. On a attribué les pondérations suivantes :

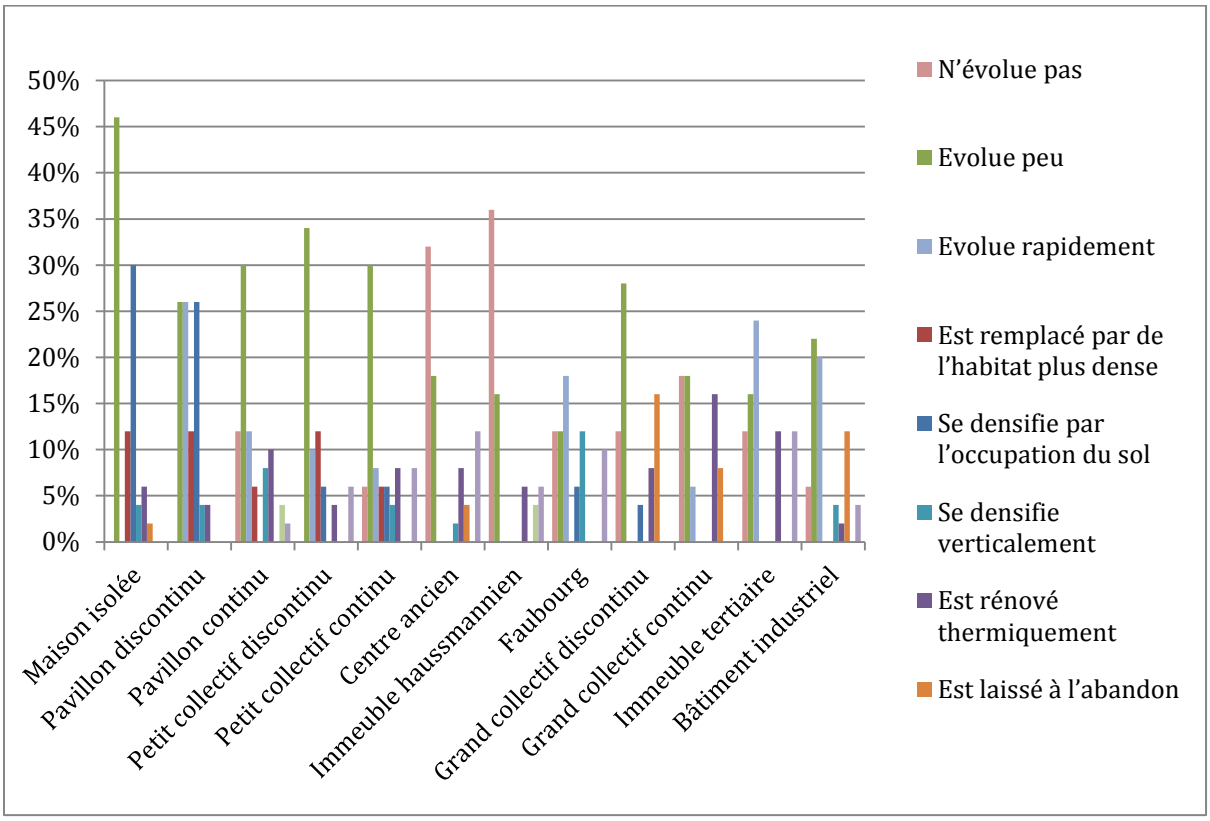
Réponse	Pondération
Tout à fait d'accord	2
Assez d'accord	1
Pas vraiment d'accord	- 1
Pas du tout d'accord	- 2



Les typologies que nous avons choisies semblent remporter l'adhésion des sondés (cf. tableau ci-dessous). Seul le type « immeuble de grande hauteur » ne ressort pas clairement. Cela peut être du à l'ambigüité du terme (qui désigne à la fois les grands immeubles d'habitat collectif et les grands immeubles tertiaires), mais également au contexte de la région Midi-Pyrénées et de la ville de Toulouse où on retrouve très peu d'immeubles de grande hauteur.

Typologies proposées pour GENIUS	Pourcentage d'adhésion
- Pavillon continu,	88,46%
- Pavillon discontinu,	65,38%
- Immeuble continu,	73,08% (Petit collectif continu)
- Immeuble discontinu,	80,77% (Petit collectif discontinu)
- Immeuble de grande hauteur,	57,69% (Grand collectif discontinu) 42,31% (Immeuble tertiaire)
- Centre ancien,	84,62%
- Bâtiment industriel ou commercial.	65,38%

Dans votre pratique professionnelle, quelles évolutions avez-vous observé pour ces formes urbaines ?

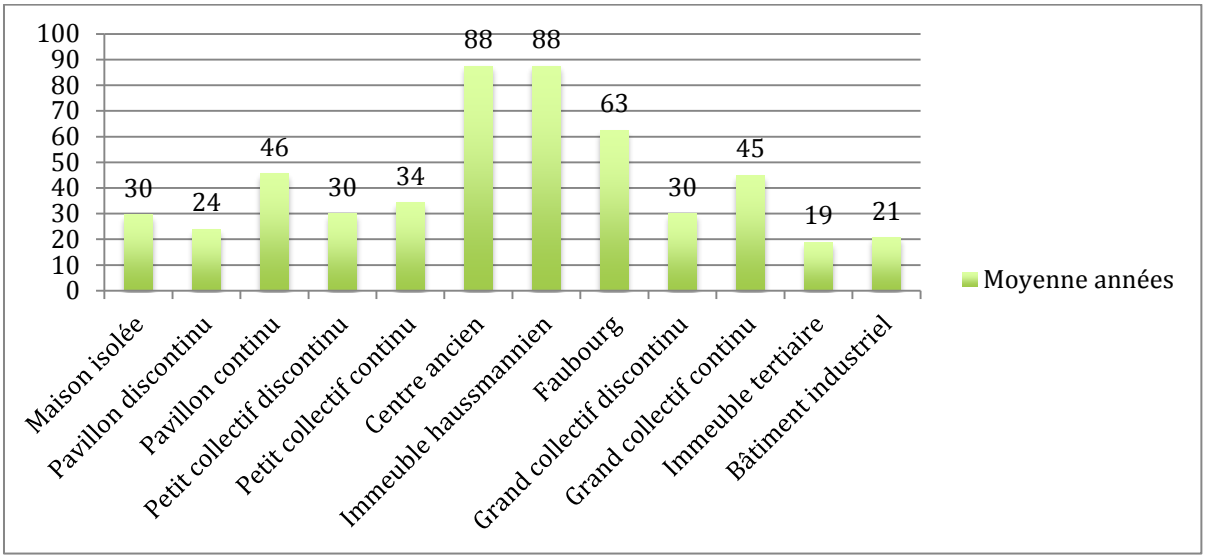


Les résultats sont difficiles à analyser car certaines réponses peuvent sembler contradictoires. On retiendra cependant quelques grandes lignes :

Les maisons isolées ou pavillons discontinus se densifient par l'occupation des sols, et sont la seule typologie pour laquelle se détache ce type d'évolution.Le pavillon continu, le petit collectif discontinu, le petit collectif discontinu et le grand collectif discontinu évoluent peu.

Le centre ancien et en particulier l'haussmannien n'évoluent pas.

Dans votre pratique professionnelle, avez-vous pu observer que ces évolutions ont lieux après des durées de vie plus ou moins longues des bâtiments :



Les résultats ci-dessous nous permettent d'évaluer les temps d'évolution d'un même type d'ilot. Même s'ils sont difficiles à exploiter en tant que tels (en raison de la multiplicité des évolutions considérées) ces résultats nous confirme que certains types ont tendance à changer plus rapidement que d'autres. C'est cette priorité des évolutions que nous avons pris en compte.

Annexe 2 : Analyse bibliographique des paramètres de la forme urbaine

Fouad, « Morphologie urbaine et confort thermique dans les espaces publics: étude comparative entre trois tissus urbains de la ville de Québec » (Fouad, 2007)	
Densité bâtie	Rapport de la surface totale de l'emprise des bâtis au sol à la surface totale du périmètre de calcul considéré.
Densité végétale	Rapport de la distribution horizontale de tous les aménagements urbains verts (parcs végétaux, jardins, arbres, ... etc.) et à la surface totale du périmètre de calcul. Pas de distinction entre espace public et privé.
Facteur vue du ciel	Mesure de l'angle solide sous lequel le ciel est vu depuis un espace urbain. TSKv varie entre 0 et 1 ; où TSKY de 1 signifie que la vue du ciel est dépourvue de toute obstruction (bâtiment, arbre, mobilier urbain, ...etc.). En revanche, un TSKY de 0 signifie que la vue du ciel est totalement obstruée.
Degree of enclosure	Rapport entre le nombre total des surfaces (ouvertes et fermées) et le nombre total des surfaces ouvertes (Steemers et al, 2004). Le DOE varie entre 6 et 1, où 6 signifie un espace avec une seule surface ouverte, par contre un DOE de 0 signifie que toutes les surfaces sont ouvertes (Parc).
Rugosité urbaine	Rapport de la hauteur moyenne de la canopée urbaine (Sacré 1998: 1.5 fois la hauteur moyenne des bâtiments), constituée par les surfaces bâties, les surfaces végétales verticales et horizontales, à la surface non bâtie (Adolphe, 1999).
Porosité urbaine.	Volume total d'air des creux urbains et leur rapport avec le volume de la canopée urbaine (Steemers, et Steane, 2004).
Prospect moyen.	Rapport entre la hauteur moyenne de l'espace et sa largeur.
Albédo moyen des surfaces	Pourcentage d'occupation de chaque matériau présent sur 2 photos fish eye (prises au centre d'une rue) multiplié par leur albédo.

Agence d'étude d'urbanisme de Caen-Métropole, « Répertoire des formes urbaines résidentielles de Caen-Métropole » (AUCAME, 2010)	
Emprise au sol du bâti.	Surface du rez-de-chaussée / surface de, l'îlot hors voirie publique. Coefficient CES (0 à 1)
Emprise au sol des espaces publics.	(y.c. voiries).
Période de construction	Liée à la forme urbaine et à la consommation énergétique.
Type d'habitat majoritaire.	(individuel/collectif).
Surface de l'îlot.	Ensemble du terrain de l'îlot retenu (surface du terrain d'assiette totale)
Surface de l'îlot hors voiries publiques	Ensemble du terrain de l'îlot retenu, voirie publique déduite.
Nombre de logements sur l'îlot.	Donnée utilisée pour calculer la densité résidentielle,
Surface moyenne des parcelles.	Surface moyenne des parcelles.
Densité résidentielle	Nombre de logements / surface de l'îlot en hectare.
Coefficient d'occupation du sol COS.	Surface constructions (tous niveaux inclus) / surface de l'îlot hors voirie publique.
Formes urbaines types	« Les quartiers urbains, les bourgs, les cités ouvrières, les grands ensembles, etc. »
Largeur et tracé des voies.	« Les voiries sont étroites et sinueuses. Elles sont à l'échelle du piéton » ; « L'organisation de la voirie est hiérarchisée : le quartier est encadré par des boulevards, voirie primaire, puis irrigué par des voies de desserte du quartier, pour conduire sur des rues plus étroites desservant les parcelles. »
Géométrie de l'îlot	Descriptif : « L'îlot n'a pas de forme particulières. »
Implantation du bâti	Descriptif : Alignement de voie / au centre de la airelle, en retrait de X m, etc.
Mitoyenneté	Indicateur contiguïté : rapport de la surface non contiguë de la paroi sur la surface totale.
Découpage du parcellaire	Homogène / hétérogène. ''lanières étroites et profondes''
Occupation du cœur d'îlot.	« L'îlot et son cœur sont très construits avec des bâtiments en fond de parcelles qui laissent place à de nombreuses cours de petite taille »
Nombre d'étages moyen.	Hauteur moyenne de l'îlot retenu.
Distribution des logements	« On accède à certains bâtiments par de nombreux porches qui parsèment le quartiers. » « La distribution intérieure des pièces est déterminée par la vue sur la mer »
Utilisation du sol.	Monofonctionnnel / mufti-fonctionnel.
Matériaux façades.	Pierre, brique, bois, alu, etc.
Matériaux toitures.	Tuiles, bitume, végétal, etc.
Type de toiture.	Monopente, 2 pans, terrasse, etc.
Position des ouvertures.	1, 2, 3 ou 4 façades.
Types d'ouvertures	Fenêtres, balcons, loggias, bow windows, lucarnes...

IAURIF, « Appréhender la densité 2 - Les indicateurs de densité » (Moulinié & Naudin-Adam, 2005b)	
Densité résidentielle	Nombre de logements à l'hectare. Rend compte des répartitions spatiales de la population au sein d'un cartier.
Densité de population	Nombre d'habitants à l'hectare. Utilisée pour comparer des villes de tailles différentes. Elle permet également de rendre compte des phénomènes de croissance urbaine.
Surface de l'îlot hors voiries publiques	Surface de l'îlot hors voiries publiques
Emprise au sol du bâti	Emprise au sol du bâti / Surface de l'îlot.
Nombre d'étages moyen	Nombre d'étages moyen
Densité bâtie	Emprise au sol multipliée par le nombre de niveaux / surface de l'îlot.
Largeur et tracé des voies	« Un tissu urbain fortement marqué par des voies étroites et sinueuses, contraintes quelquefois par les reliefs, auxquelles s'ajoute un réseau complexe de ruelles, « chemins communs » ou « traverses » »
Géométrie de l'îlot	« Un parcellaire très allongé »
Utilisation du sol	« l'image d'un centre urbain resserré et dense dans lequel toutes les fonctions cohabitent. »
Type d'habitat majoritaire	Individuel/Collectif
Occupation du cœur d'îlot	« L'alignement serré des maisons génère alors le remplissage des fonds de parcelles puis des surélévations d'immeubles.''
Densité végétale	« les espaces verts, les jardins et les vergers diminuent ». Repérage du volume et de la qualité de la végétation.
Matériaux façades.	Par exemple « Pierre de taille »
Implantation du bâti.	« les implantations se font sous forme de tours et de barres, en rupture avec les alignements existants et avec la trame des voies. »
Formes urbaines types	« la cité médiévale, les villes et faubourgs du XVIIIe, les centres bourgs du début du XIXe, la ville haussmannienne, les banlieues papillonnasses, l'habitat social de l'entre-deux guerres, les grands ensembles et les opérations papillonnasses récentes. »
Densité nette	« Echelle de l'îlot foncier : surfaces des parcelles réellement occupées par l'affectation donnée : emprise du bâti, espaces libres à l'intérieur de la parcelle ou de l'îlot, voies de desserte interne »
Densité brute	« Echelle du quartier : La densité brute prend en compte l'ensemble du territoire considéré sans exclusion : équipements collectifs (bâtis ou non), espaces verts, voirie prince ale et infrastructures. »

APUR « Consommations d'énergie et émissions de gaz à effet de serre liées au chauffage des résidences principales parisiennes, décembre 2007 » (Atelier Parisien d'URbanisme, 2007)	
Période de construction	Permet d'évaluer la performance des parois. Voir tableau synthétique p.20.
Compacité.	Traduit la capacité d'une enveloppe à contenir un volume maximal, elle est exprimée par le rapport adimensionnel entre la surface d'enveloppe extérieure non contigüe et son volume, élevé à la puissance 2/3.
Hauteur de l'immeuble.	
Orientation et effet de masque.	Détermine les apports solaires passifs.
Mitoyenneté	Part des murs qui ne donne pas sur l'extérieur.
Besoin de chauffage.	Energie qu'il faut dissiper pour maintenir un bâtiment à 19°C en période de chauffe. Valeur théorique basée sur les caractéristiques du bâtiment, sa configuration au sein de l'îlot et la rigueur du climat.
Mode de chauffage de l'îlot.	Electrique, gaz individuel, fioul collectif, chauffage urbain, gaz collectif, gaz de ville, etc.
Type de toiture.	Comble, terrasse, monopente, etc.
Distribution des logements	Escalier commun, 2 appartements par étage, etc.
Implantation du bâti.	A l'alignement, en retrait de 2 m, au centre de la parcelle, etc.
Projections de la façade.	Balcon, saillies, bow-window, brise-soleil, etc.
Découpage du parcellaire	Longue et profonde
Emprise des espaces verts.	Cours, courettes, jardins, etc.
Surface de l'îlot.	Surface de l'îlot.
Emprise au sol	Coefficient d'emprise au sol CES 0 à 1.
Matériaux façades.	Permet d'évaluer la performance des parois. Voir tableau synthétique p.20. Détail en fonction de la position : sous- bassement, étage, cadre de fenêtre, linteaux, etc.
Matériaux toitures.	Matériaux toitures.
Types d'ouvertures	Fenêtre, lucarne, porte-fenêtre, etc.
Emprise et dimensions des ouvertures.	Surface et proportions des ouvertures.
Type de vitrage.	Simple, double, gaz inerte, etc.

Communauté métropolitaine de Québec, « Exemples de densité sur le territoire de communauté métropolitaine de Québec » (Communauté métropolitaine de Québec, 2010)	
Densité résidentielle brute.	La densité brute se calcule en divisant le nombre total de logements construits par la superficie d'un territoire donné sans enlever la portion correspondant à l'emprise des rues, des parcs et des autres infrastructures d'utilité publique (logements/ha)
Densité résidentielle nette.	La densité nette se calcule en divisant le nombre total de logements construits par la superficie d'un territoire donné une fois enlevée la portion correspondant à l'emprise des rues, des parcs et des autres infrastructures d'utilité publique (logements/ha)
Type d'habitat majoritaire.	Unifamiliale isolée, unifamiliale jumelée, unifamiliale en rangée, bifamiliale, multifamiliale de 3 et 4 logements, multifamiliale de 5 à 9 logements, multifamiliale de 10 logements.
Surface de l'îlot hors voiries publiques.	« Superficie occupée par les terrains. »
Surface de l'îlot.	« Superficie totale du secteurs. »
Surface moyenne des parcelles.	Surface moyenne des parcelles.
Emprise des espaces verts publics.	« Superficie occupée par des parcs. »
Emprise des voies.	« Superficie occupée par l'emprise des rues. »
Emprise des ''autres usages''	« Superficie occupée par d'autres usages. »
Nombre de bâtiments.	Nombre de bâtiments.
Nombre de logements.	Nombre de logements.

Adolphe « SAGACité, Vers un Système d'Aide à la Gestion des Ambiances urbaines » (Adolphe et al., 2002)	
Densité Totale Construite	rapport de la surface construite à la surface totale.
Densite Construite au Sol	rapport de la surface construite au sol à la surface totale.
Densité de Bâtiments	nombre de bâtiments à l'hectare.
Densite des Ilots	rapport de la surface construite à la surface totale, déduction faite de la voirie, et du stationnement. Evalue les espaces laissés libres par l'automobile
Densité humaine	Nombres de résidences principales au km2
Coefficient de Taille	racine cubique du volume du bâtiment
Rugosite Absolue	somme des hauteurs de bâtiments pondérée par leur surface et ramenée à la surface totale du tissu urbain considéré (bâti et non bâti).
Rugosite Relative	écart type de l'amplitude de variation de la hauteur des éléments de la canopée (bâtiments ou espace non bâtis) dans une direction donnée, pondérée par la largeur de l'élément dans le plan de coupe α, et pour un rayon donné.
Epaisseur Moyenne Bâtiments	Non retenu
Porosité	rapport des volumes utiles ouverts à l'ensemble des volumes du tissu urbain considéré
Compacité nette	$\frac{\sum Surface\ d'enveloppe\ \ non\ contigue}{(\sum Volume\ du\ bâtiment)^{2/3}}$
Compacité utile	$\frac{\sum Surface\ d'enveloppenon\ contigue}{\sum Surface\ de\ plancher}$
Contiguïté	La contiguïté d'un bâtiment est caractérisée par le rapport de la surface verticale d'enveloppe adjacente à d'autres bâtiments à la surface d'enveloppe donnant sur l'extérieur.
Nombre de Contacts	Non retenu
Occlusivité	moyenne du rapport périmètre construit, sur périmètre non construit pour une série de coupes horizontales. L'occlusivité caractérise la distribution des périmètres construits en fonction de la hauteur par rapport au sol, calculés à partir d'une série de coupes dans le tissu urbain
Prospect	Rapport de la hauteur moyenne des bâtiments d'une rue par sa largeur
Facteur d'ombre au Sol	Non retenu
Facteur d'Ombre d'Hiver	Non retenu
Facteur d'Ombre d'Eté	Non retenu
Coefficient de Réduction Energétique	Non retenu
Admittance Solaire	L'admittance solaire est évaluée de manière simplifiée. Les effets de la contiguïté, de l'orientation, de l'ombrage moyen, et de l'albédo sont pris en compte de manière forfaitaire (en fonction de la densité bâtie).
Facteur de vue du Ciel	Non retenu
Ouverture architecturale	Non retenu
Fermeture architecturale	Non retenu
Couverture architecturale	Non retenu
Ligature architecturale	Non retenu
Energie pour l'éclairage artificiel	Calcul simplifié de l'énergie annuelle consommée par l'éclairage artificiel
Energie pour la ventilation	Calcul simplifié de l'énergie annuelle consommée par la ventilation
Energie pour l'eau chaude sanitaire	Calcul simplifié de l'énergie annuelle consommée par l'eau chaude sanitaire.
Energie pour le chauffage	Calcul simplifié de l'énergie annuelle consommée par le chauffage
Energie pour la climatisation	Calcul simplifié de l'énergie annuelle consommée par la climatisation

Adolphe « SAGACité, Vers un Système d'Aide à la Gestion des Ambiances urbaines » (Adolphe et al., 2002)	
Energie pour la destruction des bâtiments	Calcul simplifié de l'énergie consommée pour la destruction des bâtiments.
Investissement énergétique dans le bâtiment	Calcul simplifié de l'énergie incorporée dans les matériaux
Consommation dans secteur du bâtiment	Calcul simplifié de l'énergie consommé par le bâtiment sur son cycle de vie.
Temps de retour énergétique du bâtiment	rapport de l'énergie incorporée dans les matériaux de construction à la consommation annuelle pour le chauffage, la climatisation et la ventilation
Densité de Voirie	Nombre de segments de voirie (ou liens) rapporté à la surface du tissu urbain considéré.
Densité de Voie en Impasse	Non retenu
Distance Moyenne entre Intersections	Rapport de la longueur totale du réseau au nombre de brins. caractérise la taille de la maille du réseau viaire.
Densité d'Intersections	Non retenu
Distance Moyenne Bâtiment-Voirie	Non retenu
Emprise des Voies	Surface de voies et de stationnement sur surface totale.
Densité de Stationnement	Surface de voies et de stationnement sur surface totale.
Connectivité Alpha du Réseau Viaire	Caractérise la multiplicité des liens dans le réseau. Nombre de circuits du réseau viaire sur le nombre maximum de circuits que pourrait représenter un réseau ayant le même nombre de nœuds.
Connexité Bêta du Réseau Viaire	Non retenu
Connectivité Gamma du Réseau Viaire	Non retenu
Nombre Cyclomatique	Nombre de cycles dans un réseau viaire = nombre de segments – Nombre d'intersections + 1
Sinuosité	la sinuosité relative dans une direction donnée est égale à la somme des longueurs des segments de rue pondérée par un coefficient caractéristique de l'angle entre la direction de la rue et cette direction.
Accessibilité au Réseau de Transport en Commun	Distance moyenne entre un ensemble de bâtiments et l'arrêt de bus ou la bouche de métro la plus proche.
Densité de Sites Propres	Pourcentage du linéaire de sites propres et de métro par rapport au total du linéaire de voies
Energie pour l'Eclairage Urbain	Nombre de points d'éclairage urbain par kilomètre de voies.
Investissement Energétique dans Réseau Viaire	Energie incorporée dans les matériaux de construction de la chaussée.
Consommation Energétique dans Transports Urbains	Calcul simplifié de l'énergie annuelle consommée par les transports.
Temps de Retour Energétique du Réseau Viaire	rapport de l'énergie incorporée dans les matériaux de construction à la consommation annuelle des transports
Minéralisation	rapport de la surface n o n affectée aux espaces d'eau ou aux espaces verts, à la surface totale.
Facteur de Végétal	Non retenu
Accessibilité aux Espaces Verts	Distance moyenne entre un ensemble de bâtiments et l'espace public vert le plus proche.
Disponibilité des Espaces Verts	Surface d'espace vert public disponible par habitant.

Adolphe « SAGACité, Vers un Système d'Aide à la Gestion des Ambiances urbaines » (Adolphe et al., 2002)	
PMVext	« L'indicateur retenu traditionnellement pour définir un état de confort thermique dans une ambiance modérée est la thermoneutralité sensorielle. Dans ce type d'ambiance, Fanger a tenté de prédire le jugement thermosensoriel moyen d'un individu à partir du PMV (*Predicted Mean Vote*). Karima Aït-Ameur a tenté dans sa thèse de doctorat de généraliser cet indicateur global à des conditions extérieures modérées. »
Densité du Mobilier Urbain	Nombre d'élément de mobilier urbain ramené au m² d'espace public
Degré de Connaissance de l'Espace	« Le degré de familiarité avec l'espace peut être estimé à partir du : - Type d'ancrage dans l'espace : (fort, moyen ou faible). - Degré de connaissance de l'espace : (fort, moyen ou faible). »
Type d'occupation	Occupation des espaces : Continue, temporaire, le jour, la nuit …
Régularité de la Fréquentation	« La régularité de la fréquentation est évaluée à partir du taux de présence dans l'espace : le nombre d'individus passants ou présents dans l'espace moyenné par heure, par jour, ou par saison, … »
Taux d'Activité Récréative	Caractérise les activités pratiquées : soit le taux d'activités nécessaires (course, résidence, services), soit le taux d'activités récréatives.
Taux d'Arrêt	Le taux « d'arrêt » dans l'espace correspond à la proportion de population marquant un arrêt supérieur à la durée moyenne d'arrêt dans l'espace.

Long et Kergomard, « Classification morphologique du tissus urbain pour des applications climatologiques; Cas de Marseille » (Long & Kergomard, 2005)	
Densité surfacique bâtie	
Hauteur moyenne des bâtiments (m)	« La hauteur moyenne des bâtiments est pondérée par leur surface »
Écart type de la hauteur des bâtiments (m)	
Nombre de bâtiments par hectare	
Nature des surfaces urbaines	« La nature des surfaces urbaines est décrite par le calcul de densité surfacique : $\lambda = \frac{\sum S_{zone}}{S_{maille}}$ [1] où λ est la densité surfacique d'une zone, Szone la surface d'une zone en m2, Smaille la surface de la maille en m2. Les densités sont calculées à partir de l'équation [1] pour les surfaces bâties, de végétation, d'eau et goudronnées (seuls les axes routiers sont pris en compte pour ce type de surface). Les surfaces représentées par les cours intérieures des bâtiments ne sont pas comptabilisées dans le calcul de Szone. »
Volume moyen des bâtiments	« Le volume moyen des bâtiments tient compte des cours intérieures qui représentent un volume « vide » »
Périmètre moyen d'un bâtiment	« Le périmètre moyen d'un bâtiment est donné par la somme des longueurs des côtés du bâtiment. Si le bâtiment est découpé par le maillage, on ne tient alors compte que des côtés « réels » du bâtiment […] Les cours intérieures ne sont également pas prises en compte »
Compacité	« La compacité moyenne des bâtiments donne une information sur la forme plus ou moins découpée des bâtiments, plus le rapport est proche de 1, plus le bâtiment a une forme compacte : $C = \sum \left(\frac{(S_c / P_c)}{(S_{bâti} / P_{bâti})} \right) / Nb$ avec C la compacité moyenne des bâtiments, Sc la surface d'un cercle en m2, Pc le périmètre d'un cercle en m, avec Sc = Sbâti. »
Nombre de bâtiments par maille	Nombre de bâtiments par maille
Espacement moyen entre les bâtiments	« L'espacement moyen entre les bâtiments, c'est-à-dire la distance moyenne qui sépare les bâtiments les uns des autres dans une maille. »

Tsai « Quantifying urban form: Compactness versus' sprawl' » (Tsai, 2005)	
Relative Entropy	Caractérise la distribution homogène ou hétérogène de la population ou de l'activité dans une ville. Ne peut être calculé si des sous-parties ont une densité nulle. $\text{Relative Entropy} = \sum_{i=1}^{N} PDEN_i \times \log\left(\frac{1}{PDEN_i}\right) \Big/ \log(N)$ where, $PDEN_i = DEN_i / \sum_{i=1}^{N} DEN_i$; DEN_i = density of sub-area i; and N = number of sub-areas.
Gini coefficient	Caractérise la distribution homogène ou hétérogène de la population ou de l'activité dans une ville. $\text{Gini} = 0.5 \sum_{i=1}^{N} \lvert X_i - Y_i \rvert$ where, N is the number of sub-areas; X_i is the proportion of land area in sub-area i; and Y_i is the proportion of population or employment in sub-area i (Penfold, 2001).
Moran coefficient	Caractérise la distribution spatial de l'hétérogénéité de densité de la ville (ville mono-centrique, polycentrique ou sans centre) $\text{Moran} = \frac{N \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{N} W_{ij}(X_i - X)(X_j - X)}{\left(\sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{N} W_{ij}\right)(X_i - X)^2}$ where, N is the number of sub-areas; X_i is population or employment in sub-area i; X_j is population or employment in sub-area j; X is the mean of population or employment; and W_{ij} denotes the weighting between sub-areas i and j.
Geary coefficient	Caractérise la distribution spatial de l'hétérogénéité de densité de la ville (ville mono-centrique, polycentrique ou sans centre) $\text{Geary} = \frac{(N-1)\left[\sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{N} W_{ij}(X_i - X_j)^2\right]}{2\left(\sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{N} W_{ij}\right) \sum_{i=1}^{N} (X_i - X)^2}$ where, N is the number of sub-areas; X_i is population or employment in sub-area i; X_j is population or employment in sub-area j; X is the mean of population or employment; and W_{ij} denotes the weighting between sub-areas i and j.
land area	Surface occupée par une ville
Density	Densité de population (habitants par m²) ou densité d'activité (employés par m²)

Salat « Les villes et les formes : sur l'urbanisme durable» (Salat, 2011a)	
Densité humaine	Nombre de personnes divisé par surface sélectionnée
Densité du bâti	Surface de plancher divisée par surface sélectionnée
Densité des logements	Nombre de logements divisé par surface sélectionnée
Densité de personnes juridiques	Nombre de personnes juridiques divisé par surface sélectionnée
Densité d'empois	Nombre d'emplois divisé par surface sélectionnée
Coefficient d'emprise au sol	Emprise au sol divisée par surface sélectionnée
Intensité parcellaire	Nombre de parcelle divisé par surface sélectionnée
Diversité de taille des parcelles	Permet de s'assurer de la diversité de la taille des parcelles dans la ville pour faciliter les différentes fonctions et activités (par rapport à la loi de distribution optimale de Pareto).
Diversité d'usage des sols / des parcelles	Mesure la diversité d'équipement et de fonction accueillie par les sols / des parcelles (par rapport à la loi de distribution optimale de Pareto).
Emprise au sol des voiries piétonnes et cyclables	Surface des voiries piétonnes et cyclables divisée par surface sélectionnée x 100
Emprise au sol de la voirie	Surface de voirie divisée par surface sélectionnée x 100
Part voirie réservée au transport public	Surface de voirie réservée aux transports publics divisée par surface sélectionnée x 100
Connectivité de la trame piéton/vélo	Nombre d'intersections de la trame divisée par surface sélectionnée
Connectivité de la trame voiture	
Nombre cyclomatique pour la trame voiture	Nombre de lien de la trame – Nombre de nœuds de la trame + 1
Nombre cyclomatique pour la trame piéton/vélo	
Distance moyenne entre intersection pour la trame voiture	Moyenne des longueurs des liens entre deux intersections sur la sélection.
Distance moyenne entre intersection pour la trame piéton/vélo	
Part de la population à plus de 300 m d'un arrêt de transport en commun	Nombre de personne à plus de 300 mètres divisé par le nombre de personne total x 100.
Nombre de transport en commun accessible à moins de 300 m	
Fractalité du réseau de rues	Renseigne sur la complexité du tissu urbain en indiquant la distribution des rues par largueur par rapport à la loi de distribution optimale de Pareto.
Indicateurs liés à l'eau	Intensité hydrologique Imperméabilité du sol Intensité de traitement des eaux usées Rendement de l'usage de l'eau Accessibilité à l'eau potable
Indicateurs liés à la biodiversité	Part des surfaces agricoles Part de la trame verte Connectivité des habitats Distribution des espaces verts
Indicateurs socio-économiques	Proportion d'emploi par rapport aux logements Part du logement social Diversité des âges Diversité des revenus Productivité des ressources Intensité des activités de savoir Potentiel d'emplois Diversité structurelle des emplois

Salat « Les villes et les formes : sur l'urbanisme durable» (Salat, 2011a)	
Densité humaine	Nombre de personnes divisé par surface sélectionnée
Densité du bâti	Surface de plancher divisée par surface sélectionnée
Densité des logements	Nombre de logements divisé par surface sélectionnée
Densité de personnes juridiques	Nombre de personnes juridiques divisé par surface sélectionnée
Densité d'empois	Nombre d'emplois divisé par surface sélectionnée
Coefficient d'emprise au sol	Emprise au sol divisée par surface sélectionnée
Intensité parcellaire	Nombre de parcelle divisé par surface sélectionnée
Diversité de taille des parcelles	Permet de s'assurer de la diversité de la taille des parcelles dans la ville pour faciliter les différentes fonctions et activités (par rapport à la loi de distribution optimale de Pareto).
Diversité d'usage des sols / des parcelles	Mesure la diversité d'équipement et de fonction accueillie par les sols / des parcelles (par rapport à la loi de distribution optimale de Pareto).
Emprise au sol des voiries piétonnes et cyclables	Surface des voiries piétonnes et cyclables divisée par surface sélectionnée x 100
Emprise au sol de la voirie	Surface de voirie divisée par surface sélectionnée x 100
Part voirie réservée au transport public	Surface de voirie réservée aux transports publics divisée par surface sélectionnée x 100
Connectivité de la trame piéton/vélo	Nombre d'intersections de la trame divisée par surface sélectionnée
Connectivité de la trame voiture	
Nombre cyclomatique pour la trame voiture	Nombre de lien de la trame – Nombre de nœuds de la trame + 1
Nombre cyclomatique pour la trame piéton/vélo	
Distance moyenne entre intersection pour la trame voiture	Moyenne des longueurs des liens entre deux intersections sur la sélection.
Distance moyenne entre intersection pour la trame piéton/vélo	
Part de la population à plus de 300 m d'un arrêt de transport en commun	Nombre de personne à plus de 300 mètres divisé par le nombre de personne total x 100.
Nombre de transport en commun accessible à moins de 300 m	
Fractalité du réseau de rues	Renseigne sur la complexité du tissu urbain en indiquant la distribution des rues par largueur par rapport à la loi de distribution optimale de Pareto.
Indicateurs liés à l'eau	Intensité hydrologique Imperméabilité du sol Intensité de traitement des eaux usées Rendement de l'usage de l'eau Accessibilité à l'eau potable
Indicateurs liés à la biodiversité	Part des surfaces agricoles Part de la trame verte Connectivité des habitats Distribution des espaces verts
	Diversité structurelle des usages Proximité des commerces de nécessité Ecart de la distribution de chaque quartier à la distribution globale pour les commerces / bureau / logements Complexité du tissu d'activité Pollution sonore Intensité des activités culturelles Proximité des infrastructures de loisir

Salat « Les villes et les formes : sur l'urbanisme durable» (Salat, 2011a)	
Densité humaine	Nombre de personnes divisé par surface sélectionnée
Densité du bâti	Surface de plancher divisée par surface sélectionnée
Densité des logements	Nombre de logements divisé par surface sélectionnée
Densité de personnes juridiques	Nombre de personnes juridiques divisé par surface sélectionnée
Densité d'empois	Nombre d'emplois divisé par surface sélectionnée
Coefficient d'emprise au sol	Emprise au sol divisée par surface sélectionnée
Intensité parcellaire	Nombre de parcelle divisé par surface sélectionnée
Diversité de taille des parcelles	Permet de s'assurer de la diversité de la taille des parcelles dans la ville pour faciliter les différentes fonctions et activités (par rapport à la loi de distribution optimale de Pareto).
Diversité d'usage des sols / des parcelles	Mesure la diversité d'équipement et de fonction accueillie par les sols / des parcelles (par rapport à la loi de distribution optimale de Pareto).
Emprise au sol des voiries piétonnes et cyclables	Surface des voiries piétonnes et cyclables divisée par surface sélectionnée x 100
Emprise au sol de la voirie	Surface de voirie divisée par surface sélectionnée x 100
Part voirie réservée au transport public	Surface de voirie réservée aux transports publics divisée par surface sélectionnée x 100
Connectivité de la trame piéton/vélo	Nombre d'intersections de la trame divisée par surface sélectionnée
Connectivité de la trame voiture	
Nombre cyclomatique pour la trame voiture	Nombre de lien de la trame – Nombre de nœuds de la trame + 1
Nombre cyclomatique pour la trame piéton/vélo	
Distance moyenne entre intersection pour la trame voiture	Moyenne des longueurs des liens entre deux intersections sur la sélection.
Distance moyenne entre intersection pour la trame piéton/vélo	
Part de la population à plus de 300 m d'un arrêt de transport en commun	Nombre de personne à plus de 300 mètres divisé par le nombre de personne total x 100.
Nombre de transport en commun accessible à moins de 300 m	
Fractalité du réseau de rues	Renseigne sur la complexité du tissu urbain en indiquant la distribution des rues par largueur par rapport à la loi de distribution optimale de Pareto.
Indicateurs liés à l'eau	Intensité hydrologique Imperméabilité du sol Intensité de traitement des eaux usées Rendement de l'usage de l'eau Accessibilité à l'eau potable
Indicateurs liés à la biodiversité	Part des surfaces agricoles Part de la trame verte Connectivité des habitats Distribution des espaces verts
Indicateurs liés aux déchets	Part des matériaux recyclés dans la construction de nouveaux bâtiments Productivité métabolisme urbain Intensité émission de GES par habitants Intensité émissions pour produire de la richesse
Intensité énergétique par habitants	Quantité d'énergie consommée divisée par le nombre d'habitant
Intensité énergétique surfacique	Quantité d'énergie consommée divisée par la surface de plancher x 100
Part de production locale	Quantité d'énergie produite localement divisée par la quantité consommée
Taux d'énergie renouvelable	Quantité d'énergie renouvelable consommée divisée par la quantité

Salat « Les villes et les formes : sur l'urbanisme durable» (Salat, 2011a)	
Densité humaine	Nombre de personnes divisé par surface sélectionnée
Densité du bâti	Surface de plancher divisée par surface sélectionnée
Densité des logements	Nombre de logements divisé par surface sélectionnée
Densité de personnes juridiques	Nombre de personnes juridiques divisé par surface sélectionnée
Densité d'empois	Nombre d'emplois divisé par surface sélectionnée
Coefficient d'emprise au sol	Emprise au sol divisée par surface sélectionnée
Intensité parcellaire	Nombre de parcelle divisé par surface sélectionnée
Diversité de taille des parcelles	Permet de s'assurer de la diversité de la taille des parcelles dans la ville pour faciliter les différentes fonctions et activités (par rapport à la loi de distribution optimale de Pareto).
Diversité d'usage des sols / des parcelles	Mesure la diversité d'équipement et de fonction accueillie par les sols / des parcelles (par rapport à la loi de distribution optimale de Pareto).
Emprise au sol des voiries piétonnes et cyclables	Surface des voiries piétonnes et cyclables divisée par surface sélectionnée x 100
Emprise au sol de la voirie	Surface de voirie divisée par surface sélectionnée x 100
Part voirie réservée au transport public	Surface de voirie réservée aux transports publics divisée par surface sélectionnée x 100
Connectivité de la trame piéton/vélo	Nombre d'intersections de la trame divisée par surface sélectionnée
Connectivité de la trame voiture	
Nombre cyclomatique pour la trame voiture	Nombre de lien de la trame – Nombre de nœuds de la trame + 1
Nombre cyclomatique pour la trame piéton/vélo	
Distance moyenne entre intersection pour la trame voiture	Moyenne des longueurs des liens entre deux intersections sur la sélection.
Distance moyenne entre intersection pour la trame piéton/vélo	
Part de la population à plus de 300 m d'un arrêt de transport en commun	Nombre de personne à plus de 300 mètres divisé par le nombre de personne total x 100.
Nombre de transport en commun accessible à moins de 300 m	
Fractalité du réseau de rues	Renseigne sur la complexité du tissu urbain en indiquant la distribution des rues par largeur par rapport à la loi de distribution optimale de Pareto.
Indicateurs liés à l'eau	Intensité hydrologique Imperméabilité du sol Intensité de traitement des eaux usées Rendement de l'usage de l'eau Accessibilité à l'eau potable
Indicateurs liés à la biodiversité	Part des surfaces agricoles Part de la trame verte Connectivité des habitats Distribution des espaces verts
utilisée	consommée x 100
Taux de réutilisation de l'énergie	Quantité d'énergie résiduelle collectée divisée par la quantité consommée x 100
Compacité volumétrique	Surface d'enveloppe divisée par Volume du bâtiment $\frac{\sum Surface\ d'enveloppe}{\sum Volume\ du\ bâtiment}$
Facteur de taille	$\frac{1}{(\sum Volume\ du\ bâtiment)^{2/3}}$

Salat « Les villes et les formes : sur l'urbanisme durable» (Salat, 2011a)	
Densité humaine	Nombre de personnes divisé par surface sélectionnée
Densité du bâti	Surface de plancher divisée par surface sélectionnée
Densité des logements	Nombre de logements divisé par surface sélectionnée
Densité de personnes juridiques	Nombre de personnes juridiques divisé par surface sélectionnée
Densité d'empois	Nombre d'emplois divisé par surface sélectionnée
Coefficient d'emprise au sol	Emprise au sol divisée par surface sélectionnée
Intensité parcellaire	Nombre de parcelle divisé par surface sélectionnée
Diversité de taille des parcelles	Permet de s'assurer de la diversité de la taille des parcelles dans la ville pour faciliter les différentes fonctions et activités (par rapport à la loi de distribution optimale de Pareto).
Diversité d'usage des sols / des parcelles	Mesure la diversité d'équipement et de fonction accueillie par les sols / des parcelles (par rapport à la loi de distribution optimale de Pareto).
Emprise au sol des voiries piétonnes et cyclables	Surface des voiries piétonnes et cyclables divisée par surface sélectionnée x 100
Emprise au sol de la voirie	Surface de voirie divisée par surface sélectionnée x 100
Part voirie réservée au transport public	Surface de voirie réservée aux transports publics divisée par surface sélectionnée x 100
Connectivité de la trame piéton/vélo	Nombre d'intersections de la trame divisée par surface sélectionnée
Connectivité de la trame voiture	
Nombre cyclomatique pour la trame voiture	Nombre de lien de la trame – Nombre de nœuds de la trame + 1
Nombre cyclomatique pour la trame piéton/vélo	
Distance moyenne entre intersection pour la trame voiture	Moyenne des longueurs des liens entre deux intersections sur la sélection.
Distance moyenne entre intersection pour la trame piéton/vélo	
Part de la population à plus de 300 m d'un arrêt de transport en commun	Nombre de personne à plus de 300 mètres divisé par le nombre de personne total x 100.
Nombre de transport en commun accessible à moins de 300 m	
Fractalité du réseau de rues	Renseigne sur la complexité du tissu urbain en indiquant la distribution des rues par largeur par rapport à la loi de distribution optimale de Pareto.
Indicateurs liés à l'eau	Intensité hydrologique Imperméabilité du sol Intensité de traitement des eaux usées Rendement de l'usage de l'eau Accessibilité à l'eau potable
Indicateurs liés à la biodiversité	Part des surfaces agricoles Part de la trame verte Connectivité des habitats Distribution des espaces verts
Facteur de forme	$\frac{\sum Surface\ d'enveloppe}{(\sum Volume\ du\ bâtiment)^{2/3}}$
Taux de volume passif	Volume pouvant être éclairé et ventilé naturellement divisé par le volume total
Energie consommée pour le chauffage	Energie consommée pour le chauffage par m²
Energie consommée pour la climatisation	Energie consommée pour la climatisation par m²
Complexité des bâtiments par	Le but est d'observer la corrélation entre la complexité des bâtiments et

Salat « Les villes et les formes : sur l'urbanisme durable» (Salat, 2011a)	
Densité humaine	Nombre de personnes divisé par surface sélectionnée
Densité du bâti	Surface de plancher divisée par surface sélectionnée
Densité des logements	Nombre de logements divisé par surface sélectionnée
Densité de personnes juridiques	Nombre de personnes juridiques divisé par surface sélectionnée
Densité d'empois	Nombre d'emplois divisé par surface sélectionnée
Coefficient d'emprise au sol	Emprise au sol divisée par surface sélectionnée
Intensité parcellaire	Nombre de parcelle divisé par surface sélectionnée
Diversité de taille des parcelles	Permet de s'assurer de la diversité de la taille des parcelles dans la ville pour faciliter les différentes fonctions et activités (par rapport à la loi de distribution optimale de Pareto).
Diversité d'usage des sols / des parcelles	Mesure la diversité d'équipement et de fonction accueillie par les sols / des parcelles (par rapport à la loi de distribution optimale de Pareto).
Emprise au sol des voiries piétonnes et cyclables	Surface des voiries piétonnes et cyclables divisée par surface sélectionnée x 100
Emprise au sol de la voirie	Surface de voirie divisée par surface sélectionnée x 100
Part voirie réservée au transport public	Surface de voirie réservée aux transports publics divisée par surface sélectionnée x 100
Connectivité de la trame piéton/vélo	Nombre d'intersections de la trame divisée par surface sélectionnée
Connectivité de la trame voiture	
Nombre cyclomatique pour la trame voiture	Nombre de lien de la trame – Nombre de nœuds de la trame + 1
Nombre cyclomatique pour la trame piéton/vélo	
Distance moyenne entre intersection pour la trame voiture	Moyenne des longueurs des liens entre deux intersections sur la sélection.
Distance moyenne entre intersection pour la trame piéton/vélo	
Part de la population à plus de 300 m d'un arrêt de transport en commun	Nombre de personne à plus de 300 mètres divisé par le nombre de personne total x 100.
Nombre de transport en commun accessible à moins de 300 m	
Fractalité du réseau de rues	Renseigne sur la complexité du tissu urbain en indiquant la distribution des rues par largueur par rapport à la loi de distribution optimale de Pareto.
Indicateurs liés à l'eau	Intensité hydrologique Imperméabilité du sol Intensité de traitement des eaux usées Rendement de l'usage de l'eau Accessibilité à l'eau potable
Indicateurs liés à la biodiversité	Part des surfaces agricoles Part de la trame verte Connectivité des habitats Distribution des espaces verts
rapport à l'énergie consommée par les bâtiments	l'énergie consommée.
Comparaison de la complexité du réseau urbain à l'énergie de transport	Le but est d'observer la corrélation entre la complexité du reseau et l'énergie consommée.

Annexe 3 : Principe de calcul du coefficient de corrélation de Pearson

Pour comprendre comment se calcule le coefficient de corrélation de Pearson, quelques rappels sont nécessaires.

On doit tout d'abord calculer la covariance. L'objectif de la covariance est de quantifier la liaison entre deux variables X et Y (la tendance de deux variables à se déplacer ensembles au dessus ou en dessous de leurs espérances respectives), et de mettre en évidence le sens de la liaison et son intensité. Elle est égale à l'espérance du produit des variables centrées.

$$\mathrm{COV}(\mathrm{X},\mathrm{Y}) = \mathrm{E}\{[\mathrm{X} - \mathrm{E}(\mathrm{X})][\mathrm{Y} - \mathrm{E}(\mathrm{Y})]\}$$

Si la covariance est positive, cela signifie que lorsque X est plus grand que son espérance, Y a tendance à l'être également. Si elle est négative cela signifie que lorsque X est plus grand que son espérance, Y a tendance à être plus petit que sa propre espérance.
Si la covariance est nulle, il n'y a pas de corrélation entre les variables X et Y.

Le coefficient de corrélation linéaire simple, (ou de Pearson), est une normalisation de la covariance par le produit des écarts-type des variables.

$$\mathrm{r_{xy}} = \frac{\mathrm{COV}(\mathrm{X},\mathrm{Y})}{\sqrt{\mathrm{V}(\mathrm{X}) \times \mathrm{V}(\mathrm{Y})}} = \frac{\mathrm{COV}(\mathrm{X},\mathrm{Y})}{\sigma_\mathrm{x} \times \sigma_\mathrm{y}}$$

Le coefficient de corrélation n'a pas d'unité de mesure et varie entre 1 et -1. Cela permet donc de comparer les corrélations entres elles.

- Si r est proche de 1, la liaison entre X et Y est positive (Si X augment, Y aussi et inversement).
- Si r est proche de -1, la liaison entre X et Y est négative (Si X augment, Y diminue).
- Si X et Y ne sont pas corrélées, r sera proche de 0 (la réciproque n'est pas forcément vraie).

Annexe 4 : Matrice de corrélation des paramètres

	H_EcTy	Comp_EcTy	Cont_EcTy	S_pl_moy_B	Den_N_EcTy	Orien_EcTy	NbBat_Mail	H_moy_bat	Comp_bat	Cont_bat	DensN_bat
H_EcTy	1,00	0,28	0,38	0,34	0,83	-0,01	-0,12	0,84	0,05	0,40	0,61
Comp_EcTy	0,28	1,00	0,26	0,24	0,41	-0,02	-0,08	0,33	0,37	0,20	0,43
Cont_EcTy	0,38	0,26	1,00	0,08	0,28	-0,03	0,35	0,40	-0,20	0,69	0,23
S_pl_moy_B	0,34	0,24	0,08	1,00	0,39	-0,14	-0,22	0,44	0,27	0,10	0,46
Den_N_EcTy	0,83	0,41	0,28	0,39	1,00	-0,02	-0,14	0,74	0,44	0,34	0,84
Orien_EcTy	-0,01	-0,02	-0,03	-0,14	-0,02	1,00	-0,02	-0,04	-0,01	-0,06	-0,04
NbBat_Mail	-0,12	-0,08	0,35	-0,22	-0,14	-0,02	1,00	-0,08	-0,30	0,46	-0,12
H_moy_bat	0,84	0,33	0,40	0,44	0,74	-0,04	-0,08	1,00	0,09	0,53	0,78
Comp_bat	0,05	0,37	-0,20	0,27	0,44	-0,01	-0,30	0,09	1,00	-0,20	0,60
Cont_bat	0,40	0,20	0,69	0,10	0,34	-0,06	0,46	0,53	-0,20	1,00	0,38
DensN_bat	0,61	0,43	0,23	0,46	0,84	-0,04	-0,12	0,78	0,60	0,38	1,00
S_env_ext	0,38	0,27	0,10	0,58	0,35	-0,08	-0,23	0,50	0,21	0,07	0,39
Dens_br	0,53	0,28	0,41	0,28	0,50	-0,03	0,30	0,75	0,00	0,72	0,61
CES	0,30	0,20	0,39	0,13	0,28	-0,01	0,57	0,48	-0,06	0,64	0,37
Dens_com	0,10	0,06	0,08	0,08	0,10	-0,01	-0,04	0,10	0,01	0,09	0,09
H_EcTy_moy	0,13	0,06	0,11	0,02	0,09	0,00	0,04	0,13	-0,05	0,16	0,04
Splan_Moy	0,44	0,29	0,31	0,49	0,50	-0,05	0,02	0,62	0,15	0,56	0,59
Comp_Moy	0,29	0,20	0,21	0,20	0,31	-0,03	0,06	0,40	0,03	0,40	0,28
Scours_moy	0,00	0,03	-0,01	0,00	0,00	0,00	-0,01	0,01	-0,03	0,00	-0,01
Ocours_moy	0,14	0,13	0,13	0,08	0,14	-0,03	0,02	0,18	0,02	0,21	0,10
nbbat_moy	0,07	0,04	0,08	0,00	0,05	0,00	0,07	0,10	-0,06	0,17	0,02
Dens_route	0,34	0,14	0,31	0,14	0,32	0,01	0,27	0,41	0,00	0,38	0,34
Angle_EcTy	-0,01	0,00	0,01	-0,04	0,00	0,24	0,04	-0,01	0,02	0,00	0,00
Angle_moy	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,05	0,00	0,01	-0,01	0,01	0,00
Larg_EcTy	0,26	0,13	0,14	0,17	0,25	0,00	-0,21	0,32	0,06	0,23	0,27
Long_tot	0,34	0,13	0,21	0,13	0,30	0,04	0,13	0,37	0,03	0,22	0,29
Larg_pond	0,15	0,08	0,23	0,09	0,16	-0,03	0,22	0,22	-0,02	0,30	0,20
Dens_veg	-0,03	-0,02	-0,14	-0,01	0,02	0,00	-0,24	-0,06	0,14	-0,17	0,02
age_maj	-0,09	-0,05	-0,08	0,01	-0,08	0,01	-0,17	-0,14	0,00	-0,17	-0,11
Coll_Ind	0,66	0,26	0,43	0,27	0,57	-0,04	0,08	0,72	0,03	0,48	0,55
Dist_Centr	0,13	0,06	0,07	0,10	0,14	-0,03	0,03	0,20	-0,01	0,22	0,17
Dens_parce	-0,22	-0,16	0,15	-0,23	-0,31	0,01	0,73	-0,23	-0,37	0,16	-0,33
D_hab_Net	0,60	0,24	0,42	0,17	0,51	-0,01	0,32	0,70	-0,05	0,63	0,50
D_hab_br	0,46	0,19	0,38	0,12	0,40	-0,03	0,31	0,54	-0,08	0,58	0,39
Voiture	0,56	0,24	0,40	0,19	0,50	-0,01	0,33	0,66	0,01	0,54	0,52

	S_env_ext	Dens_br	CES	Dens_com	H_EcTy_bl	Splan_Moy	Comp_Moy	Scours_bl	Ocours_bl	nbbat_moy	Dens_route	Angle_EcTy
H_EcTy	0,38	0,53	0,30	0,10	0,13	0,44	0,29	0,00	0,14	0,07	0,34	-0,01
Comp_EcTy	0,27	0,28	0,20	0,06	0,06	0,29	0,20	0,03	0,13	0,04	0,14	0,00
Cont_EcTy	0,10	0,41	0,39	0,08	0,11	0,31	0,21	-0,01	0,13	0,08	0,31	0,01
S_pl_moy_B	0,58	0,28	0,13	0,08	0,02	0,49	0,20	0,00	0,08	0,00	0,14	-0,04
Den_N_EcTy	0,35	0,50	0,28	0,10	0,09	0,50	0,31	0,00	0,14	0,05	0,32	0,00
Orien_EcTy	-0,08	-0,03	-0,01	-0,01	0,00	-0,05	-0,03	0,00	-0,03	0,00	0,01	0,24
NbBat_Mail	-0,23	0,30	0,57	-0,04	0,04	0,02	0,06	-0,01	0,02	0,07	0,27	0,04
H_moy_bat	0,50	0,75	0,48	0,10	0,13	0,62	0,40	0,01	0,18	0,10	0,41	-0,01
Comp_bat	0,21	0,00	-0,06	0,01	-0,05	0,15	0,03	-0,03	0,02	-0,06	0,00	0,02
Cont_bat	0,07	0,72	0,64	0,09	0,16	0,56	0,40	0,00	0,21	0,17	0,38	0,00
DensN_bat	0,39	0,61	0,37	0,09	0,04	0,59	0,28	-0,01	0,10	0,02	0,34	0,00
S_env_ext	1,00	0,31	0,17	0,04	0,04	0,46	0,24	0,35	0,12	0,01	0,13	-0,02
Dens_br	0,31	1,00	0,88	0,05	0,14	0,74	0,51	0,01	0,22	0,15	0,41	0,02
CES	0,17	0,88	1,00	0,02	0,11	0,56	0,41	0,01	0,18	0,14	0,42	0,06
Dens_com	0,04	0,05	0,02	1,00	0,02	0,12	0,08	0,00	0,06	0,01	0,05	0,01
H_EcTy_moy	0,04	0,14	0,11	0,02	1,00	0,12	0,31	0,02	0,14	0,90	0,07	-0,01
Splan_Moy	0,46	0,74	0,56	0,12	0,12	1,00	0,58	0,00	0,22	0,13	0,24	-0,02
Comp_Moy	0,24	0,51	0,41	0,08	0,31	0,58	1,00	0,01	0,41	0,45	0,15	-0,01
Scours_moy	0,35	0,01	0,01	0,00	0,02	0,00	0,01	1,00	0,01	0,03	-0,01	-0,01
Ocours_moy	0,12	0,22	0,18	0,06	0,14	0,22	0,41	0,01	1,00	0,16	0,07	-0,01
nbbat_moy	0,01	0,15	0,14	0,01	0,90	0,13	0,45	0,03	0,16	1,00	0,06	-0,01
Dens_route	0,13	0,41	0,42	0,05	0,07	0,24	0,15	-0,01	0,07	0,06	1,00	0,10
Angle_EcTy	-0,02	0,02	0,06	0,01	-0,01	-0,02	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	0,10	1,00
Angle_moy	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,03
Larg_EcTy	0,15	0,21	0,03	0,04	0,06	0,25	0,13	-0,01	0,07	0,04	0,30	-0,04
Long_tot	0,14	0,29	0,30	0,04	0,05	0,14	0,10	-0,01	0,04	0,03	0,72	0,09
Larg_pond	0,05	0,27	0,27	0,04	0,05	0,20	0,12	0,00	0,05	0,04	0,66	0,05
Dens_veg	-0,02	-0,19	-0,29	-0,04	-0,03	-0,08	-0,06	-0,01	-0,04	-0,03	-0,23	-0,05
age_maj	-0,01	-0,19	-0,17	0,01	-0,04	-0,10	-0,09	0,01	-0,03	-0,05	-0,06	0,01
Coll_Ind	0,32	0,58	0,45	0,07	0,11	0,41	0,29	0,01	0,14	0,09	0,45	0,01
Dist_Centr	0,06	0,28	0,20	0,02	0,04	0,26	0,20	0,00	0,08	0,06	0,10	-0,03
Dens_parce	-0,22	0,04	0,33	-0,04	0,00	-0,16	-0,09	-0,02	-0,05	0,02	0,12	0,03
D_hab_Net	0,23	0,83	0,74	0,04	0,16	0,53	0,47	0,00	0,23	0,17	0,39	0,03
D_hab_br	0,15	0,65	0,58	0,03	0,18	0,42	0,41	0,00	0,21	0,19	0,35	0,01
Voiture	0,25	0,76	0,73	0,04	0,12	0,47	0,38	0,00	0,18	0,11	0,40	0,03

	Angle_moy	Larg_EcTy	Long_tot	Larg_pond	Dens_veg	age_maj	Coll_Ind	Dist_Centr	Dens_parce	D_hab_Net	D_hab_br	Voiture
H_EcTy	0,01	0,26	0,34	0,15	-0,03	-0,09	0,66	0,13	-0,22	0,60	0,46	0,56
Comp_EcTy	0,00	0,13	0,13	0,08	-0,02	-0,05	0,26	0,06	-0,16	0,24	0,19	0,24
Cont_EcTy	0,01	0,14	0,21	0,23	-0,14	-0,08	0,43	0,07	0,15	0,42	0,38	0,40
S_pl_moy_B	0,00	0,17	0,13	0,09	-0,01	0,01	0,27	0,10	-0,23	0,17	0,12	0,19
Den_N_EcTy	0,01	0,25	0,30	0,16	0,02	-0,08	0,57	0,14	-0,31	0,51	0,40	0,50
Orien_EcTy	0,05	0,00	0,04	-0,03	0,00	0,01	-0,04	-0,03	0,01	-0,01	-0,03	-0,01
NbBat_Mail	0,00	-0,21	0,13	0,22	-0,24	-0,17	0,08	0,03	0,73	0,32	0,31	0,33
H_moy_bat	0,01	0,32	0,37	0,22	-0,06	-0,14	0,72	0,20	-0,23	0,70	0,54	0,66
Comp_bat	-0,01	0,06	0,03	-0,02	0,14	0,00	0,03	-0,01	-0,37	-0,05	-0,08	0,01
Cont_bat	0,01	0,23	0,22	0,30	-0,17	-0,17	0,48	0,22	0,16	0,63	0,58	0,54
DensN_bat	0,00	0,27	0,29	0,20	0,02	-0,11	0,55	0,17	-0,33	0,50	0,39	0,52
S_env_ext	0,01	0,15	0,14	0,05	-0,02	-0,01	0,32	0,06	-0,22	0,23	0,15	0,25
Dens_br	0,01	0,21	0,29	0,27	-0,19	-0,19	0,58	0,28	0,04	0,83	0,65	0,76
CES	0,00	0,03	0,30	0,27	-0,29	-0,17	0,45	0,20	0,33	0,74	0,58	0,73
Dens_com	0,01	0,04	0,04	0,04	-0,04	0,01	0,07	0,02	-0,04	0,04	0,03	0,04
H_EcTy_moy	0,00	0,06	0,05	0,05	-0,03	-0,04	0,11	0,04	0,00	0,16	0,18	0,12
Splan_Moy	0,00	0,25	0,14	0,20	-0,08	-0,10	0,41	0,26	-0,16	0,53	0,42	0,47
Comp_Moy	0,00	0,13	0,10	0,12	-0,06	-0,09	0,29	0,20	-0,09	0,47	0,41	0,38
Scours_moy	0,00	-0,01	-0,01	0,00	-0,01	0,01	0,01	0,00	-0,02	0,00	0,00	0,00
Ocours_moy	0,01	0,07	0,04	0,05	-0,04	-0,03	0,14	0,08	-0,05	0,23	0,21	0,18
nbbat_moy	0,00	0,04	0,03	0,04	-0,03	-0,05	0,09	0,06	0,02	0,17	0,19	0,11
Dens_route	0,00	0,30	0,72	0,66	-0,23	-0,06	0,45	0,10	0,12	0,39	0,35	0,40
Angle_EcTy	0,03	-0,04	0,09	0,05	-0,05	0,01	0,01	-0,03	0,03	0,03	0,01	0,03
Angle_moy	1,00	0,00	0,00	-0,01	0,00	-0,01	0,00	0,02	0,00	0,01	0,00	0,01
Larg_EcTy	0,00	1,00	0,26	0,17	0,07	-0,01	0,24	0,08	-0,22	0,14	0,16	0,09
Long_tot	0,00	0,26	1,00	0,02	-0,13	0,05	0,43	0,04	0,05	0,32	0,27	0,35
Larg_pond	-0,01	0,17	0,02	1,00	-0,18	-0,11	0,21	0,10	0,09	0,20	0,21	0,19
Dens_veg	0,00	0,07	-0,13	-0,18	1,00	-0,03	-0,04	-0,01	-0,20	-0,17	-0,12	-0,17
age_maj	-0,01	-0,01	0,05	-0,11	-0,03	1,00	-0,10	-0,04	-0,11	-0,16	-0,17	-0,12
Coll_Ind	0,00	0,24	0,43	0,21	-0,04	-0,10	1,00	0,14	-0,11	0,61	0,54	0,59
Dist_Centr	0,02	0,08	0,04	0,10	-0,01	-0,04	0,14	1,00	-0,07	0,22	0,21	0,14
Dens_parce	0,00	-0,22	0,05	0,09	-0,20	-0,11	-0,11	-0,07	1,00	0,08	0,08	0,10
D_hab_Net	0,01	0,14	0,32	0,20	-0,17	-0,16	0,61	0,22	0,08	1,00	0,71	0,92
D_hab_br	0,00	0,16	0,27	0,21	-0,12	-0,17	0,54	0,21	0,08	0,71	1,00	0,60
Voiture	0,01	0,09	0,35	0,19	-0,17	-0,12	0,59	0,14	0,10	0,92	0,60	1,00

Annexe 5 : Détail des méthodes de classification

Méthode ACP

Parameters

Generated axis : 10
Compute COS2 and CTR : 0
Standardizing attributes : 1

Results

Eigen values

Axis	Eigen value	% explained	Histogram	% cumulated
1	6,550026	31,19%		31,19%
2	2,218947	10,57%		41,76%
3	1,809764	8,62%		50,37%
4	1,434667	6,83%		57,21%
5	1,029191	4,90%		62,11%
6	1,011252	4,82%		66,92%
7	0,989407	4,71%		71,63%
8	0,943415	4,49%		76,13%
9	0,877798	4,18%		80,31%
10	0,793688	3,78%		84,09%
11	0,673105	3,21%		87,29%
12	0,521314	2,48%		89,77%
13	0,440785	2,10%		91,87%
14	0,376454	1,79%		93,67%
15	0,345748	1,65%		95,31%
16	0,276522	1,32%		96,63%
17	0,255154	1,22%		97,84%

Matrix trace = 37,00

Global critical values	
Kaiser-Guttman	1
Karlis-Saporta-Spinaki	1,06533

Eigenvalue table - Test for significance

Eigenvalues - Significance		
Axis	Eigenvalue	Broken-stick critical values
1	10,632236	4,201586
2	2,983329	3,201586
3	2,201339	2,701586
4	1,851235	2,368253
5	1,688144	2,118253
6	1,421218	1,918253
7	1,274526	1,751586
8	1,204173	1,608729
9	1,090717	1,483729
10	1,074707	1,372618
11	1,025012	1,272618
12	1,000182	1,181709
13	0,941748	1,098376
14	0,917467	1,021452
15	0,844208	0,950024
16	0,82655	0,883357
17	0,765032	0,820857
18	0,722541	0,762034
19	0,610542	0,706478
20	0,601106	0,653847
21	0,584408	0,603847
22	0,504379	0,556228
23	0,452826	0,510773
24	0,366641	0,467295
25	0,286146	0,425628
26	0,234855	0,385628
27	0,209276	0,347167
28	0,17527	0,310129
29	0,121499	0,274415
30	0,090889	0,239932
31	0,088162	0,206599
32	0,072218	0,174341
33	0,046001	0,143091
34	0,039236	0,112788
35	0,029611	0,083376
36	0,020128	0,054805
37	0,00244	0,027027

Factor Loadings [Communality Estimates]

Attribute	Axis1		Axis2		Axis3	
	Corr.	% (Tot. %)	Corr.	% (Tot. %)	Corr.	% (Tot. %)
HEcTy	-0,6868	47 % (47 %)	-0,4085	17 % (64 %)	-0,1279	2 % (65 %)
CompEcTy	-0,3102	10 % (10 %)	-0,3246	11 % (20 %)	0,0138	0 % (20 %)
ContEcTy	-0,5564	31 % (31 %)	0,2208	5 % (36 %)	-0,0738	1 % (36 %)
SplmoyB	-0,1343	2 % (2 %)	-0,2568	7 % (8 %)	-0,0047	0 % (8 %)
DenNEcTy	-0,6441	41 % (41 %)	-0,5873	34 % (76 %)	-0,1048	1 % (77 %)
OrienEcTy	-0,008	0 % (0 %)	0,1263	2 % (2 %)	-0,1059	1 % (3 %)
NbBatMail	-0,3816	15 % (15 %)	0,7262	53 % (67 %)	-0,0676	0 % (68 %)
Hmoybat	-0,8032	65 % (65 %)	-0,4078	17 % (81 %)	-0,0478	0 % (81 %)
Compbat	-0,0229	0 % (0 %)	-0,64	41 % (41 %)	-0,0335	0 % (41 %)
Contbat	-0,7439	55 % (55 %)	0,2299	5 % (61 %)	0,1033	1 % (62 %)
DensNet	-0,6529	43 % (43 %)	-0,6232	39 % (81 %)	-0,0848	1 % (82 %)
Senvext	-0,888	79 % (79 %)	0,1997	4 % (83 %)	0,0229	0 % (83 %)
Densbr	-0,9083	83 % (83 %)	0,1014	1 % (84 %)	0,1085	1 % (85 %)
CES	-0,7987	64 % (64 %)	0,3954	16 % (79 %)	0,0124	0 % (79 %)
HEcTybl	-0,2086	4 % (4 %)	0,0633	0 % (5 %)	0,6941	48 % (53 %)
SplMoybl	-0,6857	47 % (47 %)	-0,2109	4 % (51 %)	0,2678	7 % (59 %)
Compbloc	-0,4855	24 % (24 %)	-0,0593	0 % (24 %)	0,5521	30 % (54 %)
Scours	-0,0105	0 % (0 %)	0,0097	0 % (0 %)	0,0413	0 % (0 %)
Ocours	-0,21	4 % (4 %)	-0,0264	0 % (4 %)	0,2729	7 % (12 %)
Nbbatbl	-0,2012	4 % (4 %)	0,1025	1 % (5 %)	0,7455	56 % (61 %)
Densroute	-0,6027	36 % (36 %)	0,1963	4 % (40 %)	-0,4171	17 % (58 %)
AngleEcTy	-0,1248	2 % (2 %)	0,2138	5 % (6 %)	-0,2221	5 % (11 %)

Attribute	Axis1		Axis2		Axis3	
	Corr.	% (Tot. %)	Corr.	% (Tot. %)	Corr.	% (Tot. %)
LargEcTy	-0,2326	5 % (5 %)	-0,2749	8 % (13 %)	-0,0991	1 % (14 %)
Longroute	-0,4972	25 % (25 %)	0,0804	1 % (25 %)	-0,3884	15 % (40 %)
Largroute	-0,3723	14 % (14 %)	0,2053	4 % (18 %)	-0,2475	6 % (24 %)
Densveg	0,2397	6 % (6 %)	-0,3351	11 % (17 %)	0,1366	2 % (19 %)
agemaj	0,1582	3 % (3 %)	-0,0363	0 % (3 %)	-0,1038	1 % (4 %)
CollInd	-0,7524	57 % (57 %)	-0,1268	2 % (58 %)	-0,1919	4 % (62 %)
DistCentr	-0,2142	5 % (5 %)	-0,0771	1 % (5 %)	0,1569	2 % (8 %)
HIndus	-0,2034	4 % (4 %)	-0,0727	1 % (5 %)	-0,1343	2 % (6 %)
Ssolindus	-0,1171	1 % (1 %)	-0,0716	1 % (2 %)	-0,1118	1 % (3 %)
Spltot	-0,915	84 % (84 %)	0,094	1 % (85 %)	0,1027	1 % (86 %)
Dhabmail	-0,209	4 % (4 %)	0,1166	1 % (6 %)	-0,156	2 % (8 %)
DhabNet	-0,8614	74 % (74 %)	0,1335	2 % (76 %)	0,0567	0 % (76 %)
Dhabbr	-0,737	54 % (54 %)	0,1382	2 % (56 %)	0,082	1 % (57 %)
Dhabm2	0,2973	9 % (9 %)	-0,0772	1 % (9 %)	0,0443	0 % (10 %)
Voitmen	0,8016	64 % (64 %)	-0,0401	0 % (64 %)	0,1229	2 % (66 %)
Var. Expl.	10,6322	29 % (29 %)	2,9833	8 % (37 %)	2,2013	6 % (43 %)

Eigen vectors -- Factor Scores

Attribute	Mean	Std-dev	Axis1	Axis2	Axis3	Axis4
HEcTy	2,948866	2,5677	-0,210627	-0,236515	-0,086172	0,159332
CompEcTy	0,718697	0,926914	-0,095147	-0,187917	0,009298	-0,070424
ContEcTy	0,082695	0,082832	-0,17064	0,12784	-0,049734	0,109684
SplmoyB	977,080646	7495,077088	-0,041181	-0,148686	-0,003134	-0,045189
DenNEcTy	0,902201	0,851321	-0,197523	-0,340024	-0,070631	0,039956
OrienEcTy	48,00081	8,446463	-0,002467	0,073119	-0,071369	0,029629
NbBatMail	52,314721	42,48005	-0,117027	0,420423	-0,045581	-0,105667
Hmoybat	8,445693	4,454998	-0,246331	-0,236078	-0,032209	0,040268
Compbat	4,882053	2,034465	-0,007018	-0,370512	-0,022592	-0,183192
Contbat	0,054776	0,092373	-0,228149	0,133096	0,069652	0,001159
DensNet	2,450776	1,677603	-0,200238	-0,360791	-0,057184	-0,099451
Senvext	24064,96105	22658,82228	-0,272324	0,115625	0,015405	-0,161147
Densbr	0,408817	0,528729	-0,278565	0,058735	0,073152	-0,172577
CES	0,129815	0,089764	-0,244938	0,22894	0,00835	-0,194053
HEcTybl	0,706532	7,200789	-0,063963	0,036647	0,467808	0,288968
SplMoybl	2180,293713	5812,935793	-0,210297	-0,12209	0,180523	-0,169787
Compbloc	2144,551284	7458,390235	-0,148885	-0,03431	0,372094	0,003958
Scours	300,271367	25357,20152	-0,003223	0,005622	0,027839	-0,001341
Ocours	0,01338	0,098131	-0,064403	-0,015256	0,183928	0,019315
Nbbatbl	2,130188	21,513045	-0,061719	0,059347	0,502491	0,26904
Densroute	0,117571	0,064908	-0,184824	0,113639	-0,281146	0,133969
AngleEcTy	46,560928	13,707063	-0,038264	0,123773	-0,14972	0,030004
LargEcTy	1,811181	0,953936	-0,071325	-0,159174	-0,066822	0,173253
Longroute	1122,282706	477,114942	-0,152491	0,046553	-0,261789	0,170312
Largroute	3,43041	1,273062	-0,114187	0,118868	-0,166792	0,036701
Densveg	0,231782	0,194682	0,073521	-0,193985	0,092064	0,021348
agemaj	1967,100649	16,148095	0,048521	-0,021023	-0,069948	0,11962
CollInd	0,426362	0,326231	-0,230738	-0,073409	-0,12933	0,181111
DistCentr	855,400751	532,247982	-0,065706	-0,044622	0,105732	-0,053221
HIndus	3,421688	4,062041	-0,062386	-0,042074	-0,090486	0,110944
Ssolindus	246,528413	617,629397	-0,035921	-0,041427	-0,075371	0,102698
Spltot	26691,55155	33184,60837	-0,280611	0,054429	0,069196	-0,160927
Dhabmail	0,012181	0,00784	-0,064082	0,067522	-0,105135	0,490996
DhabNet	0,005353	0,007551	-0,264174	0,077263	0,038226	0,022826
Dhabbr	0,004729	0,007633	-0,226024	0,080033	0,05527	0,043724
Dhabm2	0,06403	0,095661	0,091164	-0,044698	0,029826	0,418442
Voitmen	1,212503	0,306838	0,245838	-0,02319	0,082833	-0,146238

Méthode K-means

Parameters

K-Means parameters	
Clusters	5
Max Iteration	20
Trials	10
Distance normalization	variance
Average computation	McQueen
Seed random generator	Standard

Results

Global evaluation

Within Sum of Squares	846348,5733
Total Sum of Squares	1248417
R-Square	0,3221

Cluster size and WSS

Clusters	5		
Cluster	Description	Size	WSS
cluster n°1	ckmeans1	1203	157404,0701
cluster n°2	ckmeans2	4054	201617,3134
cluster n°3	ckmeans3	11489	154237,2153
cluster n°4	ckmeans4	13429	231451,8494
cluster n°5	ckmeans5	3566	101638,1251

Cluster centroids

Attribute	Cluster n°1	Cluster n°2	Cluster n°3	Cluster n°4	Cluster n°5
HEcTy	6,726071	7,163389	2,393685	1,787231	3,046568
CompEcTy	1,480855	1,409249	0,756315	0,592973	0,028789
ContEcTy	0,195603	0,152483	0,085731	0,038536	0,121781
SplmoyB	2878,388467	3453,405195	648,238088	599,610727	1,427997
OrienEcTy	47,830807	47,834084	48,632058	47,452874	48,277375
NbBatMail	107,451372	44,96596	70,169031	28,030308	75,996635
Hmoybat	19,088172	15,391339	7,487708	6,32063	8,048385
Compbat	4,393706	5,922535	5,546894	5,337154	0,008096
Contbat	0,35284	0,114445	0,04376	0,014426	0,073836
Senvext	104293,8482	43157,40017	25658,4602	9359,209599	25539,92602
Densbr	2,599771	0,818996	0,367455	0,130298	0,385503
CES	0,41531	0,175908	0,15211	0,066272	0,148568
HEcTybl	7,295212	1,874717	0,353169	0,169568	0,316371
SplMoybl	22422,00851	5782,940637	1159,859657	727,28041	15,506558
Compbloc	20751,54058	4624,415237	1346,35542	974,829291	24,835168
Scours	1217,461232	101,802953	7,755239	11,896813	2244,890331
Ocours	0,116336	0,031879	0,007405	0,00722	0,00006
Nbbatbl	25,301758	2,810969	1,280662	0,967932	0,653147
Densroute	0,199788	0,171711	0,145125	0,067794	0,126966
AngleEcTy	48,398525	47,952446	49,463193	43,100279	48,040762
LargEcTy	2,658801	2,298548	1,60073	1,809407	1,655889
Longroute	1440,414991	1539,504957	1313,841363	782,397446	1203,429539
Largroute	4,735664	3,906139	3,745831	2,877342	3,515785
Densveg	0,121595	0,195384	0,187413	0,314085	0,143346
agemaj	1954,634248	1966,099408	1968,627731	1967,029861	1967,791082
CollInd	0,98205	0,877218	0,462529	0,199604	0,463759
DistCentr	1661,254433	844,244234	794,84481	850,283385	810,598406
HIndus	4,439042	5,057804	3,594877	2,557491	3,914912
Ssolindus	225,509485	462,457508	256,75654	161,113549	296,846551
Spltot	163414,2552	53338,28293	24156,42049	8812,170378	25773,17499
Dhabmail	0,012754	0,01582	0,012904	0,009818	0,014422
DhabNet	0,031466	0,012482	0,00473	0,001259	0,005863
Dhabm2	0,005764	0,027851	0,045538	0,098414	0,054914
Voitmen	0,535125	0,843325	1,198073	1,429166	1,091293

Méthode des cartes de Kohonen

Parameters

SOM parameters	
Columns	3
Rows	2
Distance normalization	variance
Learning rate	0,05
Seed random generator	Standard

Results

MAP Topology

	1	2	3
1	4071	8047	2023
2	18401	58	1141

MAP Quality

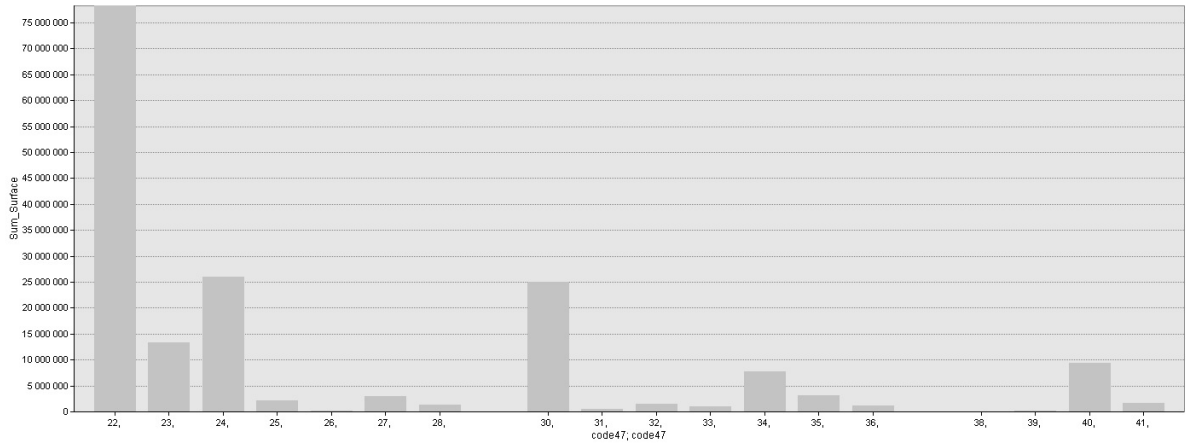
Ratio explained	0,3112

Cluster centroids

Attribute	Cluster n°1	Cluster n°2	Cluster n°3	Cluster n°4	Cluster n°5	Cluster n°6
HEcTy	2,933	3,494	9,450	1,768	4,610	6,596
CompEcTy	0,245	0,970	1,528	0,571	2,691	1,480
ContEcTy	0,142	0,106	0,154	0,045	0,127	0,194
SplmoyB	53,474	1261,783	5018,273	491,538	2013,410	2877,195
OrienEcTy	48,090	47,982	48,172	47,993	44,224	47,831
NbBatMail	103,834	59,081	29,847	36,911	31,569	110,081
Hmoybat	7,833	9,770	18,379	6,242	11,355	19,077
Compbat	1,513	5,800	6,023	5,127	5,678	4,425
Contbat	0,100	0,061	0,118	0,016	0,125	0,356
Senvext	29929,688	32040,482	44302,253	11931,470	28974,209	106439,426
Densbr	0,434	0,514	0,894	0,164	0,600	2,651
CES	0,173	0,164	0,161	0,084	0,142	0,423
HEcTybl	0,448	0,723	2,331	0,157	9,069	7,074
SplMoybl	173,097	2423,724	7476,745	647,367	6168,811	22753,241
Compbloc	279,158	2340,444	5576,883	894,564	17752,441	20698,288
Scours	531,141	750,544	131,293	7,371	2724,651	1200,947
Ocours	0,002	0,014	0,027	0,004	1,503	0,094
Nbbatbl	1,333	1,631	2,836	0,950	24,784	25,134
Densroute	0,144	0,154	0,179	0,084	0,105	0,200
AngleEcTy	48,450	48,585	47,512	45,057	40,557	48,412
LargEcTy	1,449	1,840	2,520	1,749	2,034	2,644
Longroute	1276,058	1408,641	1584,104	892,895	1026,355	1439,474
Largroute	3,774	3,746	3,976	3,076	3,226	4,736
Densveg	0,134	0,206	0,199	0,276	0,154	0,121
agemaj	1965,775	1966,355	1967,382	1968,490	1969,121	1954,088
CollInd	0,477	0,672	0,919	0,219	0,589	0,982
DistCentr	810,182	805,453	936,989	827,204	1054,581	1668,947
HIndus	3,736	4,332	5,424	2,675	5,915	4,251
Ssolindus	266,248	331,493	557,133	172,852	794,141	186,600
Spltot	28554,649	33736,119	58234,471	11011,762	43013,086	166475,535
Dhabmail	0,015	0,014	0,017	0,010	0,012	0,013
DhabNet	0,007	0,007	0,014	0,002	0,010	0,032
Dhabm2	0,047	0,037	0,033	0,086	0,056	0,005
Voitmen	1,068	1,043	0,796	1,407	1,006	0,532

Annexe 6 : Origines des erreurs d'identification dans la carte initiale de GENIUS

Pour chaque type, on s'intéresse aux zones mal identifiées et on observe les classes du MOS s'y trouvant. Pour la zone non bâtie on obtient les erreurs suivantes :



Classes du MOS mal identifiées pour les mailles non bâties

Les principales sources d'erreurs sont les classes du MOS suivantes :

- 22, 23 et 24 qui correspondent à de l'habitat individuel
- 30 « Zones ou espaces affectés aux activités »

On observe qu'il y a un manque de précision dans la distinction non bâti / maisons individuelles, soit des classes de densités très proches. Cette imprécision peut être due au découpage des mailles, mais aussi à de petits écarts entre les bases de données. En effet, on observe que c'est surtout en périphérie de la tâche urbaine que se situent ces erreurs, zone où les changements sont les plus rapides et ou le chevauchement bâti / non bâti est le plus flou.

Par ailleurs, on remarque que les zones industrielles sont mal identifiées. Nous observerons que cette erreur est récurrente dans tous les types d'ilot.

Afin de comprendre plus en détail la source de ces erreurs on va chercher à identifier précisément leurs sources, type de quartier par type de quartier.

Type de quartier	Corrélation surfacique
Pavillon discontinu	75,13%
Pavillon continu	76,06%
Immeuble discontinu	56,63%
Immeuble continu	66,54%
Immeuble de grande hauteur	80,53%
Centre ancien	87,28%
Bâtiment d'activité	66,89%

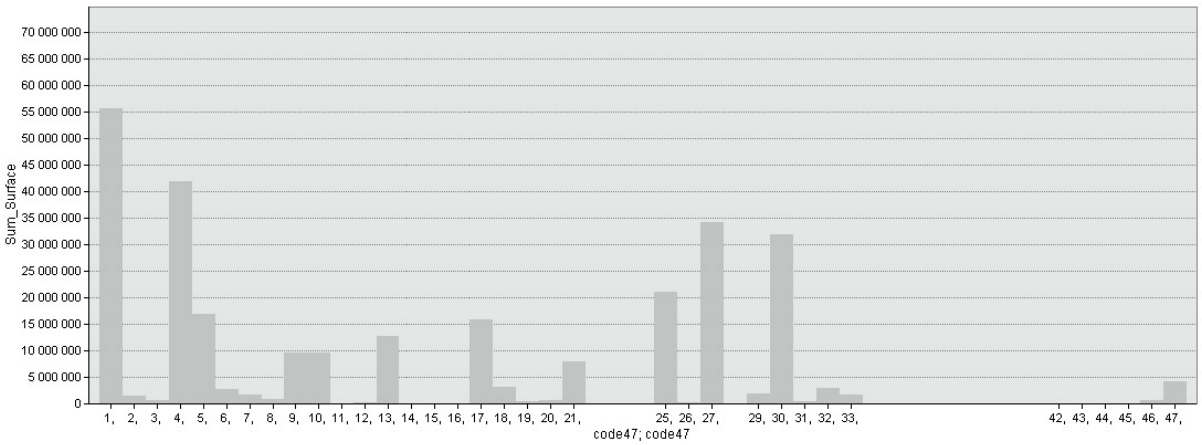
Corrélation surfacique par type

Pavillons discontinus

Le taux de corrélation surfacique est de 75%. Les principales sources d'erreurs sont les classes du MOS suivantes :

- 1 « Bois ou forêts » et 4 « Terres labourées »
- 27 « Habitat collectif discontinu »
- 25 « Habitat continu bas »
- 30 « Zones ou espaces affectés aux activités »

On peut en déduire que les principales erreurs sont liées à des confusions entre des types de densités très proches (non bâti et habitat continu bas). On note également des confusions avec l'habitat collectif discontinu, la discontinuité des typologies étant une caractéristique morphologique qui rapproche les 2 classes.



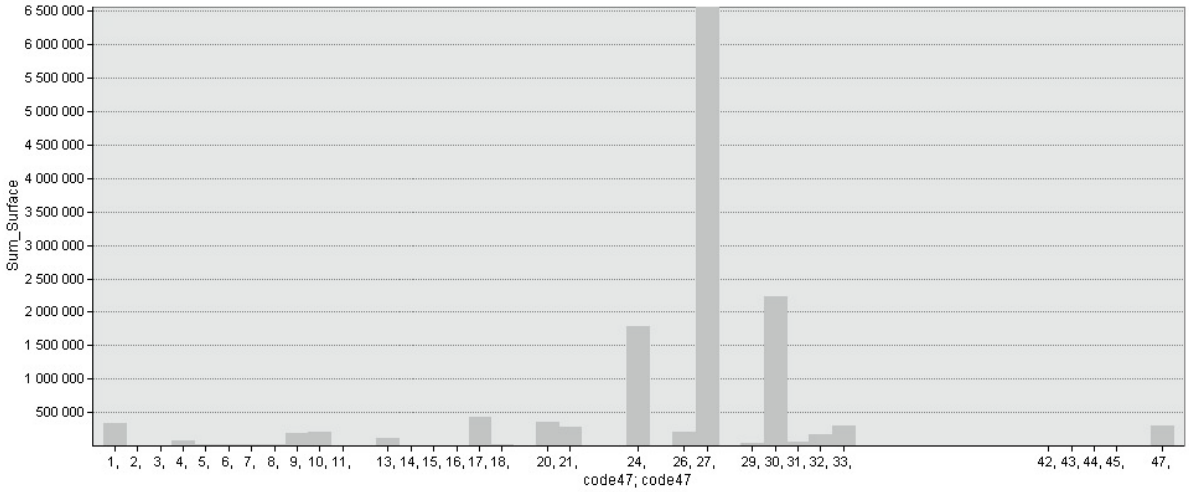
Classes du MOS mal identifiées pour les mailles de type « pavillon discontinu »

Pavillons continus

Le taux de corrélation surfacique est de 76%. Les principales sources d'erreurs sont les classes du MOS suivantes :

- 27 « Habitat collectif discontinu »
- 24 « Habitat rural »
- 30 « Zones ou espaces affectés aux activités »

On peut en déduire que les principales erreurs sont liées à des confusions entre des types de densités très proches.



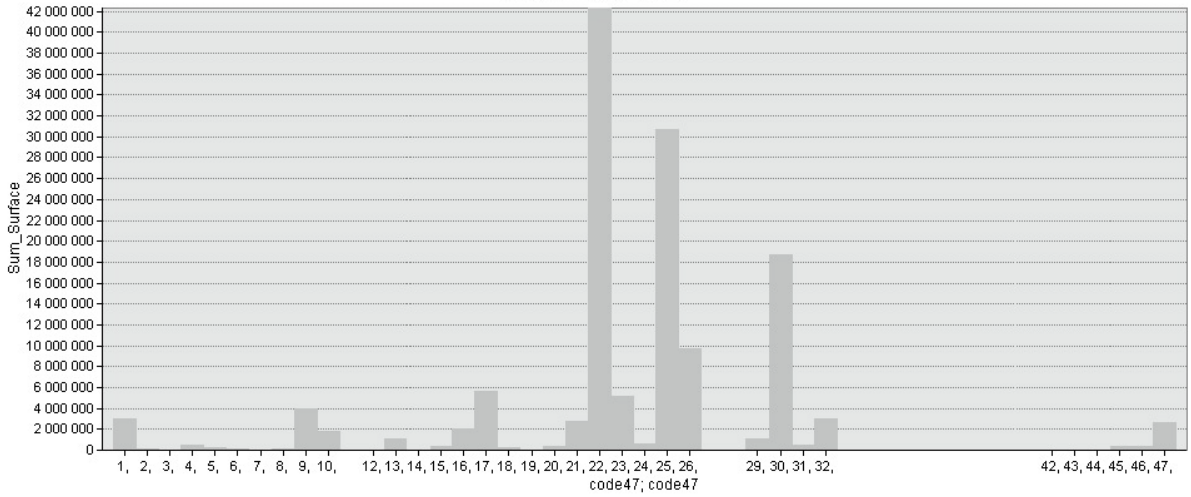
Classes du MOS mal identifiées pour les mailles de type « pavillon continu »

Immeubles discontinus

Le taux de corrélation surfacique est de 57%. Les principales sources d'erreurs sont les classes du MOS suivantes :

- 22 « Habitat individuel »
- 25 « Habitat continu bas »
- 26 « Habitat collectif continu haut »
- 30 « Zones ou espaces affectés aux activités »

Encore une fois, les principales erreurs sont liées à des confusions entre des types de densités très proches.



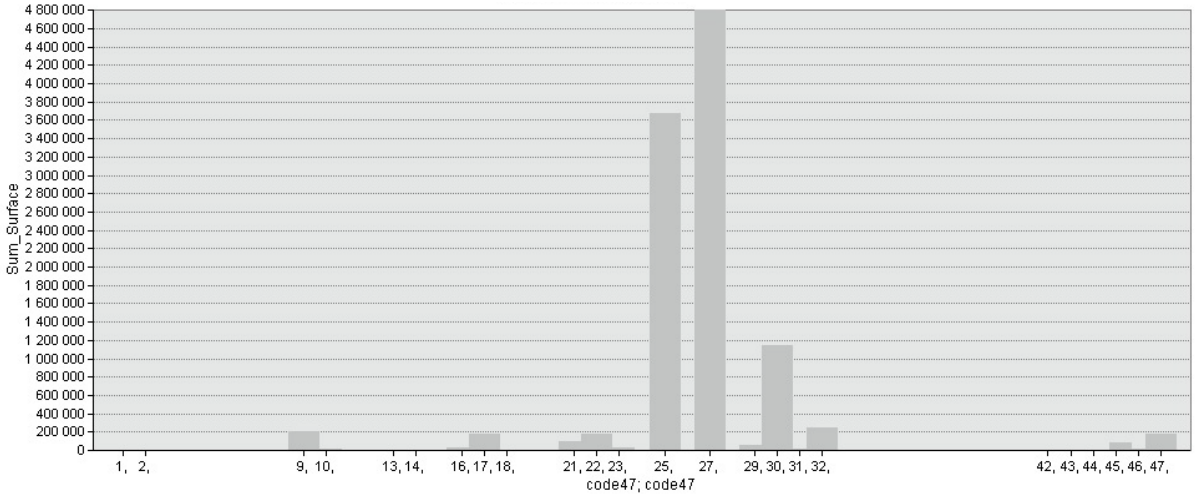
Classes du MOS mal identifiées pour les mailles de type « immeubles discontinus »

Immeubles continus

Le taux de corrélation surfacique est de 67%. Les principales sources d'erreurs sont les classes du MOS suivantes :

- 27 « Habitat collectif discontinu »
- 25 « Habitat continu bas »
- 30 « Zones ou espaces affectés aux activités »

On peut en déduire que les principales erreurs sont liées à des confusions entre des types de densités très proches.



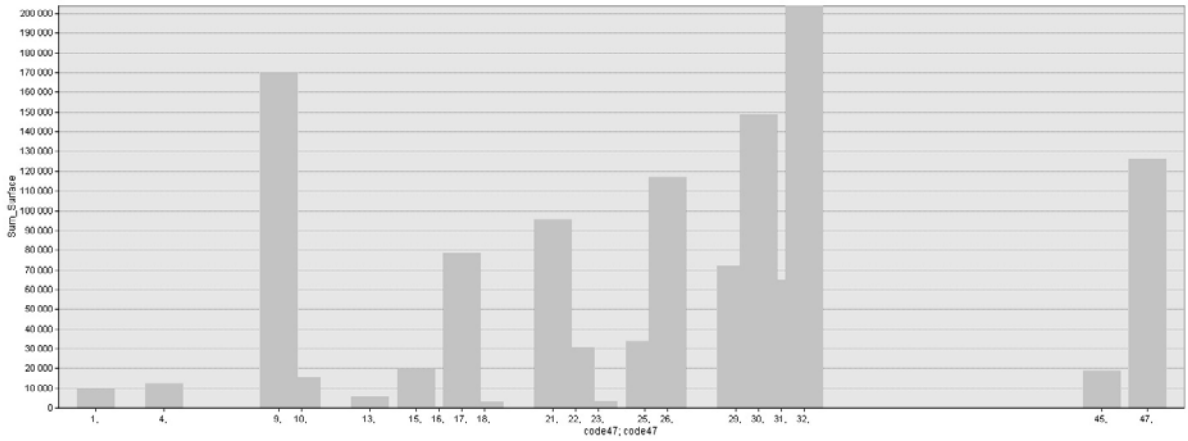
Classes du MOS mal identifiées pour les mailles de type« immeubles continus »

Immeubles de grande hauteur

Le taux de corrélation surfacique est de 80%. Les principales sources d'erreurs sont les classes du MOS suivantes :

- 32 « Commerces »
- 9 « Eau »
- 30 « Zones ou espaces affectés aux activités »

On note ici qu'une partie des erreurs provient de la classe du MOS « commerces ». En effet, nous n'avons pas prévu d'usage « commerce » dans ce type de quartier. Cette hypothèse simplificatrice se révèle donc source d'erreurs. Cependant, le taux de corrélation pour ce type étant bon, on peut la conserver.
Les zones en eaux sont également mal identifiées lors de la validation. Cela prend tout son sens lorsque l'on sait que les immeubles de grande hauteur sont nombreux en front de Seine. On retrouve donc ici un effet de bord due à notre maillage.



Classes du MOS mal identifiées pour les mailles de type « immeubles de grande hauteur »

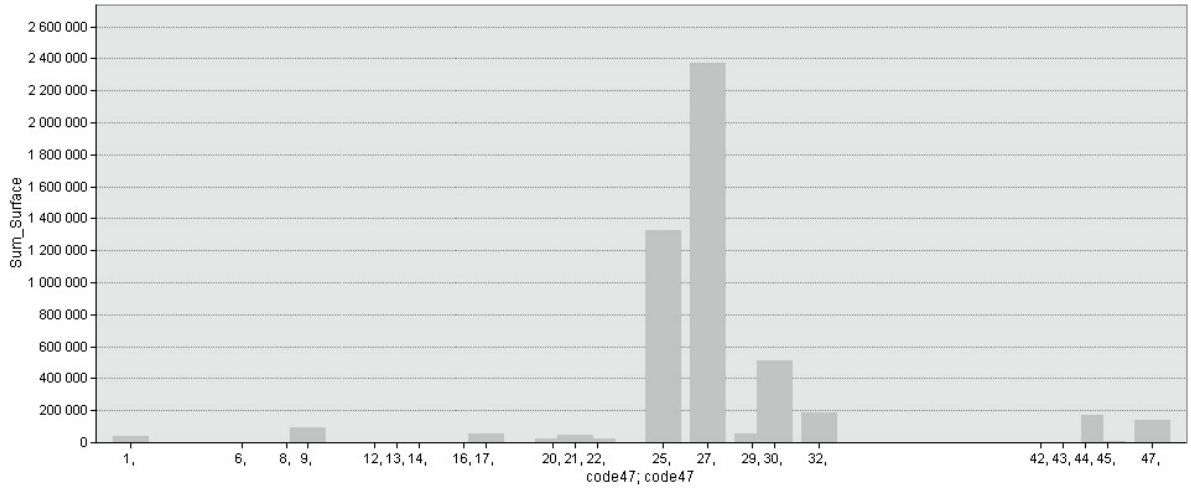
Centre ancien

Le taux de corrélation surfacique est de 87%. Les principales sources d'erreurs sont les classes du MOS suivantes :

- 25 « Habitat continu bas »
- 27 « Habitat collectif discontinu »
- 30 « Zones ou espaces affectés aux activités »

On retrouve le phénomène de confusion entre classe de densité proche (avec l'habitat collectif discontinu). On retrouve également une confusion avec l'habitat continu bas. Ici,

c'est la continuité du tissu qui, traduite en paramètres morphologiques, induit des erreurs d'identification.



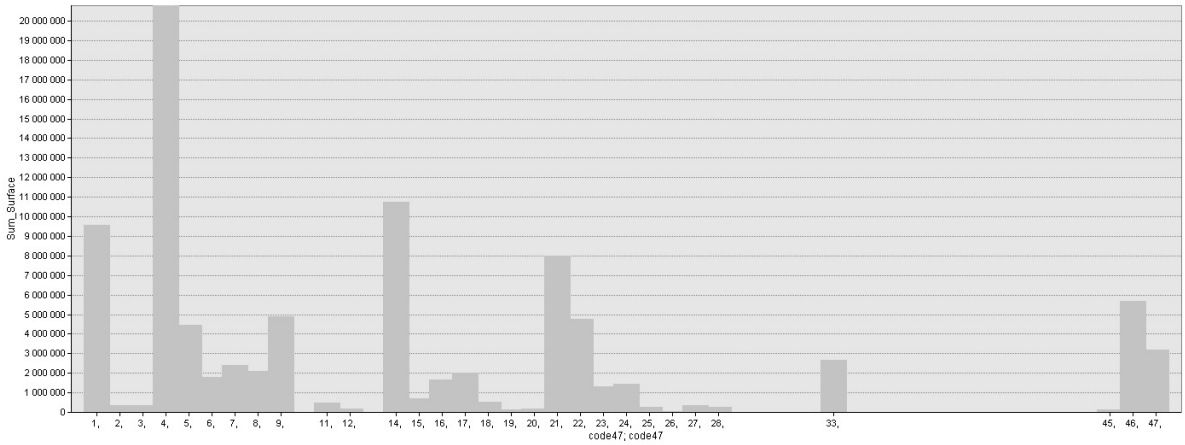
Classes du MOS mal identifiées pour les mailles de type « centre ancien »

Bâtiment d'activité

Le taux de corrélation surfacique est de 67%. Les principales sources d'erreurs sont les classes du MOS suivantes :

- 1 « Bois ou forêts », 4 « Terres labourées » et 21 « Terrains vacants »
- 14 « Parcs ou jardins »
- 22 « Habitat individuel »

Ce type de quartier, globalement à faible densité, est confondu avec les classes du MOS les moins denses. Notons que ce type est mal identifié de manière récurrente dans les 6 types précédents. Ceci est étonnant étant donné que les ilots de type activité ont été directement identifiés par la base de données IGN ce qui laisse penser que les données sont fiables. Le faible taux de corrélation peut être expliqué par l'hétérogénéité des surfaces dans les zones d'activité ainsi que par la grande taille de ce type de bâti qui augmente les effets de bords.



Classes du MOS mal identifiées pour les mailles de type « bâtiment d'activité »

Annexe 7 : Validation chiffrée de GENIUS sur le passé

Validation chiffrée globale

Nous avons ici observé, pour chaque type de la carte initiale de 2008 :

- le nombre d'ilots pour un type donné ;
- parmi ces derniers, le nombre d'ilots correctement simulés par GENIUS entre 1962 et 2008 ;
- le pourcentage de validation correspondant.

	Carte initiale 2008	Carte 2008 obtenue après simulation	Différentiel
	Nombre d'ilot	Nombre d'ilots correctement identifié	% de validation
Totalité zone d'étude	160059	156795	97,96
Bâti	35544	32280	90,82
Non bâti	124 515	124 515	100
Pavillonnaire discontinu	26 532	26 360	99,35
Pavillonnaire continu	946	709	74,95
Immeuble discontinu	5 132	3 882	75,64
Immeuble continu	519	494	95,18
Immeuble de grande hauteur	100	19	19,00
Centre ancien	612	591	96,57
Bâtiment d'activité	1 475	174	11,80

Validation chiffrée

Le taux de validation global est excellent, près de 98 %. Bien que ce chiffre résulte en partie de la facilité d'identifier les mailles non bâties (100 % de corrélation), la validation sur le bâtiment seul est tout de même très bonne avec 90,8 % de validation.

Cependant, il est utile de noter que tous les types ne sont pas identifiés avec la même précision. Les types pavillon discontinu, immeuble continu est centre ancien sont très bien identifiés.

Pour le type « pavillon discontinu » cet excellent taux résulte plusieurs phénomènes : d'une part, il existait déjà beaucoup de maisons individuelles en 1962, GENIUS les a donc conservés. D'autre part, cette typologie est produite en majorité, il n'y a donc pas de difficulté particulière à prédire sa construction. En particulier, cette typologie étant celle qui possède la densité la plus faible, il n'y a jamais de contrainte pour sa construction puisqu'elle ne nécessite jamais la destruction d'un autre ilot.

Pour les types « immeuble continu » et « centre ancien », les bons taux de corrélation proviennent essentiellement du fait que la majorité de ces ilots était déjà construit en 1962.

Les types pavillons continus et immeuble discontinus sont moins bien identifiés, nous devront donc les étudier en plus en détail.

On s'aperçoit que le taux de corrélation des immeubles de grande hauteur est faible. Il est certain que cette forme urbaine est délicate à générer puisqu'elle peut correspondre à des densités faibles à fortes, pouvant ainsi être confondue avec d'autres types. De plus, c'est un type qui n'est plus construit par notre modèle après 1975.

Comme attendu, le taux d'identification des bâtiments d'activité est faible puisque GENIUS ne génère pas ce type d'ilot.

Afin d'affiner notre analyse, nous nous sommes intéressés aux ilots qui ont été créés ou modifiés entre 1962 et 2008, puisque c'est là que réside la principale difficulté.

Ilots créés ou modifiées entre 1962 et 2008

Tout d'abord nous souhaitons savoir si les ilots qui ont été générés par GENIUS (c'est à dire les ilots de la carte générée en 2008 dont l'année de construction est postérieure à 1962) correspondent à la réalité. D'après le tableau ci-dessous, c'est le cas pour 92,6% d'entre eux.

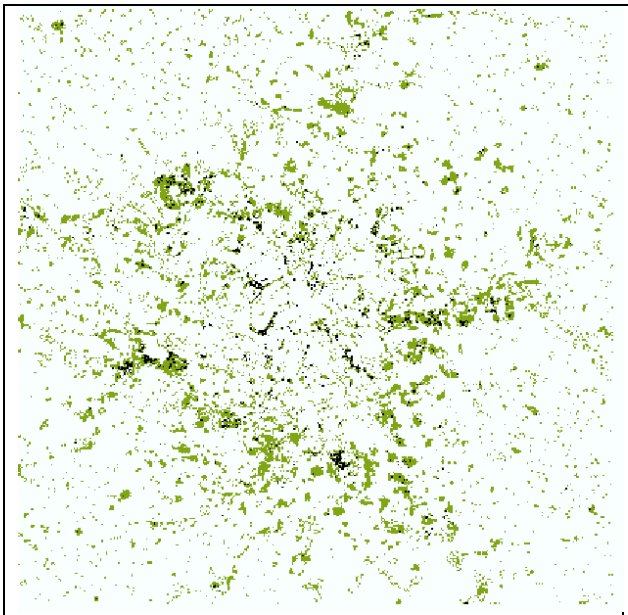
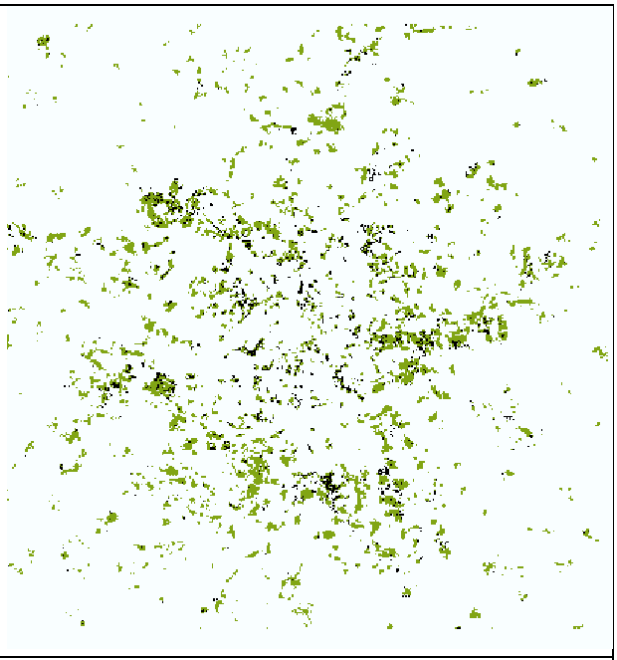
	Carte 2008 obtenue après simulation	Carte initiale 2008	Différentiel (%)
	Nombre d'ilots générés	Nombre d'ilots correctement identifiés	% de validation
Totalité zone d'étude	16 568	15 348	92,64
Pavillonnaire discontinu	15 698	14 804	94,94
Pavillonnaire continu	334	25	7,49
Immeuble discontinu	413	354	85,71
Immeuble continu	72	49	68,06
Immeuble de grande hauteur	28	10	35,71
Centre ancien	23	6	26,09

Validation chiffrée des ilots créés ou modifiés par GENIUS

Dans un deuxième temps, on s'intéresse aux types qui auraient du être construits entre 1962 et 2008 (c'est à dire les ilots de la carte initiale de 2008 dont l'année de construction est postérieure à 1962). On vérifie combien d'entre eux ont effectivement été générés par GENIUS.

	Carte initiale 2008	Correctement simulé 2008	Différentiel (%)
	Nombre d'ilots postérieurs à 1962	Nombre d'ilots correctement générés	% de validation
Totalité zone d'étude	12510	10553	84,36
Pavillonnaire discontinu	10 042	9 922	98,81
Pavillonnaire continu	273	49	17,95
Immeuble discontinu	1 213	477	39,32
Immeuble continu	91	76	83,52
Immeuble de grande hauteur	51	10	19,61
Centre ancien	38	19	50,00
Bâtiment d'activité	762	0	0
Bâtiment remarquable	40	0	0

Validation chiffrée des ilots qui auraient du être construits entre 1962 et 2008

	
Ilots créés ou modifiés par GENIUS entre 1962 et 2008	Ilots qui auraient du être construits entre 1962 et 2008

Légende :

Correspondance
Erreur

Différentiel des types entre 1962 et 2008

Le type « pavillon discontinu » reste très bien corrélé dans tous les cas, on peut donc en déduire que le bon taux global n'est pas du qu'à la masse de maisons individuelles déjà existantes en 1962.

On ne peut cependant pas en dire autant pour les types immeuble continu et centre ancien qui était globalement bien identifiés mais qui ont ici des taux de corrélation plus faibles, en particulier pour le centre ancien. Ce type est donc produit à mauvais escient. Cependant, cette constatation est a relativiser car la quantité produite et à produire est faible. En ce qui concerne le type « immeuble continu », le taux de corrélation reste correct, bien qu'une partie des quartiers qui auraient du être créés ne l'ont pas été.

Comme tout à l'heure, on s'aperçoit que le type « pavillon discontinu » a de mauvais taux de corrélation. Cependant, la quantité produite est correcte (334 mailles générées contre 273 attendues). C'est plutôt la localisation qui pose problème.

En revanche, on constate que le taux de corrélation du type « immeuble discontinu » est meilleur qu'auparavant. Le ci-dessus nous permet de supposer que les quartier de type

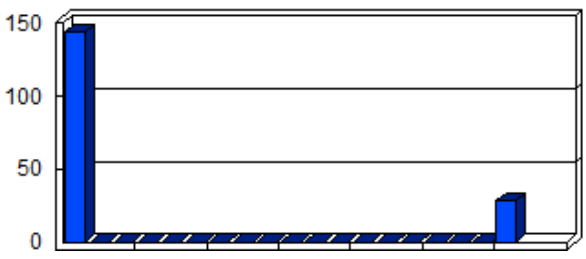
« immeuble discontinu » qui sont créés sont justifiés, mais qu'il n'en est pas suffisamment créés.

Comme nous l'attendions, les immeubles de grande hauteur et les bâtiments d'activités n'ont pas de bons taux de corrélation. Seuls 28 mailles d'immeubles de grande hauteur sont générées contre 51 attendues, ceci étant du au fait que notre modèle ne construit plus cette typologie après 1975.

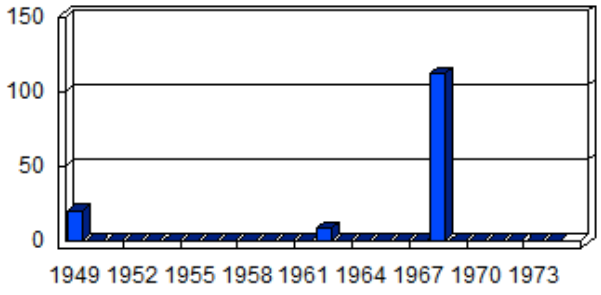
Source des erreurs par type

Afin de comprendre les sources d'erreurs nous nous sommes intéressés aux ilots mal identifiés. Quelles sont les confusions qui ont eu lieu en terme de type ? L'âge des bâtiments a t'il pu être la sources des erreurs (puisque, rappelons-le, des ilots de moins de 30 ans ne peuvent pas changer de type) ?

Type « Pavillon discontinu » :

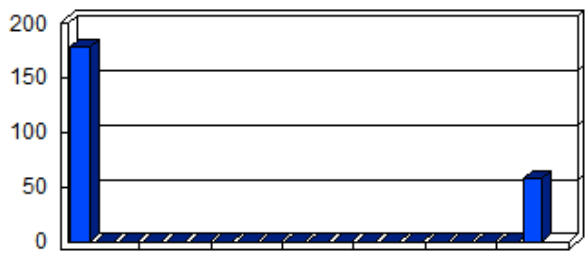


Types mal identifiés

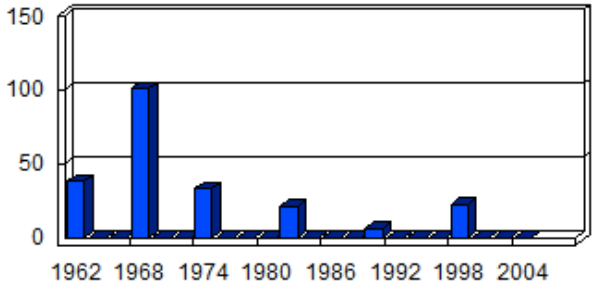


Âges mal identifiés

Type « Pavillon continu » :

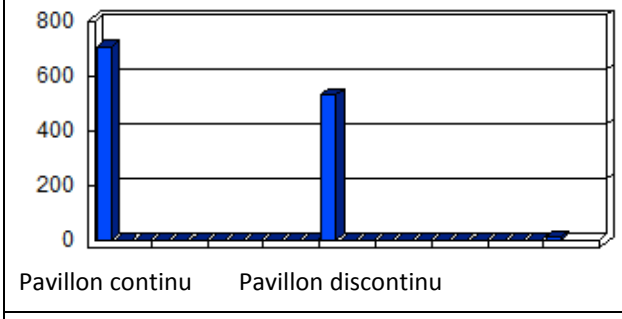


Types mal identifiés

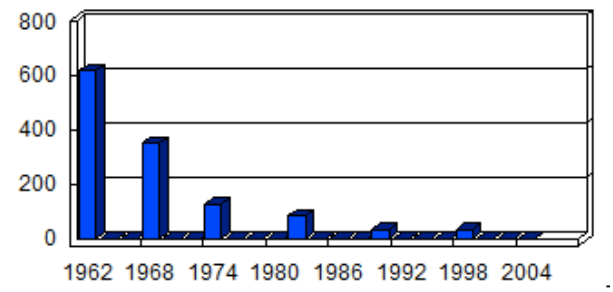


Âges mal identifiés

Type « Immeuble discontinu » :

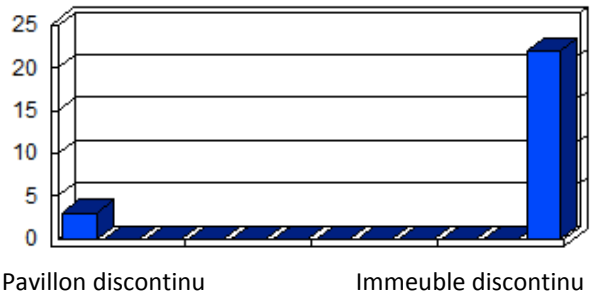


Types mal identifiés

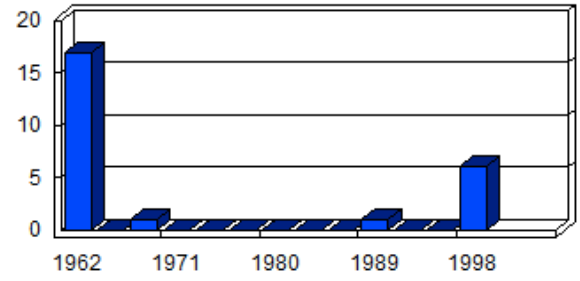


Âges mal identifiés

Type « Immeuble continu » :

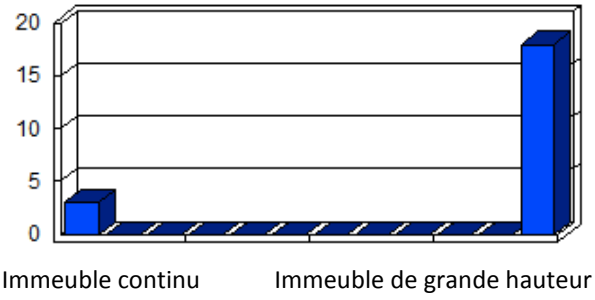


Types mal identifiés

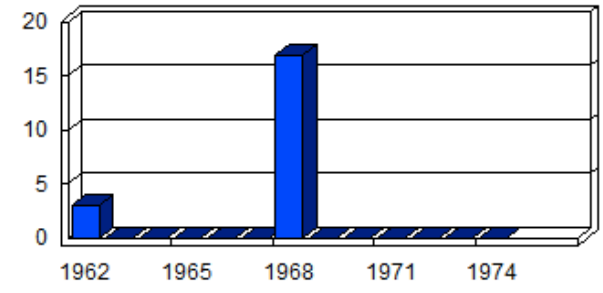


Âges mal identifiés

Type « Centre ancien » :



Types mal identifiés



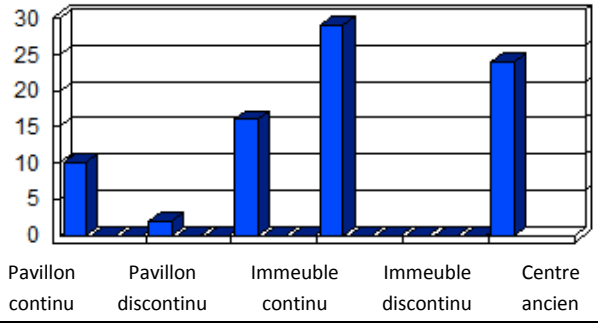
Âges mal identifiés

Pour les types pavillons discontinus et continus, immeubles discontinus et continus et centre ancien une analyse commune peut être faite. On constate, dans chacun de ces cas, que les confusions se font avec des type de densités très proches : soit juste au dessus, soit juste en dessous.

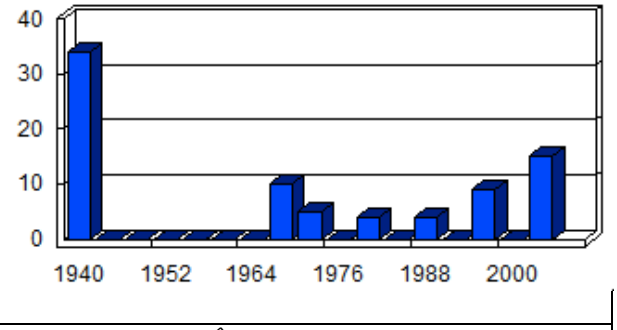
Dans le cas où la confusion est faite avec un type moins dense, on peut imaginer que la source de l'erreur vient du fait que ce quartier a été créé après 1975, et n'a pas pu évoluer par la suite malgré une augmentation de densité (les quartiers qui ont moins de 30 ans ne peuvent pas évoluer). Comme on peur le voir sur les figures de droite, ces ilots « pas assez âgés » peuvent constituer une partie des erreurs, mais pas la majorité.

La deuxième source de ces erreurs peut venir de l'inertie que nous avons introduit dans les changement de type. En effet, pour tenir compte de la continuité dans le temps du tissu urbain, nous avons pris en compte des plages de variation de densités plus large pour les ilots existants.

Type « Immeuble de grande hauteur » :



Types mal identifiés



Âges mal identifiés

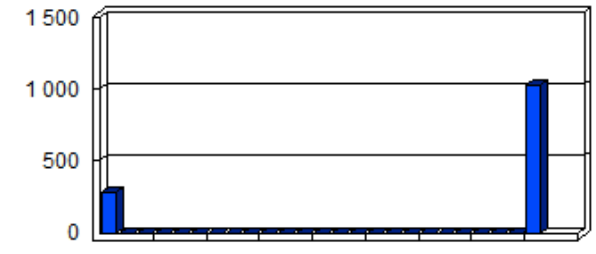
Comme on l'a dit précédemment, les erreurs dans l'identification des immeubles de grande hauteur résultent de deux phénomènes :

- d'une part, ce type a une plage de variation de densité très large,
- d'autre part, il n'est pas possible de créer des immeubles de grande hauteur après 1975.

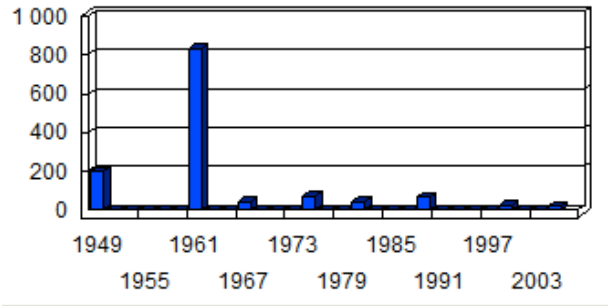
Ces deux phénomènes apparaissent clairement sur les figures ci-dessus :

- d'une part, la confusion se fait avec tous les types sans lien particulier avec leur densité ;
- d'autre part, une partie importante des ilots mal identifiés sont postérieurs à 1975, période à laquelle ils n'ont pu être construits.

Type « Bâtiment d'activité » :



Types mal identifiés



Âges mal identifiés

Puisque nous n'avons simulé que l'augmentation de population et pas la densité bâtie de bâtiments d'activité, ils ne sont pas détectés et sont considérés comme non bâtis ou très faiblement bâtis (type « pavillon discontinu » ou maille non bâtie).

Annexe 8 : Simplification morphologique des formes futures

Pour que les cartes générées par GENIUS puissent être utilisées par des modèles physiques, il faut une description géométrique des différents quartiers. Pour cela, nous faisons un certain nombre d'hypothèses :

- Les bâtiments de type pavillon, immeuble discontinu, immeuble de grande hauteur et bâtiment d'activité sont représentés par des parallélépipèdes rectangles.
- Les bâtiments de type immeuble continu et centre ancien sont représentés par des parallélépipèdes rectangles dans lesquels des percements représentent les cours.
- Dans une maille, tous les bâtiments ont une orientation, une emprise au sol et un espacement identique.
- Tous les bâtiments d'un même type sont alignés selon une grille orthogonale ($\vec{u}$, $\vec{v}$).
- L'espacement entre bâtiment est régulier mais différent selon les axes $\vec{u}$ et $\vec{v}$.
- Dans une maille, tous les bâtiments n'auront pas la même hauteur.

Une fois les règles établies pour tous les types de quartier notre objectif est de générer une couche SIG précisant la forme de chaque bloc bâti de la zone d'étude. Cette étape n'a pas encore été codée dans GENIUS. Cependant, il nous semblait important d'en préciser les bases et la méthode.

Analyse statistique des dimensions des ilots

En se basant sur les données de coefficient d'emprise au sol de Paris et de Toulouse nous avons estimé pour chaque type la surface au sol moyenne par bloc et le périmètre moyen par bloc. Cela nous permet de déterminer la largeur et la longueur de « blocs équivalents » à base rectangulaire. En effet, nous savons que :

$$\begin{cases} Aire\ base\ =\ Longueur\ \times\ Largeur \\ Périmètre\ base\ =\ 2\ \times\ Longueur\ +\ 2\ \times Largeur \end{cases}$$

On peut résoudre ce système d'équations :

$$Longueur \times \left(\frac{Périmètre}{2} - Longueur\right) = Aire$$

$$\Leftrightarrow Longueur^2 - Longueur \times \frac{Périmètre}{2} + Aire = 0$$

L'équation est de la forme $ax^2 + bx + c = 0$. On sait qu'il existe deux solutions de la forme :

$$x = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

Soit dans notre cas :

$$\begin{cases} Longueur = \frac{Périmètre}{4} + \sqrt{\frac{Périmètre^2}{16} - Aire} \\ Largeur = \frac{Périmètre}{4} - \sqrt{\frac{Périmètre^2}{16} - Aire} \end{cases}$$

On détermine alors un facteur de forme correspondant au rapport moyen entre la longueur et la largeur pour un type de quartier donné.

Notons que dans le cas des tissus urbains à cours, nous avons évalué la longueur et la largeur des ilots avec une surface au sol incluant la surface des cours. En comparant la surface avec cours et la surface sans cours on déduit un pourcentage de cours.

Tableau 66 : Facteur de forme des blocs bâti pour chaque type de quartier

Type de quartier	Surface au sol moyenne par bloc	Facteur de forme	Surface de cours / surface du bloc
Pavillon discontinu	174	2,01	
Pavillon continu	262	2,88	
Immeuble discontinu	436	3,44	
Immeuble continu	1564	2,60	33,8 %
Immeuble de grande hauteur	1633	3,34	
Centre ancien	3127	2,63	30,9 %
Bâtiment d'activité	1921	2,75	

Détermination de l'espacement entre les blocs

Connaissant le nombre de bloc dans une maille, on peut les répartir et en déduire l'espacement restant dans une direction et dans l'autre.

Soient les variables suivantes :

n_0 = *nombre de bloc moyen dans la maille*

n = *nombre de bloc entier dans la maille*

n_u = *nombre de bloc dans la direction* $\vec{u}$ *(sens de la longueur des blocs)*

n_v = *nombre de bloc dans la direction* $\vec{v}$ *(sens de la largeur des blocs)*

L_u = *longueur des bloc*

L_v = *largeur des bloc*

W_u = *Espacement entre deux blocs dans la direction* $\vec{u}$

W_v = *Espacement entre deux blocs dans la direction* $\vec{v}$

Tout d'abord on calcul le nombre moyen de bloc dans la maille :

$$n_0 = \frac{Surface\ au\ sol\ dans\ la\ maille}{Surface\ au\ sol\ moyenne\ par\ bloc}$$

Par la suite, pour tous les tissus urbains discontinus on va considérer qu'il y a quasiment autant de bâtiments dans une direction que dans une autre. On a donc :

$$n_u = \min\left(entier\left(\sqrt{n_0}\right);\ entier\left(\frac{n_0}{n_u}\right)\right)$$

$$n_v = \max\left(entier\left(\sqrt{n_0}\right);\ entier\left(\frac{n_0}{n_u}\right)\right)$$

$$n = n_v \times n_u$$

Pour les types immeuble continu et centre ancien, la continuité du tissus urbain nécessite une répartition différente dans les deux direction x et y. On répartira les bâtiments en fonction de leur facteur de forme :

$$n_u = entier\sqrt{\frac{n_0}{facteur\ de\ forme\ du\ bloc}}$$

$$n_y = entier\sqrt{n_0 \times facteur\ de\ forme\ du\ bloc}$$

$$n = n_v \times n_u$$

On peut ensuite déduire la distance entre bloc en observant combien d'espace libre il reste dans une direction donnée et en supposant que cet espace libre est uniformément réparti dans cette même direction. On s'impose également que cet espace libre ne soit pas inférieur à la largeur de rue moyenne dans la maille. D'où :

$$W_u = \max\left[\frac{(250 - L_u \times n_u)}{n_u}\ ; W_{rue}\right]$$

$$W_v = \max\left[\frac{(250 - L_v \times n_v)}{n_v} ; W_{rue}\right]$$

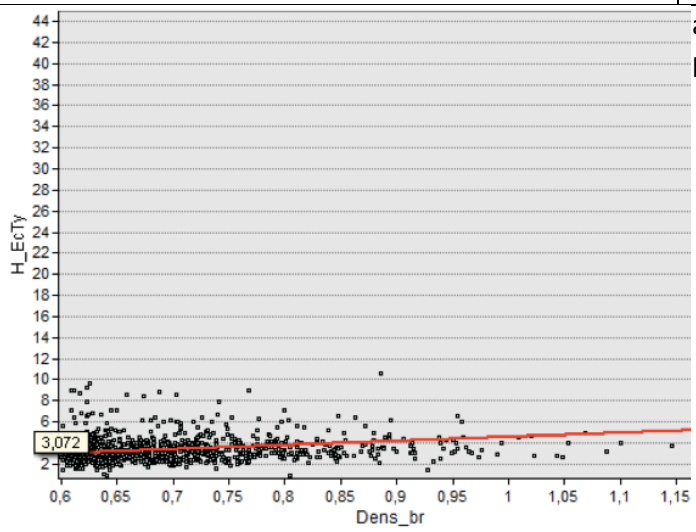
Hauteur des bâtiments

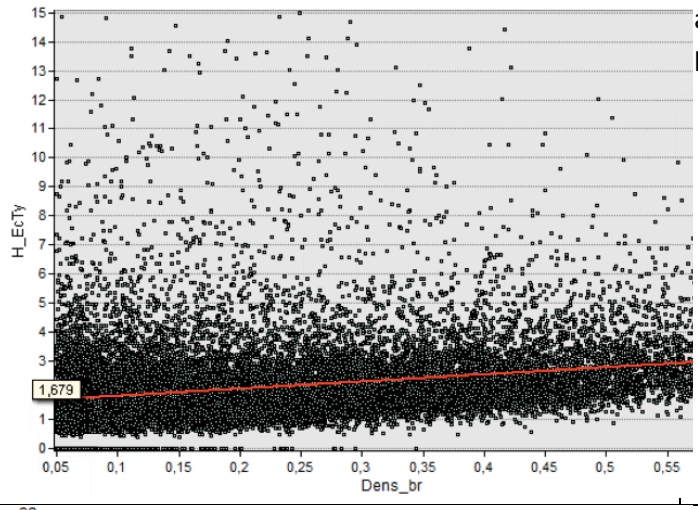
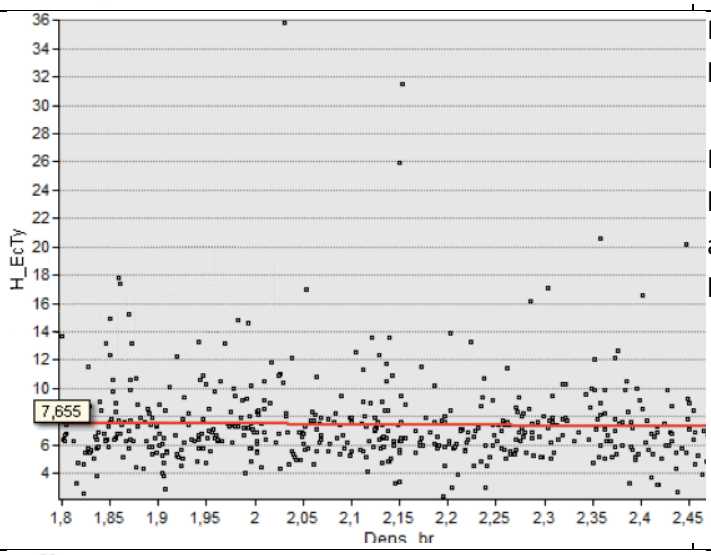
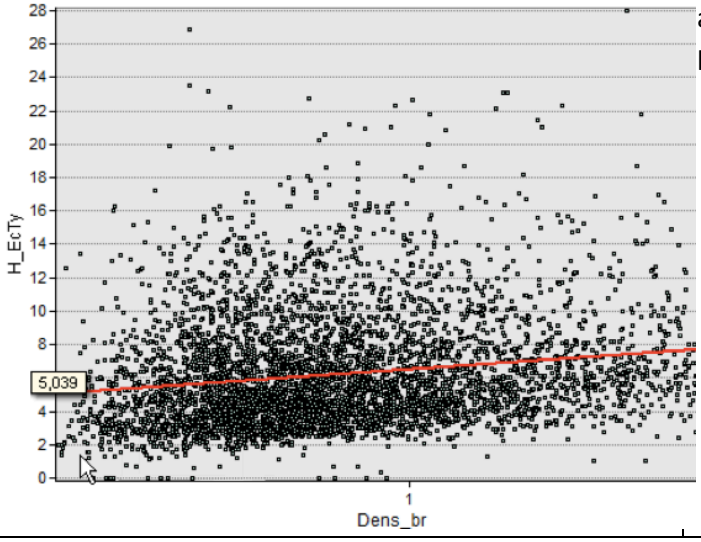
La hauteur moyenne des bâtiments de chaque maille est donnée dans la carte initiale. Cependant, il existe des écarts entre les bâtiments d'une même maille. Nous attribuerons les valeurs des hauteurs de manière aléatoire en tenant compte de l'écart type calculé dans chaque maille.

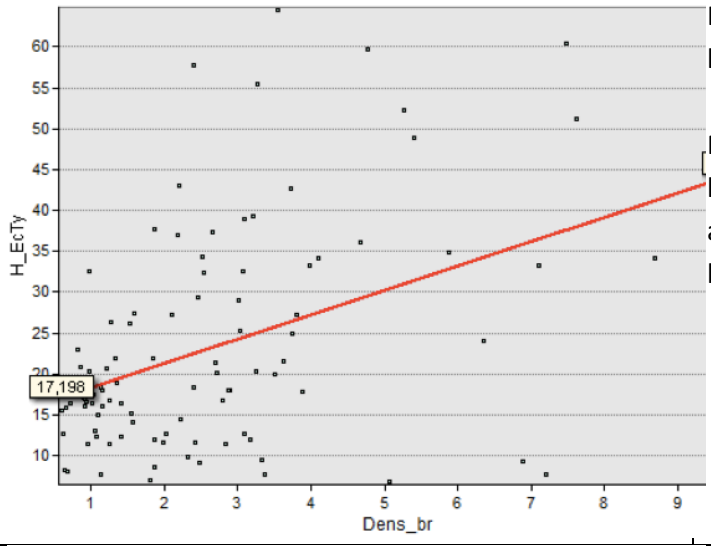
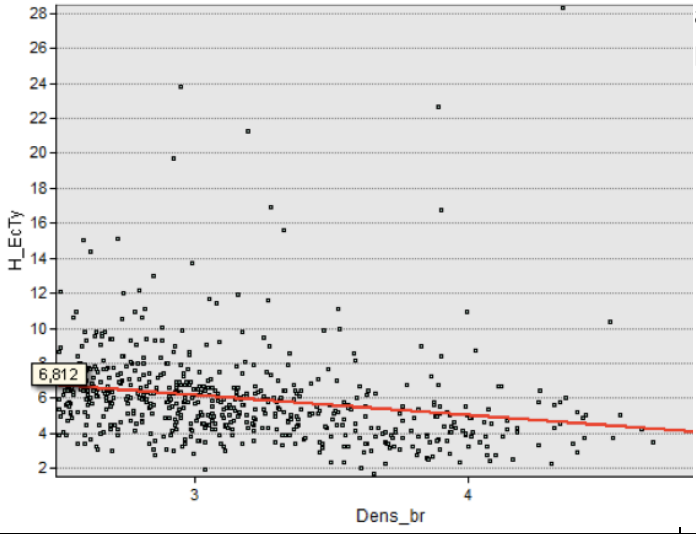
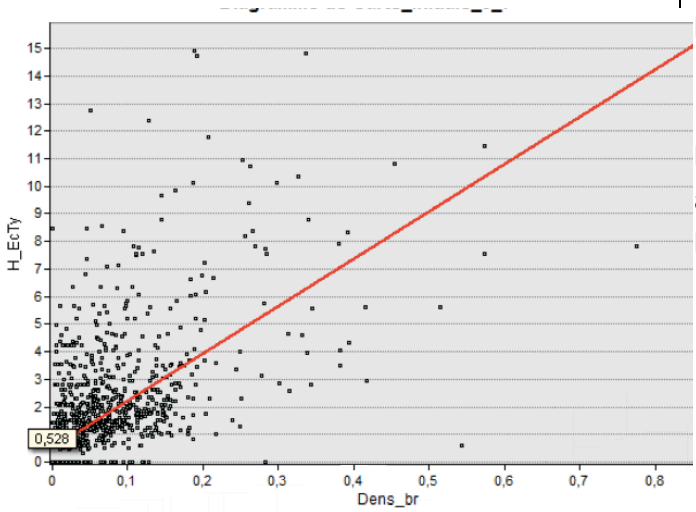
On a pu voir lors de nos étude statistique que l'écart type des hauteur était fortement corrélé à la densité. On va donc établir des règles d'évolution en fonction de la densité bâtie brute issue de NEDUM. Pour cela, on procède comme les autres paramètres morphologiques, en étudiants la ville existante.

$$\text{Hauteur moyenne du quartier} = \text{a} \times \text{densité bâtie brute} + \text{b}$$

Où a et b sont des coefficient dépendant des type de quartier (voir tableau ci-après).

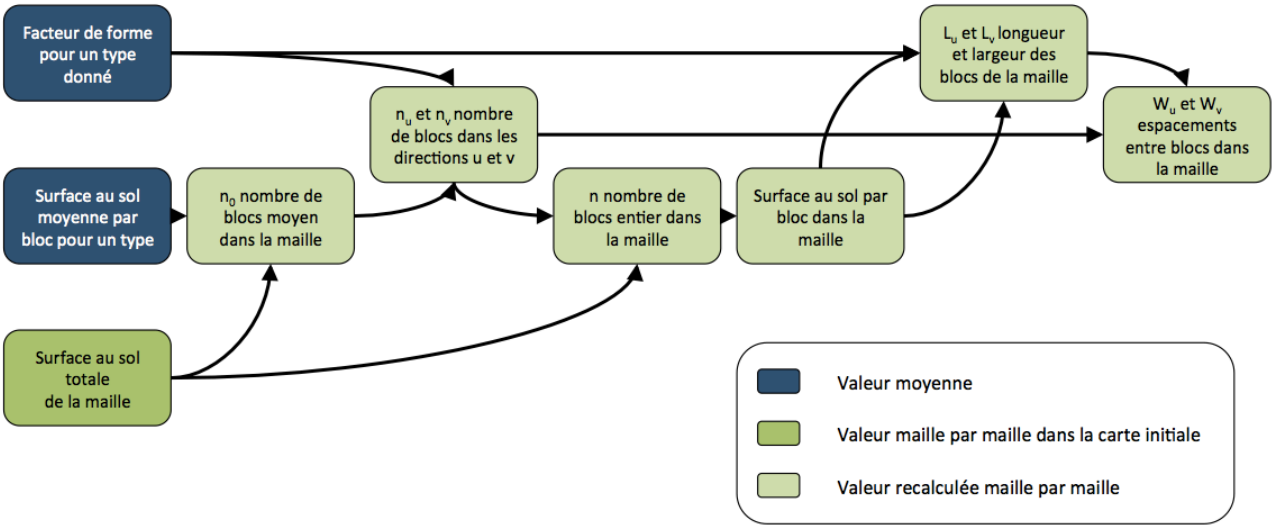
Type	Écart type des hauteurs en fonction de la densité	Coefficients a et b
Pavillon continu		a = 3,71 b = 0,85

Pavillon discontinu		a = 2,52 b =1,55
Immeuble continu		Ilot ancien : On conserve l'écart type existant Nouvel ilot : On prend l'écart type moyen du type a = 0 b = 7,47
Immeuble discontinu		a = 1,45 b = 4,97

Immeuble de grande hauteur		Ilot ancien : On conserve l'écart type existant Nouvel ilot : On prend l'écart type moyen du type a = 0 b = 23,21
Centre ancien		a = -1,14 b = 9,66
Bâtiment d'activité		Ilot ancien : On conserve l'écart type existant Nouvel ilot : On prend l'écart type moyen du type a = 0 b = 1,36

Conclusion

Le schéma ci-après résume l'organigramme de calcul de la morphologie simplifiée. Par manque de temps elle n'a pas pu être implémentée dans le code de GENIUS.



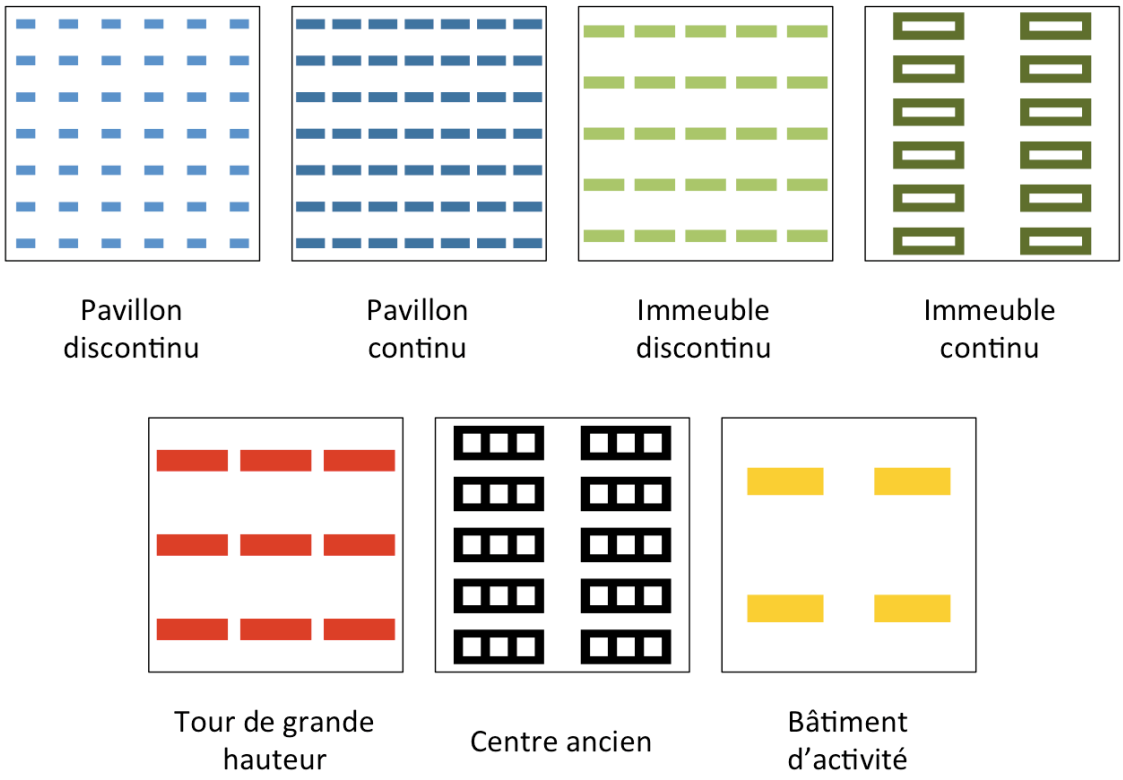
Méthode de calcul des morphologies simplifiées (illustration de l'auteur)

Afin de tester cette méthode, nous l'avons appliquée pour les valeurs moyennes de la ville de Paris. Le tableau et la figure ci-dessous illustrent les différentes étapes de calcul et les résultats moyens obtenus. Bien évidemment, les morphologies simplifiées devront être calculées et tracées pour chaque maille afin de prendre en compte les évolutions locales de la forme urbaine.

Par ailleurs, même si l'orientation du bâti n'apparaît pas dans la méthode présentée, elle reste prise en compte comme une données attributaire de chaque bâtiment. On pourra donc envisager, lors de la génération de la couche SIG associée, d'appliquer une rotation correspondante.

Simplification de la morphologie urbaine pour des valeurs moyennes des typologies parisiennes

	Pavillon discontinu	Pavillon continu	Immeuble discontinu	Immeuble continu	Immeuble de grande hauteur	Centre ancien	Bâtiment d'activité
Surface au sol moyenne (m^2)	174	262	436	1564	1633	3127	1921
Facteur de forme moyen	2,01	2,88	3,44	2,6	3,34	2,63	2,75
Surface au sol totale (m^2)	7500	13750	11875	22500	13125	30000	8125
n_0 Nombre de bloc moyen	43,10	52,48	27,24	14,39	8,04	9,59	4,23
n_u nombre de blocs dans la direction u	6	7	5	2	3	2	2
n_v nombre de blocs dans la direction v	7	7	5	6	3	5	2
Surface au sol par bloc dans la maille	178,6	280,6	475,0	1875,0	1458,3	3000,0	2031,2
L_u longueur des blocs de la maille	9,4	9,9	11,8	26,9	20,9	33,8	27,2
L_v largeur des blocs de la maille	18,9	28,4	40,4	69,8	69,8	88,8	74,7
W_u espacement entre blocs dans la direction u	26,3	25,8	38,2	14,8	62,4	16,2	97,8
W_v espacement entre blocs dans la direction v	22,7	7,3	9,6	55,2	13,5	36,2	50,3



Simplification de la morphologie urbaine pour des valeurs moyennes des typologies parisiennes (illustration de l'auteur)

On notera que la régularité de la répartition des bâtiments dans le plan est une faiblesse, en particulier dans le cas des tissus discontinu. Cheng a pu montrer l'importance de ce facteur sur la captation du rayonnement solaire (Cheng et al., 2006). Cependant, on pourra envisager d'introduire une répartition aléatoire des blocs lors de la génération de la couche SIG.

Annexe 9 : Fiches bilan ACCLIMAT

Récit d'un scénario à l'horizon 2100 pour l'agglomération toulousaine

N°1 : « Réactif »

2010 - 2040

ECONOMIE

Territoire attractif

L'économie se porte bien, structurée autour d'un **secteur dominant et performant**. L'agglomération toulousaine reste un **territoire attractif**, où la population ne cesse d'augmenter. Les revenus moyens par ménage augmentent.

AMENAGEMENT DU TERRITOIRE

Étalement urbain et mitage

Malgré le SCoT, le développement de la métropole toulousaine n'est pas vraiment régulé, les politiques publiques peinent à converger : la **varicelle urbaine se poursuit**, sous forme de **maisons individuelles**, et s'accompagne de nouvelles grandes artères routières rapidement engorgées, mettant à mal tout principe de densité et de structuration autour des réseaux de transports collectifs.

La protection des espaces agricoles et naturels passe au second plan.

BATI ET ENERGIE

Politique publique *à minima* et peu d'initiatives individuelles

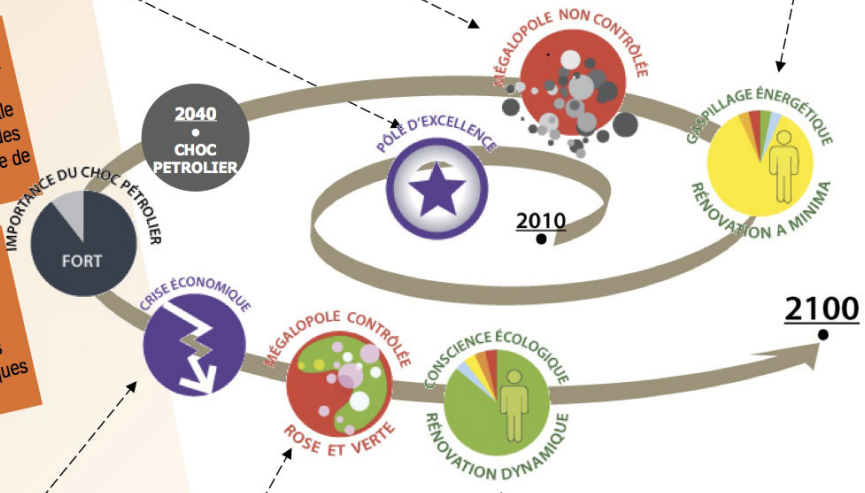
En matière énergétique, la politique locale reste tributaire des tendances nationales, ce qui fragilise fortement le territoire. **La réglementation évolue lentement.**

Les **préoccupations énergétique et environnementale sont peu présentes** : les comportements n'évoluent pas, et ne favorisent pas l'innovation.

2040

Le prix du baril de pétrole augmente : le choc pétrolier est violemment vécu.
Une crise économique mondiale touche durement l'ensemble des pays fondés sur une économie de marché.

Conscient de son retard technologique et de sa forte dépendance aux énergies carbonées, l'état investit lourdement : des évolutions réglementaires et technologiques sont enfin en marche.



2040 - 2100

ECONOMIE

Crise aéronautique mais levier énergétique

A l'échelle toulousaine, l'industrie aéronautique est pleinement concernée et se trouve fragilisée par la crise mondiale.

Le territoire perd de son attractivité : **la population chute,** vieillit et **s'appauvrit**.

Les politiques locales maintiennent néanmoins un tissu économique autour de l'innovation énergétique.

AMENAGEMENT DU TERRITOIRE

Expansion contrôlée et espaces verts

Devant l'adversité, une **réelle gouvernance** locale se met en place : l'union fait la force !

L'étalement est stoppé, la densité urbaine renforcée et contrôlée : la mégalopole toulousaine se forme et conserve une hyperpolarisation sur Toulouse.

Les **petits collectifs** constituent toujours la forme urbaine dominante, les **espaces naturels** et agricoles sont mieux protégés, voire restaurés, participant au rafraîchissement de la ville.

BATI ET ENERGIE

Innovation énergétique

Sur le plan énergétique, les difficultés économiques poussent à **innover** et à revoir les modes de production et de consommation ; les **comportements** évoluent et deviennent économes, la **rénovation** s'accélère, les **nouvelles technologies** se développent.

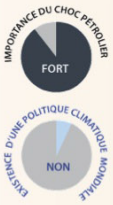
1

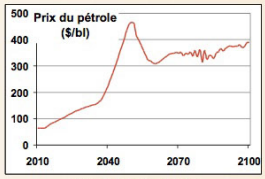
Mots clés du scénario

Mise en œuvre dans la plateforme

Économie mondiale

- **Fort choc pétrolier en 2040**
- Tensions énergétiques généralisées
- Climat hostile à l'investissement
- **Absence** de politique **climatique volontariste**





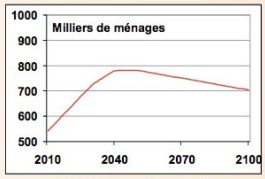
Fort choc pétrolier

Économie locale

2010 / 2040 / 2100

- Toulouse **pôle d'excellence : très attractive**
- Faible taux de chômage
- Revenus des ménages élevés

- **Crise économique**
- Diminution de la population
- Revenus inférieurs à la moyenne nationale



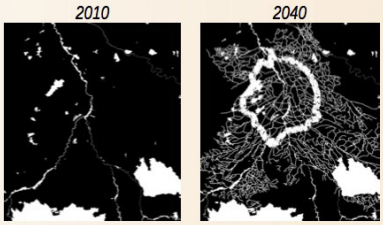
Chute de la démographie

Territoire

2010 / 2040 / 2100

- Poursuite des **tendances actuelles** dans les modes d'urbanisation
- **Ville étalée et dispersée**
- Expansion **non contrôlée**

- Changement net d'orientation
- Expansion contrôlée, ville **compacte**
- Faible mitage



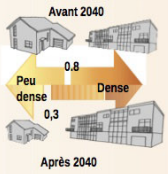
Apparition des contraintes d'urbanisation (en blanc)

Quartiers et architecture

2010 / 2040 / 2100

- Poursuite des **tendances actuelles** en terme de production d'habitat
- **Maisons individuelles** majoritaires

- Architecture **compacte**
- Maisons individuelles en bande ou **petits immeubles collectifs**
- **Végétation urbaine favorisée**



A partir de 2040, les maisons individuelles ne sont plus favorisées.

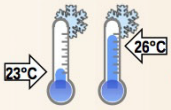
A partir de 2040, les espaces publics jusqu'alors fortement minéraux sont végétalisés : parkings, places et espaces résiduels urbains accueillent des arbres et des plantations basses.

Énergétique du bâti

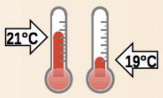
2010 / 2040 / 2100

- Poursuite des **tendances actuelles**
- **Faible innovation énergétique**
- **Faible taux de rénovation**
- **Usage non économe** du chauffage et de la climatisation

- **Comportement économe** renforcé
- Accélération des **rénovations**, bâtiments **neufs performants**



L'usage de la climatisation et du chauffage devient ***économe à partir de 2040***



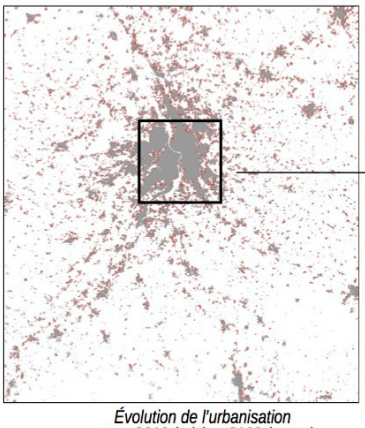
Après 2040, l'utilisation des volets, brise-soleil et de la surventilation permet de limiter les consommations.

Les ***taux de rénovation annuels*** *restent faibles jusqu'en 2040, puis sont doublés après cette date, ce qui permet une intégration rapide de la réglementation thermique.*

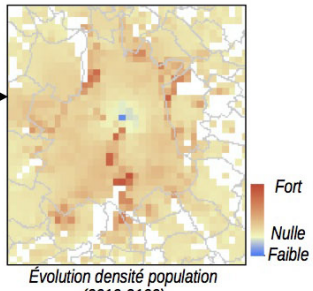
Habitat : 1% puis 2.5%
Tertiaire : 3% puis 6.5%

Impacts calculés

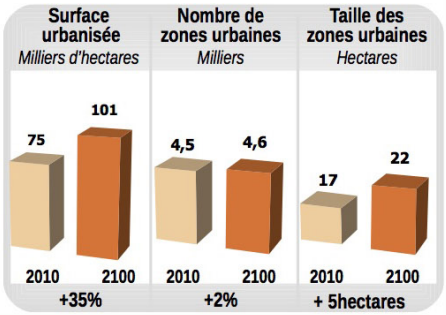
Scénario N°1 : « Réactif »



Évolution de l'urbanisation entre 2010 (gris) et 2100 (rouge)



Évolution densité population (2010-2100)

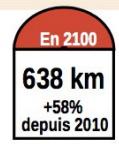


Surface urbanisée
La surface urbanisée augmente jusqu'en 2040 poursuivant les tendances démographiques puis stagne suite à la diminution de population (situation post-crise économique).

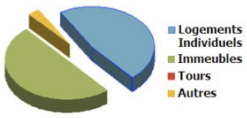
Forme urbaine
- Un morcellement un peu plus fort qu'en 2010
- La mise en œuvre de politiques de maîtrise de l'urbanisation après 2040 n'a pas d'effet sur la forme urbaine: Le mitage et l'étalement en 2100 résultent principalement de l'évolution qui s'est produite entre 2010 et 2040.

Distribution de la population
Le centre ville de Toulouse se dépeuple en raison des coûts des loyers trop élevés par rapport aux revenus. L'évolution du coût du pétrole ne constitue pas un frein à habiter en proche ou lointaine périphérie comparativement au coût des loyers.

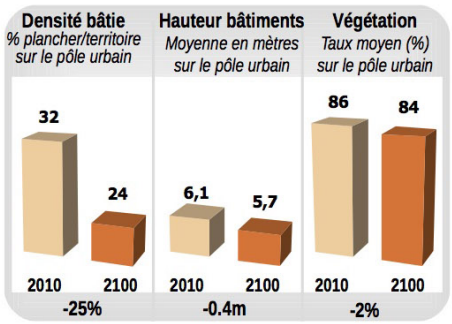
Transports
Distance parcourue chaque mois par personne entre domicile et travail.



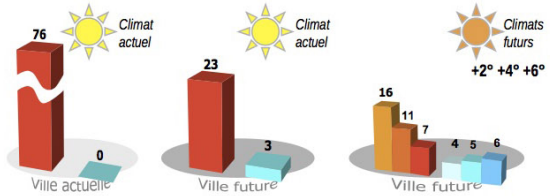
Architecture
- La construction de maisons individuelles augmente fortement entre 2010 et 2050, puis la crise économique freine les nouvelles constructions.
- De fait, la politique volontariste pour le collectif à partir de 2040 a peu d'effet même si elle empêche la construction de nouvelles maisons isolées.
- Grâce à une réglementation volontariste, le taux moyen de végétation sur le pôle urbain est maintenu, malgré l'expansion urbaine.



Répartition des m² de plancher par types de quartier

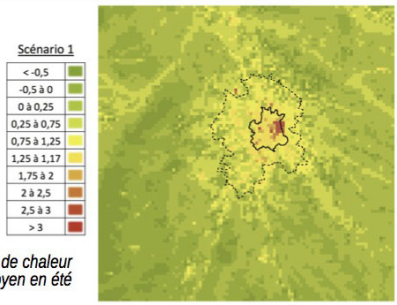


Énergie du bâti
- La consommation de chauffage diminue d'un facteur 3 du seul fait de la meilleure isolation et de la politique de rénovation volontariste
- Le réchauffement climatique diminue encore plus le chauffage.
- La climatisation augmente en ville future, du fait principalement de la généralisation des équipements dans le résidentiel.
- L'usage économe de la climatisation permet de limiter l'impact du réchauffement climatique sur la consommation en été.



Consommation de chauffage (rouge) et climatisation (bleu) en Kwh/m2/an pour la ville actuelle (2010) et pour la ville future (2100)

Climat et confort urbain
- L'îlot de chaleur sur l'été est faible, même s'il augmente légèrement en moyenne par rapport à la période actuelle.
- Par contre les îlots de chaleurs intenses diminuent sur les banlieues du fait des peintures réfléchissantes, mais se maintient en centre ville.
- L'îlot de chaleur en hiver diminue entre 0.5 et 1°C.



Îlot de chaleur Moyen en été

3

Images de Toulouse et sa région

N°1 : « Réactif »

En 2010

•L'urbanisation couvre une superficie de 75 000 ha, soit 9% du territoire. Elle est caractérisée par un fort étalement où le mitage est très présent, le pavillonnaire étant la forme d'urbanisation dominante. Les territoires agricoles périurbains constituent toujours une réserve foncière à l'urbanisation.

• L'aéronautique et le spatial constituent le principal secteur d'activité, même si la santé et l'agro-alimentaire émergent doucement.

• La population, majoritairement jeune, totalise 540 000 ménages.

• La voiture constitue le principal mode de transport, l'engorgement du réseau routier est déjà quotidiennement marqué.

• Le tertiaire et le résidentiel consomment environ 1250 ktep d'énergie, dont environ 950ktep en chauffage.

• L'îlot de chaleur urbain atteint en moyenne 2°C, 4°C en conditions favorables, et jusqu'à 5°C quelques jours dans l'année.

• Le choix maintenu de préserver les corridors écologiques fait s'étendre les limites de la ville, phénomène cependant très limité du fait de la crise économique qui se poursuit (+1472 ha urbanisés), et de la baisse de population (-9% depuis 2070).

• La forte présence du végétal en centre ville la rend plus agréable, et pourtant les habitants s'en éloignent du fait de loyers trop importants par rapport à leurs revenus.

• La construction est toujours ralentie, les maisons individuelles isolées restent prisées mais minoritaires (46% des m² bâtis).

• Le taux de rénovation s'accélère, permettant des gains non négligeables, notamment en chauffage (-66 % sur l'ensemble de l'agglomération, même si le climat ne se réchauffait pas).

• L'amélioration du taux de végétation et de la performance énergétique des bâtiments permet de diminuer l'îlot de chaleur par rapport à 2040.

• Le réchauffement climatique, même s'il accroît l'inconfort thermique d été à l'extérieur, augmente la consommation d'énergie liée à la climatisation (surtout dans le centre et les bureaux), mais peu grâce à son usage modéré, et diminue celle de chauffage, voire l'annule dans les bureaux.

• L'évolution démographique se poursuit, avec un fort gain de population (+ 44% de ménages depuis 2040).

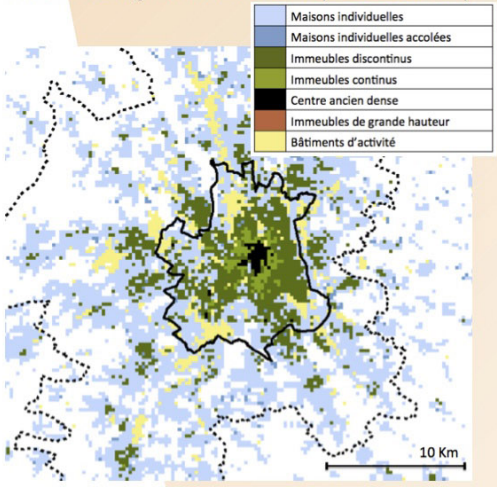
• L'urbanisation, très peu contrainte, poursuit son étalement : le centre de Toulouse se dépeuple et la ville se disperse sous forme d'un fort mitage. Elle atteint 91666 ha, soit 12% du territoire. Les maisons individuelles sont toujours majoritaires (83% des zones urbanisées).

• Les zones urbanisées sont peu végétalisées et l'étalement urbain pénalise la biodiversité et favoriser la gestion naturelle des eaux.

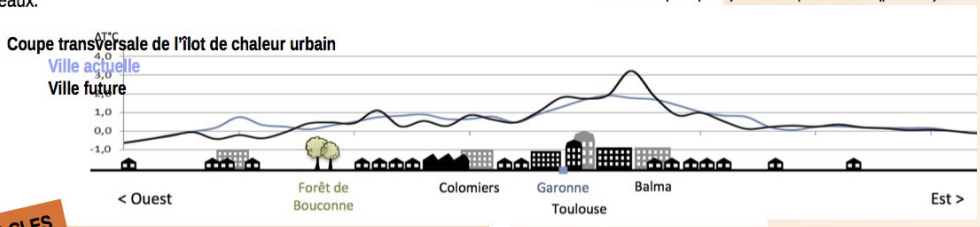
• Le contexte pétrolier fragilise le territoire. Aucune politique volontariste locale n'est cependant engagée : une innovation mineure, un faible taux de rénovation, les gains énergétiques sont loin du facteur 4 (-35% en chauffage).

• L'usage intensif de la climatisation entraîne une consommation de 100ktep, soi t environ 10% de la consommation totale

• L'îlot de chaleur augmente d'environ 0.5°C (croissance urbaine).



Toulouse en 2100 : répartition des types d'îlots sur la ville (trait plein) et sur le pôle urbain (pointillé)



IDEES CLES

Une ville en crise
La population s'éloigne du centre, trop cher
Habitat collectif aussi important que le pavillonnaire

Des gains énergétiques importants
L'îlot de chaleur est contrôlé
Une ville agréable

Étude réalisée dans le cadre du projet de recherche **ACCLIMAT** *Adaptation au Changement CLIMatique de l'Agglomération Toulousaine* .

ACCLIMAT a bénéficié d'une aide de la Fondation de Coopération Scientifique **STAE Toulouse**.

Contact :Valéry Masson, Météo France : valery.masson@meteo.fr

Partenaires :
Météo France - *coordinateur scientifique*
auaT *agence d'urbanisme et d'aménagement Toulouse aire urbaine*
CERFACS *Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique*
CIRED *Centre International de Recherche sur l'Environnement et le Développement*

GEODE *Géographie de l'Environnement*
LRA *Laboratoire de Recherche en Architecture*
IMT *Institut de Mathématiques de Toulouse*
ONERA *Office National d'Études et de Recherches Aérospatiales*

Version 1.3 du 17/10/2013

4

Récit d'un scénario à l'horizon 2100 pour l'agglomération toulousaine

N°2 : « Réfléchi »

2010 - 2040

ECONOMIE

Territoire attractif

L'économie se porte bien, structurée autour d'un **secteur dominant et performant**. L'agglomération toulousaine reste un **territoire attractif**, où la population ne cesse d'augmenter. Les revenus moyens par ménage augmentent.

AMENAGEMENT DU TERRITOIRE

Expansion contrôlée et espaces verts

L'étalement urbain en tâche d'huile est stoppé, grâce à un véritable **projet intégré de territoire**. Les **espaces verts sont conservés** (espaces agricoles et naturels), pour leur fonctionnalité écologique, voire réintroduits, pour leur rôle « climatiquement bénéfique ».

La mixité des fonctions est privilégiée, la **densité urbaine renforcée** et contrôlée, **les logements collectifs** privilégiés, optimisant l'organisation des transports.

BATI ET ENERGIE

Absence de politique publique mais initiatives individuelles

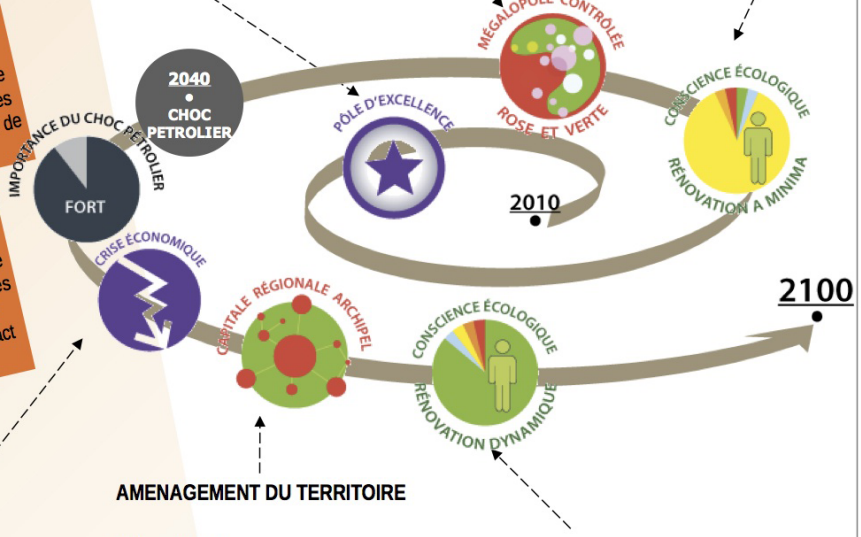
En matière énergétique, la politique locale reste tributaire des tendances nationales, ce qui fragilise fortement le territoire. **La réglementation évolue lentement.**

Une **conscience écologique** des citoyens et une volonté d'économie énergétique apparaissent : l'individu est le ferment d'une **culture forte de l'innovation**, qui favorise l'apparition de techniques nouvelles dans le neuf ou l'existant et permet d'améliorer confort et qualité de vie.

2040

Le prix du baril de pétrole augmente : le choc pétrolier est violemment vécu.
Une crise économique mondiale touche durement l'ensemble des pays fondés sur une économie de marché.

Au niveau mondial, les politiques climatiques visant à réduire les émissions de gaz à effet de serre portent leur fruit : les technologies faiblement carbonnées sont disponibles et atténuent l'impact du fort choc pétrolier.



2040 - 2100

ECONOMIE

Crise aéronautique mais fort levier énergétique

A l'échelle toulousaine, l'industrie aéronautique est pleinement concernée et se trouve fragilisée par la crise mondiale.

Le territoire perd de son attractivité : **la population chute,** vieillit et **s'appauvrit**.

Les politiques locales maintiennent néanmoins un tissu économique autour de l'innovation énergétique.

AMENAGEMENT DU TERRITOIRE

Ville archipel

Les nouvelles politiques urbaines favorisent la **multi-polarité** : seules les communes situées à 15 min en transports collectifs sont autorisées à se développer: La **ville archipel devient réalité**. Des chaînes de transports alternatifs à la route et l'intermodalité se développent.

Les normes architecturales favorisent la **compacité**, protègent ou restaurent les espaces non urbains. La **forte végétalisation** participe au rafraîchissement de la ville et à un cadre de vie de qualité.

BATI ET ENERGIE

Politique publique dynamique

Innovation et réglementation se développent rapidement, les contrôles se renforcent, **l'approche environnementale** se renforce : ouvrages, bâtiments et urbanisme prennent réellement en compte les usages et la notion de confort.

Les **petits collectifs**, énergétiquement performants, et les **comportements économes** entraînent une véritable réduction des consommations.

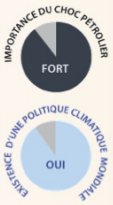
1

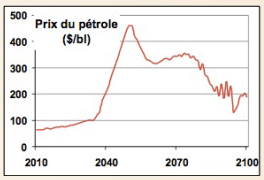
Mots clés du scénario

Mise en œuvre dans la plateforme

Économie mondiale

- **Fort choc pétrolier en 2040**
- Tensions énergétiques généralisées
- Climat hostile à l'investissement
- **Politique climatique volontariste**





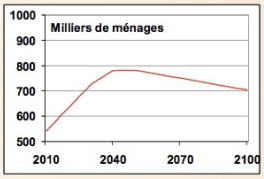
Fort choc pétrolier

Économie locale

2010 — 2040 — 2100

- Toulouse **pôle d'excellence : très attractive**
- Faible taux de chômage
- Revenus des ménages élevés

- **Crise économique**
- Diminution de la population
- Revenus inférieurs à la moyenne nationale



Chute de la démographie

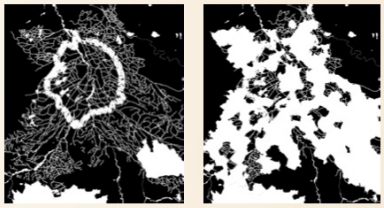
Territoire

2010 — 2040 — 2100

- Expansion **contrôlée**
- **Ville compacte,** mitage faible
- Extension en continuité de l'existant et le long du réseau routier.

- Polarisation du territoire :ville **archipel**
- Maisons ou petits collectifs

2010 *2040*



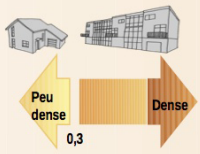
Renforcement au cours du temps des contraintes d'urbanisation (en blanc)

Quartiers

2010 — 2100

- Architecture **compacte**
- Maisons individuelles en bande ou **petits immeubles collectifs**
- **Fort taux de végétation urbaine**

Les structures compactes (collectifs) sont favorisées dès que la densité d'un quartier augmente



Dès 2010, les espaces publics sont fortement végétalisés : parkings, places et espaces résiduels urbains accueillent des arbres et des plantations basses.

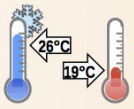
Énergétique du bâti

2010 — 2040 — 2100

- **Faible innovation énergétique**
- **Usage économe** du chauffage et de la climatisation
- **Actions individuelles** pour gagner en confort et réduire les dépenses en énergie

- **Comportement économe** renforcé
- Accélération des **rénovations**, bâtiments **neufs performants**

Climatisation économe



Chauffage économe

Utilisation optimale des volets, brise-soleil et de la surventilation.

*Les **taux de rénovation annuels** restent faibles jusqu'en 2040, puis sont doublés ce qui permet une intégration rapide de la réglementation thermique.*

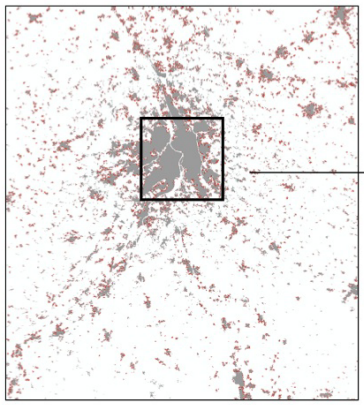
Habitat : 1% puis 2.5%
Tertiaire : 3% puis 6.5%

Version 1.3 du 17/10/2013

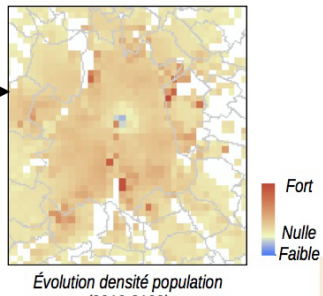
2

Impacts calculés

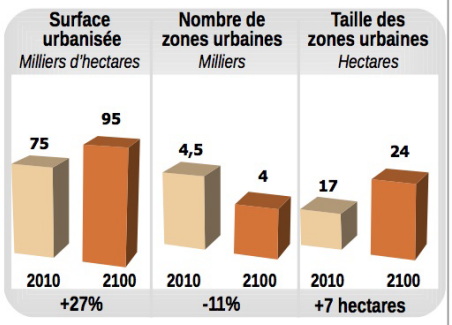
Scénario N°2 : « Réfléchi »



Évolution de l'urbanisation entre 2010 (gris) et 2100 (rouge)



Évolution densité population (2010-2100)

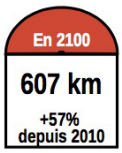


Surface urbanisée
La surface urbanisée augmente jusqu'en 2040 poursuivant les tendances démographiques puis stagne suite à la diminution de population (situation post-crise économique).

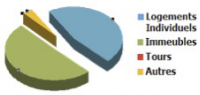
Forme urbaine
La mise en oeuvre de politiques de maîtrise de l'urbanisation dès 2010 a permis de limiter le mitage (zones urbaines moins nombreuses et plus grandes), de préserver les corridors écologiques en comblant les dents creuses et en autorisant l'urbanisation qu'à proximité de l'existant. L'urbanisation de 2100 reflète l'efficacité des politiques mises en oeuvre.

Distribution de la population
Le centre ville de Toulouse se dépeuple en raison des coûts des loyers trop élevés par rapport aux revenus. L'évolution du coût du pétrole ne constitue pas un frein à habiter en proche ou en lointaine périphérie comparativement au coût des loyers.

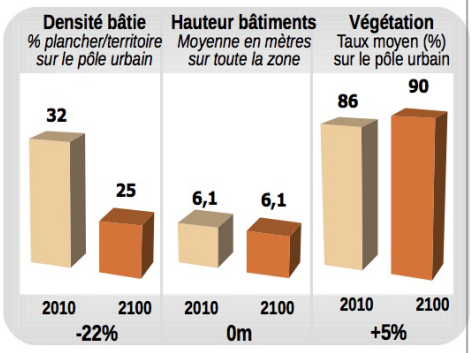
Transports
Distance parcourue chaque mois par personne entre domicile et travail.



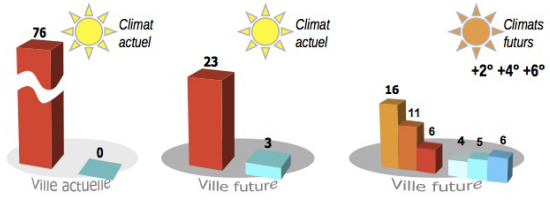
Architecture
• Grâce à une action politique mise en oeuvre dès 2010, on construit 4 fois plus d'habitat compact que de maisons individuelles isolées. Malgré l'étalement urbain, la hauteur moyenne des bâtiments reste stable.
• Grace à une réglementation volontariste dès 2010, le taux de végétation moyen sur le pôle urbain augmente, malgré l'expansion urbaine.



Répartition des m² de plancher par types de quartier

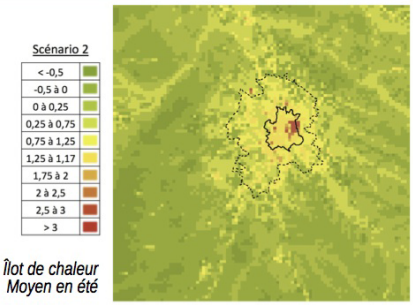


Énergie du bâti
• La consommation de chauffage diminue d'un facteur 3 du seul fait de la meilleure isolation et de la politique de rénovation volontariste
• Le réchauffement climatique diminue encore plus le chauffage.
• La climatisation augmente en ville future, du fait principalement de la généralisation des équipements dans le résidentiel.
•L'usage économe de la climatisation permet de limiter l'impact du réchauffement climatique sur la consommation en été.



Consommation de chauffage (rouge) et climatisation (bleu) en Kwh/m2/an pour la ville actuelle (2010) et pour la ville future (2100)

Climat et confort urbain
• L'îlot de chaleur sur l'été est faible, même s'il augmente légèrement en moyenne par rapport à la période actuelle.
• Par contre les îlots de chaleurs intenses diminuent sur les banlieues du fait des peintures réfléchissantes, mais se maintiennent en centre ville.
• L'îlot de chaleur en hiver diminue entre 0.5 et 1°C.



Îlot de chaleur Moyen en été

Images de Toulouse et sa région

N°2 : « Réfléchi »

En 2010

•L'urbanisation couvre une superficie de 75 000 ha, soit 9% du territoire. Elle est caractérisée par un fort étalement où le mitage est très présent, le pavillonnaire étant la forme d'urbanisation dominante. Les territoires agricoles périurbains constituent toujours une réserve foncière à l'urbanisation.

• L'aéronautique et le spatial constituent le principal secteur d'activité, même si la santé et l'agro-alimentaire émergent doucement.

• La population, majoritairement jeune, totalise 540 000 ménages.

• La voiture constitue le principal mode de transport, l'engorgement du réseau routier est déjà quotidiennement marqué.

• Le tertiaire et le résidentiel consomment environ 1250 ktep d'énergie, dont environ 950ktep en chauffage.

• L'îlot de chaleur urbain atteint en moyenne 2°C, 4°C en conditions favorables, et jusqu'à 5°C quelques jours dans l'année.

En 2100

• La volonté de polariser sous la forme d'une ville archipel se heurte à la crise économique. La population baisse (-9% depuis 2070) et par conséquent la surface urbanisée augmente peu (+1675 ha).

• Le centre-ville de Toulouse se dépeuple en raison du coût du loyers trop fort et de l'influence des canicules plus fréquentes sur le climat urbain.

• Malgré les politiques mises en place, les petits collectifs restent minoritaires (42% des m² bâtis). Le taux de végétation reste haut

• Le taux de rénovation s'accélère, permettant des gains non négligeables, notamment en chauffage (-66 % sur l'ensemble de l'agglomération, même si le climat ne se réchauffait pas).

• L'amélioration du taux de végétation et de la performance énergétique des bâtiments permet de ne pas aggraver l'îlot de chaleur par rapport à maintenant.

• Le réchauffement climatique, même s'il accroît l'inconfort thermique d'été à l'extérieur, augmente la consommation d'énergie liée à la climatisation (surtout dans le centre et les bureaux), mais peu grâce à son usage modéré, et diminue celle de chauffage, voire l'annule dans les bureaux.

En 2040

• L'évolution démographique se poursuit, avec un fort gain de population (+ 44% de ménages depuis 2040).

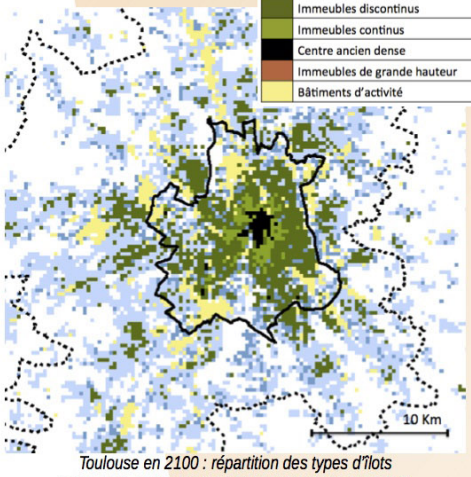
• L'urbanisation préserve les corridors écologiques et totalise malgré tout 85360 ha. La croissance s'est réalisée sous la forme d'habitat compact (maisons individuelles en bande 8 fois plus nombreuses et petits collectifs doublés entre 2010 et 2040).

• Les zones urbanisées sont fortement végétalisées et s'associent aux corridors écologiques pour préserver la biodiversité et favoriser la gestion naturelles des eaux.

• Le contexte pétrolier fragilise fortement le tissu économique. Les difficultés économiques poussent à revoir les modes de production et de consommation et à l'innovation; les comportements individuels évoluent, les nouvelles technologies se développent.

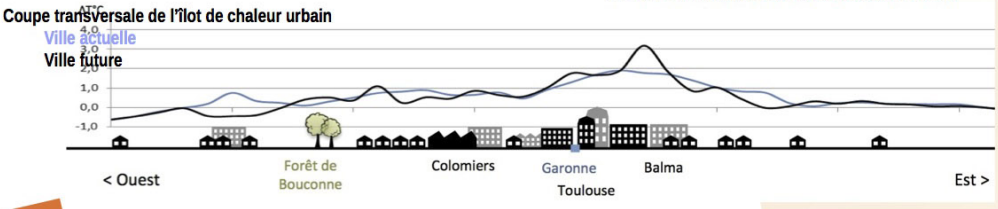
•Le chauffage diminue de 60 % au m², et augmente tout de même de 52 % sur l'ensemble de l'agglomération du fait de la croissance urbaine.

• L'îlot de chaleur augmente d'environ



Toulouse en 2100 : répartition des types d'îlots sur la ville (trait plein) et sur le pôle urbain (pointillé)

Coupe transversale de l'îlot de chaleur urbain



IDEES CLES

Une ville en crise
La population s'éloigne du centre, trop cher
Politique de ville archipel trop tardive

Des gains énergétiques importants
L'îlot de chaleur est contrôlé
Une ville agréable

Étude réalisée dans le cadre du projet de recherche **ACCLIMAT** *Adaptation au Changement CLIMatique de l'Agglomération Toulousaine* .

ACCLIMAT a bénéficié d'une aide de la Fondation de Coopération Scientifique **STAE Toulouse**.

Contact :Valéry Masson, Météo France : valery.masson@meteo.fr

Partenaires :
Météo France - *coordinateur scientifique*
auaT *agence d'urbanisme et d'aménagement Toulouse aire urbaine*
CERFACS *Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique*
CIRED *Centre International de Recherche sur l'Environnement et le Développement*

GEODE *Géographie de l'Environnement*
LRA *Laboratoire de Recherche en Architecture*
IMT *Institut de Mathématiques de Toulouse*
ONERA *Office National d'Études et de Recherches Aérospatiales*

Version 1.3 du 17/10/2013

4

Récit d'un scénario à l'horizon 2100 pour l'agglomération toulousaine

N°3 : « Dynamique »

2010 - 2040

ECONOMIE

Territoire attractif

L'économie se porte bien, structurée autour d'un **secteur dominant et performant**. L'agglomération toulousaine reste un **territoire attractif**, où la population ne cesse d'augmenter. Les revenus moyens par ménage augmentent.

AMENAGEMENT DU TERRITOIRE

Expansion contrôlée et verticalisation

L'étalement urbain en tâche d'huile est stoppé, grâce à la trame verte et bleue. Un véritable **projet de développement économique du territoire** émerge, s'appuyant sur une politique de transport efficace, et favorisant les **formes architecturales de grande hauteur**.

La gestion et la préservation des espaces non urbains ne constituent cependant pas une priorité.

BATI ET ENERGIE

Réglementation dynamique

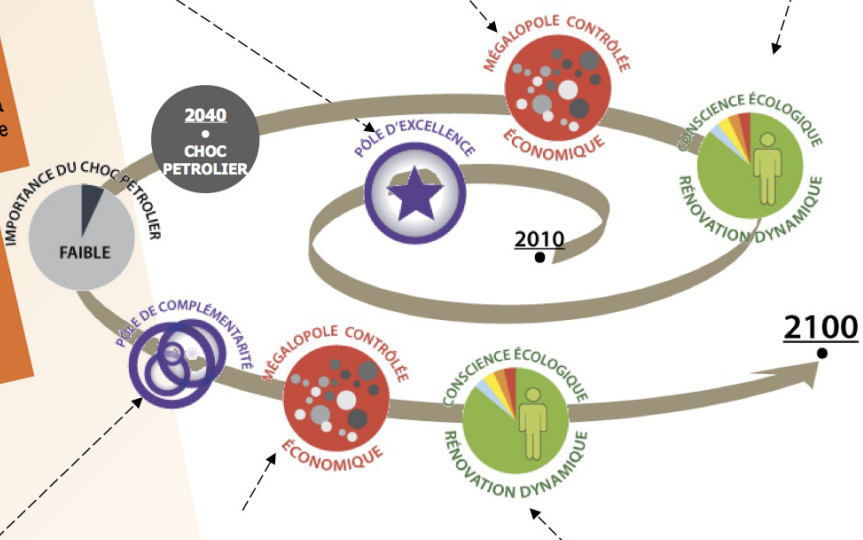
Des normes énergétiques strictes sont définies et appliquées pour tout bâtiment : **Réglementation et innovation** sont très dynamiques, favorisant la rénovation.

Pour réduire les consommations énergétiques, les normes architecturales prévoient une **compacité extrême** avec un contrôle de la densité, se traduisant sous la forme de **petits et grands collectifs**. Les bâtiments autonomes fleurissent, les **comportements deviennent vertueux**.

2040

Le prix du baril de pétrole augmente, mais en 2040 le choc pétrolier est limité par l'effort technologique et la diversification économique anticipée.

La prise de conscience "énergétique et climatique" des décideurs conduit à une organisation plus intégrée, partagée et contrôlée des efforts technologiques et réglementaires.



2040 - 2100

ECONOMIE

Diversification et levier énergétique

L'économie se diversifie afin de réduire sa dépendance à un seul secteur d'activité : moins sensible au contexte mondial, le territoire conserve une **forte attractivité.**

Une économie locale se développe, autour de l'exploitation des ressources locales et de **l'innovation pour la performance énergétique des bâtiments.**

AMENAGEMENT DU TERRITOIRE

Gouvernance régionale pour une mégalopole contrôlée

Le développement territorial répond à une volonté politique et une compétence régionale (**SCoT Régional**). Le développement économique et urbain prévaut, et repose sur une politique de **mixité fonctionnelle des espaces de vie.**

Les espaces urbains restent denses, les **grands collectifs** sont majoritaires et des **immeubles de grande hauteur** apparaissent., sans augmentation des espaces verts.

BATI ET ENERGIE

Rénovation et comportement vertueux

La mutualisation et la mise en réseaux des énergies produites devient systématique.

Les usagers accèdent au "juste nécessaire", **contrôlant au mieux leur consommation** et évitant ainsi la gabegie.

Innovation et réglementation se développent rapidement, améliorant encore les performances énergétiques des bâtiments.

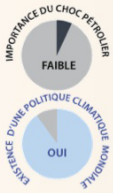
1

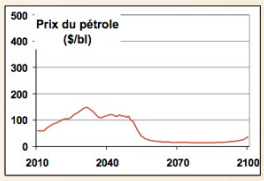
Mots clés du scénario

Mise en œuvre dans la plateforme

Économie mondiale

- **Faible choc pétrolier en 2040**
- **Politique climatique volontariste**





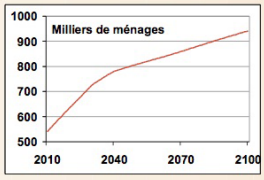
Faible choc pétrolier

Économie locale

2010 – 2040 – 2100

- Toulouse **pôle d'excellence : ville attractive**
- Faible taux de chômage
- Revenus des ménages élevés

- **Économie diversifiée : attractivité accrue**
- Augmentation de la population
- Revenus toujours supérieurs à la moyenne nationale



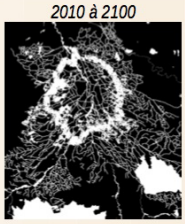
Augmentation de la démographie

Territoire

2010 – 2100

- Expansion **contrôlée**
- **Ville compacte,** très faible mitage
- Extension en continuité de l'existant

2010 à 2100



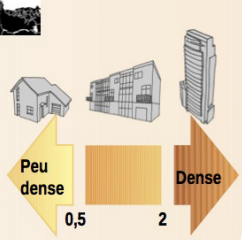
Maintien au cours du temps des contraintes d'urbanisation (en blanc)

Quartiers

2010 – 2100

- **Surélévation** des maisons et immeubles encouragée par le PLU
- Interdiction de construire de nouveaux quartiers de pavillonnaire isolé.
- Renouvellement urbain autorisé dans le centre historique
- **Végétation urbaine non favorisée**

Les structures verticales sont favorisées dès que la densité d'un quartier augmente (collectifs et grands immeubles)



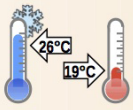
Les espaces publics sont peu végétalisés : places et parkings sont minéralisés, les jardins constituent la majorité de la végétation urbaine.

Énergétique du bâti

2010 – 2100

- **Forte innovation énergétique**
- **Actions individuelles** pour gagner en confort et réduire les dépenses en énergie
- **Comportement économe** renforcé
- Accélération des **rénovations**, bâtiments **neufs performants**

Climatisation économe



Chauffage économe

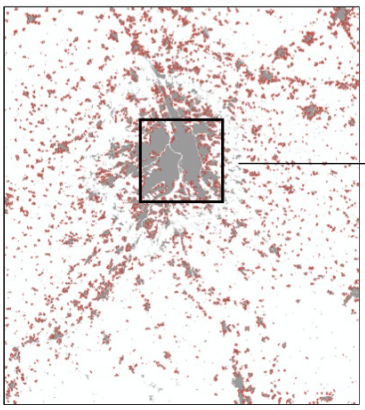
Utilisation optimale des volets, brise-soleil et de la surventilation.

*Dès 2010, les **taux de rénovation annuels** sont élevés, ce qui permet une intégration rapide de la réglementation thermique.*

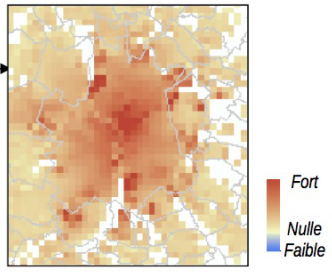
Habitat : **2.5%**
Tertiaire : **6.5%**

Impacts calculés

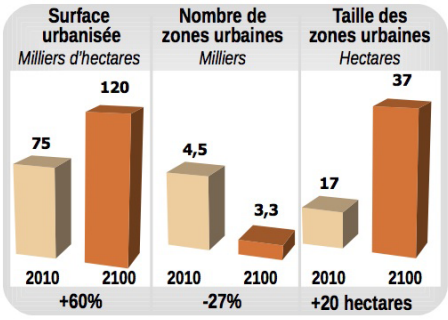
Scénario N°3 : « Dynamique »



Évolution de l'urbanisation entre 2010 (gris) et 2100 (rouge)



Évolution densité population (2010-2100)



Surface urbanisée

La surface urbanisée augmente jusqu'en 2100. L'anticipation du choc pétrolier a conduit à la diversification des activités économiques ayant pour conséquence une forte augmentation des surfaces urbanisées (+60% par rapport à 2010).

Forme urbaine

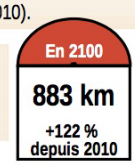
- La mise en œuvre de politiques de maîtrise de l'urbanisation dès 2010 a permis de réduire le mitage (-27% de zones urbaines), de préserver les corridors écologiques et l'agriculture périurbaine en comblant les dents creuses et en autorisant l'urbanisation qu'à proximité de l'existant.
- Les zones urbaines grandissent et se regroupent.

Distribution de la population

- Le centre ville de Toulouse ainsi que les proches périphéries se densifient.
- La population augmente sensiblement en lointaine périphérie, dans les communes situées le long des axes routiers principaux.

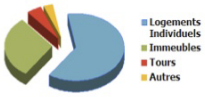
Transports

Distance parcourue chaque mois par personne entre domicile et travail.

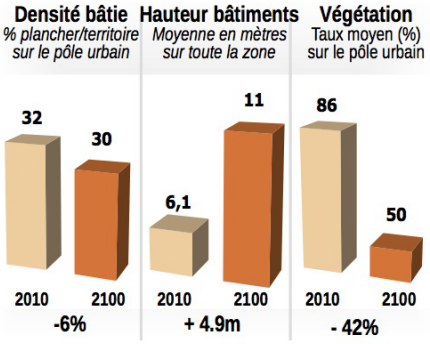


Architecture

- Un réaménagement majeur du centre ancien de Toulouse conduit à l'apparition d'immeubles de grande hauteur. La maison individuelle régresse au profit de maisons en bande et de petits collectifs.
- Les bâtiments s'élèvent en moyenne d'un étage par rapport à aujourd'hui.
- La **végétation** en zone urbanisée n'est pas favorisée. Le taux de végétation moyen sur le pôle urbain diminue.



Répartition des m² de plancher par types de quartier

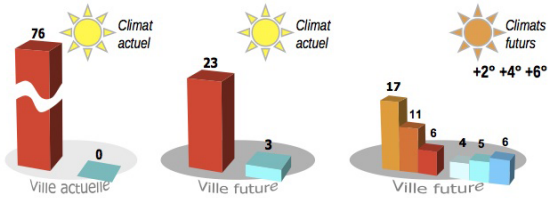


Énergie du bâti

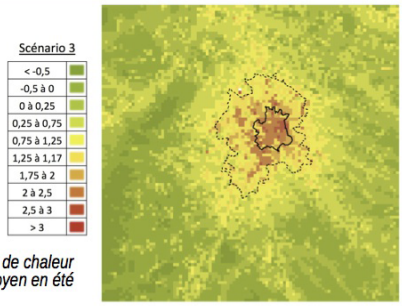
- La consommation de chauffage diminue d'un facteur 3 du seul fait de la meilleure isolation et de la politique de rénovation volontariste
- Le réchauffement climatique diminue encore plus le chauffage.
- La climatisation augmente en ville future, du fait principalement de la généralisation des équipements dans le résidentiel.
- L'usage économe de la climatisation permet de limiter l'impact du réchauffement climatique sur la consommation en été.

•Climat et confort urbain

- Les îlots de chaleurs estivaux augmentent sur les banlieues (jusqu'à +1°C) malgré les peintures réfléchissantes, du fait de la minéralisation et de la densification de la population en forte croissance.
- En hiver il diminue de 0.5°C et jusqu'à 2°C en centre-ville.



Consommation de chauffage (rouge) et climatisation (bleu) en Kwh/m2/an pour la ville actuelle (2010) et pour la ville future (2100)



Îlot de chaleur Moyen en été

Images de Toulouse et sa région

N°3 : « Dynamique »

En 2010

•L'urbanisation couvre une superficie de 75 000 ha, soit 9% du territoire. Elle est caractérisée par un fort étalement où le mitage est très présent, le pavillonnaire étant la forme d'urbanisation dominante. Les territoires agricoles périurbains constituent toujours une réserve foncière à l'urbanisation.

• L'aéronautique et le spatial constituent le principal secteur d'activité, même la santé et l'agro-alimentaire émergent doucement.

• La population, majoritairement jeune, totalise 540 000 ménages.

• La voiture constitue le principal mode de transport, l'engorgement du réseau routier est déjà quotidiennement marqué.

• Le tertiaire et le résidentiel consomment environ 1250 ktep d'énergie, dont environ 950ktep en chauffage.

• L'îlot de chaleur urbain atteint en moyenne 2°C, 4°C en conditions favorables, et jusqu'à 5°C quelques jours dans l'année.

• La mégalopole toulousaine s'affirme à l'échelon national, avec une économie diversifiée et attractive qui se traduit sur la population qui n'a cessée d'augmentée avec 860000 habitants en 2070 et près de 940000 habitants en 2100.

• Les surfaces urbanisées ont augmenté de près de 37% par rapport à 2010, malgré un contrôle et une densification (maison individuelle en bande + 91% et de petits collectifs +40% entre 2040 et 2100), totalisant près de 120000 ha (contre 105000 en 2070). Cependant, les petits collectifs restent minoritaire (28% des m² bâtis). La trame verte et bleue se distingue particulièrement bien désormais et segmente l'urbain. Malgré tout, la conurbation entre Toulouse et les villes périphériques (Montauban, Albi, Muret, Pamiers…) se confirme.

• Le taux de végétation reste bas.

• La rénovation presque généralisée et les comportements plus économes, permettent des gains énergétiques intéressants (-53 % en consommation totale de chauffage sur l'agglomération). La consommation d'énergie de climatisation est modérée.

• L'îlot de chaleur urbain augmente en été (jusqu'à +1°C).

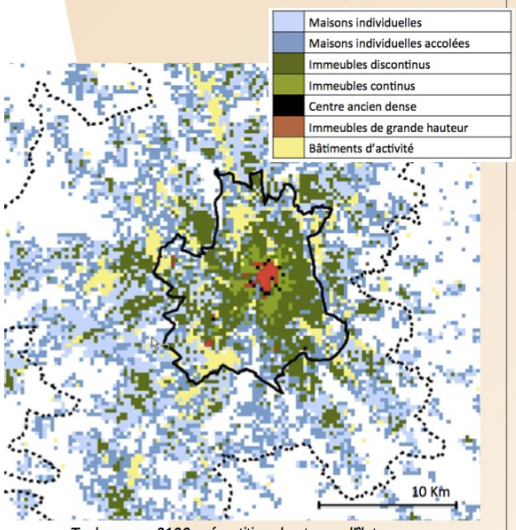
En 2040

• L'évolution démographique se poursuit selon les tendances passées avec un gain de population de +44.5% par rapport à 2010 (780000 habitants).

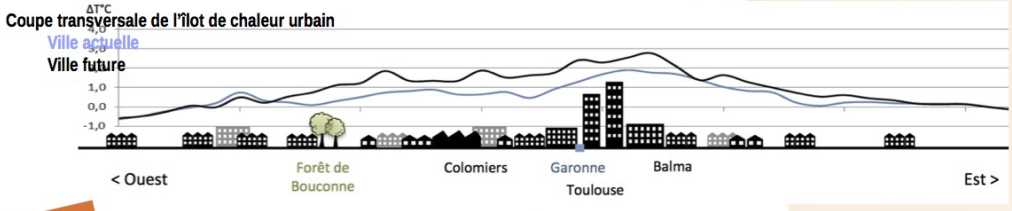
• L'urbanisation en forme de mégalopole, préserve les corridors écologiques et totalise 85821 ha. La croissance s'est réalisée par une densification du périurbain sous la forme d'habitat compact (maison individuelle en bande + 2600% et de petits collectifs +56% entre 2010 et 2040) et du centre-ville (grands collectifs +450% entre 2010 et 2040).

• Les zones urbanisées sont faiblement végétalisées.

• La rénovation organisée autour de procédés innovants et les comportements plus économes, permettent des gains énergétiques intéressants (-49% en chauffage, consommation liée à la climatisation faible). Les gains sont important dans le tertiaire.



Toulouse en 2100 : répartition des types d'îlots sur la ville (trait plein) et sur le pôle urbain (pointillé)



IDEES CLES

Une population en croissance
Des tours remplacent le centre historique
Malgré la densification, le pavillonnaire reste majoritaire

Des gains énergétiques relativement importants
L'îlot de chaleur augmente
Le confort diminue

Étude réalisée dans le cadre du projet de recherche **ACCLIMAT** *Adaptation au Changement CLIMatique de l'Agglomération Toulousaine .*

ACCLIMAT a bénéficié d'une aide de la Fondation de Coopération Scientifique **STAE Toulouse**.

Contact :Valéry Masson, Météo France : valery.masson@meteo.fr

Partenaires :
Météo France - *coordinateur scientifique*
auaT *agence d'urbanisme et d'aménagement Toulouse aire urbaine*
CERFACS *Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique*
CIRED *Centre International de Recherche sur l'Environnement et le Développement*

GEODE *Géographie de l'Environnement*
LRA *Laboratoire de Recherche en Architecture*
IMT *Institut de Mathématiques de Toulouse*
ONERA *Office National d'Études et de Recherches Aérospatiales*

Version 1.3 du 17/10/2013

Récit d'un scénario à l'horizon 2100 pour l'agglomération toulousaine

N°4 : « Vert »

2010 - 2040

ECONOMIE

Territoire attractif

L'économie se porte bien, structurée autour d'un **secteur dominant et performant**. L'agglomération toulousaine reste un **territoire attractif**, où la population ne cesse d'augmenter. Les revenus moyens par ménage augmentent.

AMENAGEMENT DU TERRITOIRE

Expansion contrôlée et espaces verts

L'étalement urbain en tâche d'huile est stoppé, grâce à un véritable **projet intégré de territoire**. Les **espaces verts sont conservés** (espaces agricoles et naturels), pour leur fonctionnalité écologique, voire réintroduits, pour leur rôle « climatiquement bénéfique ».

La mixité des fonctions est privilégiée, la densité urbaine renforcée et contrôlée, **les logements collectifs** privilégiés, optimisant l'organisation des transports.

BATI ET ENERGIE

Réglementation dynamique

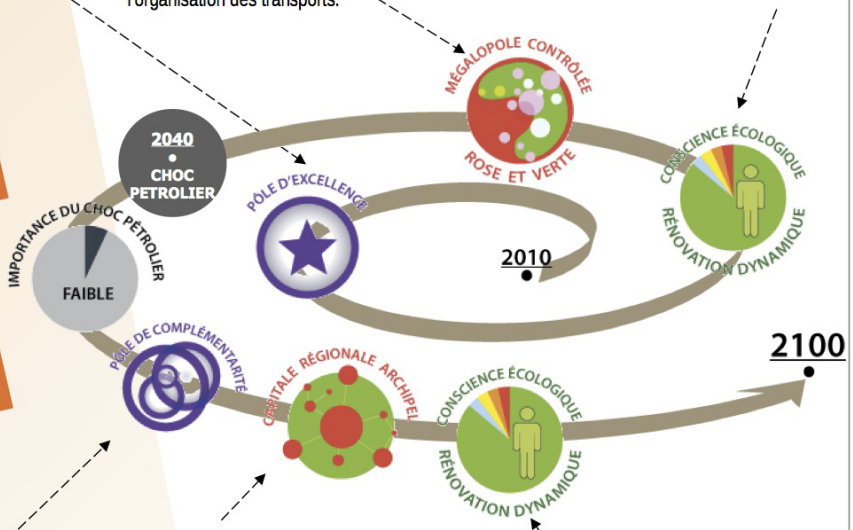
Des normes énergétiques strictes sont définies et appliquées pour tout bâtiment : **Réglementation et innovation** sont très dynamiques, favorisant la rénovation.

Pour réduire les consommations énergétiques, les normes architecturales prévoient une **compacité extrême** avec un contrôle de la densité, se traduisant sous la forme de **petits et grands collectifs**. Les bâtiments autonomes fleurissent, les **comportements deviennent vertueux**.

2040

Le prix du baril de pétrole augmente, mais en 2040 le choc pétrolier est limité par l'effort technologique et la diversification économique anticipée.

La prise de conscience "énergétique et climatique" des décideurs conduit à une organisation plus intégrée, partagée et contrôlée des efforts technologiques et réglementaires.



2040 - 2100

ECONOMIE

Diversification et levier énergétique

L'économie se diversifie afin de réduire sa dépendance à un seul secteur d'activité : moins sensible au contexte mondial, le territoire conserve une **forte attractivité.**

Une économie locale se développe, autour de l'exploitation des ressources locales et de **l'innovation pour la performance énergétique des bâtiments.**

AMENAGEMENT DU TERRITOIRE

Ville archipel

Les nouvelles politiques urbaines favorisent la **multi-polarité** : seules les communes situées à 15 min en transports collectifs sont autorisées à se développer: La **ville archipel devient réalité**. Des chaînes de transports alternatifs à la route et l'intermodalité se développent.

Les normes architecturales favorisent la **compacité**, protègent ou restaurent les espaces non urbains. La **forte végétalisation** participe au rafraîchissement de la ville et à un cadre de vie de qualité.

BATI ET ENERGIE

Rénovation et comportement vertueux

La mutualisation et la mise en réseaux des énergies produites devient systématique.

Les usagers accèdent au "juste nécessaire", **contrôlant au mieux leur consommation** et évitant ainsi la gabegie.

Innovation et réglementation se développent rapidement, améliorant encore les performances énergétiques des bâtiments.

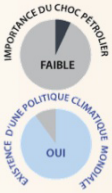
1

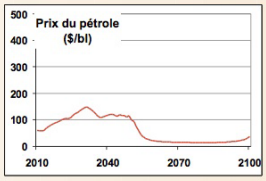
Mots clés du scénario

Mise en œuvre dans la plateforme

Économie mondiale

- **Faible choc pétrolier en 2040**
- **Politique climatique volontariste**





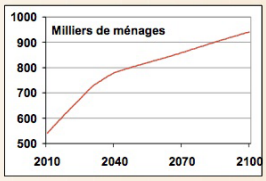
Faible choc pétrolier

Économie locale

2010 – 2040 – 2100

- Toulouse **pôle d'excellence : ville attractive**
- Faible taux de chômage
- Revenus des ménages élevés

- **Toulouse de plus en plus attractive**
- Augmentation de la population
- Revenus toujours supérieurs à la moyenne nationale



Augmentation de la démographie

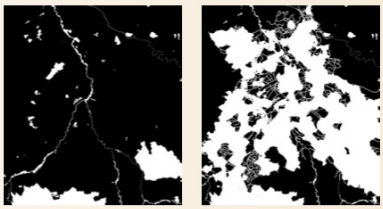
Territoire

2010 – 2040 – 2100

- Expansion **contrôlée**
- **Ville compacte,** mitage faible
- Extension en continuité de l'existant et le long du réseau routier.

- Polarisation du territoire :ville **archipel**
- Maisons ou petits collectifs

2010 *2040*



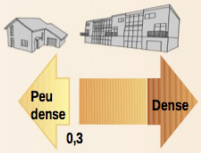
Fortes contraintes d'urbanisation (en blanc) à partir de 2040

Quartiers

2010 – 2100

- Architecture **compacte**
- Maisons individuelles en bande ou **petits immeubles collectifs**
- **Végétation urbaine favorisée**

Les structures compactes sont favorisées dès que la densité d'un quartier augmente (collectifs)



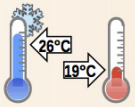
Dès 2010, les espaces publics sont fortement végétalisés : parkings, places et espaces résiduels urbains accueillent des arbres et des plantations basses.

Énergétique du bâti

2010 – 2100

- **Forte innovation énergétique**
- **Comportement économe** renforcé
- Accélération des **rénovations**, bâtiments **neufs performants**

Climatisation économe



Chauffage économe

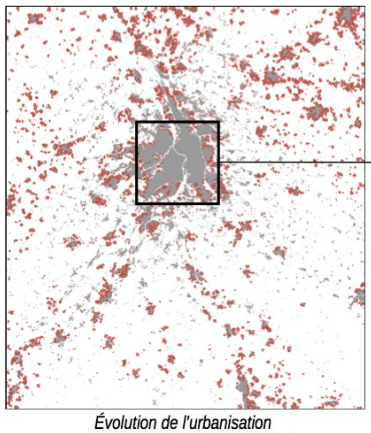
Utilisation optimale des volets, brise-soleil et de la surventilation.

*Les **taux de rénovation annuels** sont élevés, ce qui permet une intégration rapide de la réglementation thermique.*

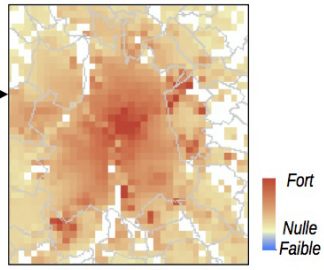
Habitat : **2.5%**
Tertiaire : **6.5%**

Impacts calculés

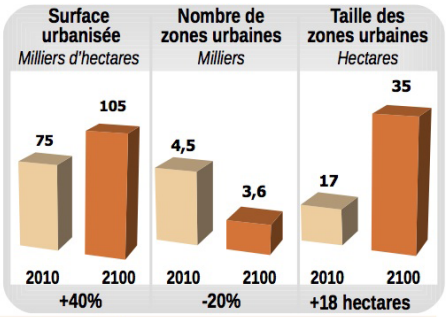
Scénario N°4 : « Vert »



Évolution de l'urbanisation entre 2010 (gris) et 2100 (rouge)



Évolution densité population (2010-2100)



Surface urbanisée

La surface urbanisée augmente jusqu'en 2100. L'anticipation du choc pétrolier a conduit à la diversification des activités économiques ayant pour conséquence une forte augmentation des surfaces urbanisées (+40% par rapport à 2010).

Forme urbaine

- Dans un contexte de forte croissance urbaine, les politiques de maîtrise de l'urbanisation entre 2010 et 2040 ont permis de réduire le mitage (-20% de zones urbaines) et de structurer l'urbanisation autour de pôles.
- Les zones urbaines grandissent, sont de plus en plus distantes les unes des autres.

Distribution de la population

- Le centre ville de Toulouse ainsi que les proches périphéries se densifient.
- La population augmente sensiblement en lointaine périphérie, dans les communes polarisantes.

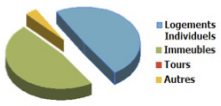
Transports

Distance parcourue chaque mois par personne entre domicile et travail.

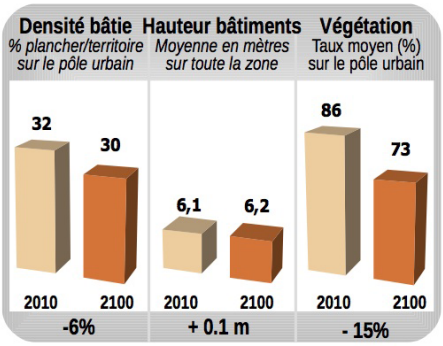
En 2100
849 km
+120 % depuis 2010

Architecture

- On construit entre 2010 et 2100 4 fois plus de m² d'habitat compact (maisons en bande et petits collectifs) que de maisons individuelles isolées.
- Malgré l'étalement urbain la hauteur moyenne du bâtiment reste stable grâce à des politiques urbaines volontaristes.
- Malgré une réglementation volontariste, le taux de végétation moyen sur le pôle urbain diminue légèrement en raison de la forte expansion urbaine.



Répartition des m² de plancher par types de quartier

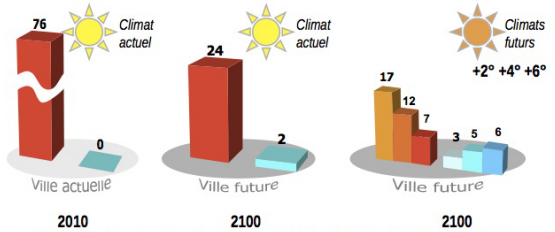


Énergie du bâti

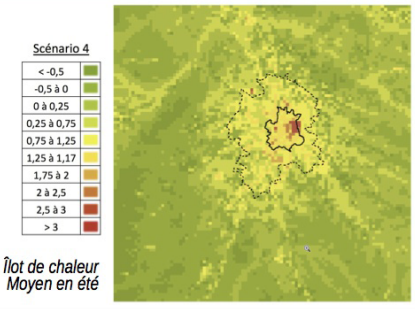
- La consommation de chauffage diminue d'un facteur 3 du seul fait de la meilleure isolation et de la politique de rénovation volontariste
- Le réchauffement climatique diminue encore plus le chauffage.
- La climatisation augmente en ville future, du fait principalement de la généralisation des équipements dans le résidentiel.
- L'usage économe de la climatisation permet de limiter l'impact du réchauffement climatique sur la consommation en été.
- La végétalisation urbaine diminue un peu le besoin en climatisation.

Climat et confort urbain

- Le verdissement urbain permet de maintenir un îlot de chaleur comparable voire localement en baisse par rapport à l'actuel malgré la forte croissance de la population.
- En hiver il diminue de 0.5°C à 1°C, grâce à un effet combiné de l'isolation des bâtiments et du verdissement.



Consommation de chauffage (rouge) et climatisation (bleu) en Kwh/m2/an pour la ville actuelle (2010) et pour la ville future (2100)



Îlot de chaleur Moyen en été

Images de Toulouse et sa région

N°4 : « Vert »

En 2010

•L'urbanisation couvre une superficie de 75 000 ha, soit 9% du territoire. Elle est caractérisée par un fort étalement où le mitage est très présent, le pavillonnaire étant la forme d'urbanisation dominante. Les territoires agricoles périurbains constituent toujours une réserve foncière à l'urbanisation.

• L'aéronautique et le spatial constituent le principal secteur d'activité, même la santé et l'agro-alimentaire émergent doucement.

• La population, majoritairement jeune, totalise 540 000 ménages.

• La voiture constitue le principal mode de transport, l'engorgement du réseau routier est déjà quotidiennement marqué.

• Le tertiaire et le résidentiel consomment environ 1250 ktep d'énergie, dont environ 950ktep en chauffage.

• L'îlot de chaleur urbain atteint en moyenne 2°C, 4°C en conditions favorables, et jusqu'à 5°C quelques jours dans l'année.

En 2100

La structuration de la ville archipel s'affirme : la population privilégie le centre de Toulouse et les communes « pôles » identifiées par des documents de planification contraignants. La surface urbanisée augmente cependant (+30000 ha, soit +40% de surface urbanisée par rapport à 2010). La bonne santé économique du territoire attire des activités diversifiées, la population augmente (+20% depuis 2040) et les revenus sont supérieurs à la moyenne nationale.

• Dans un cadre de vie très végétalisé, une architecture compacte continue de se développer : +37% de maisons individuelles en bande et +89% de petits collectifs entre 2040 et 2100. Le logement individuel représente moins de la moitié du parc (59% des m2 bâtis).

• Les politiques énergétiques s'affirment : rénovation accélérée, innovation et comportements vertueux permettent de limiter fortement les consommations (-59% de chauffage) malgré l'expansion de la ville.

• La végétation permet d'améliorer nettement le confort estival en ville, et atténue les impacts du réchauffement climatique. La climatisation rejette peu de chaleur grâce à la qualité du bâti.

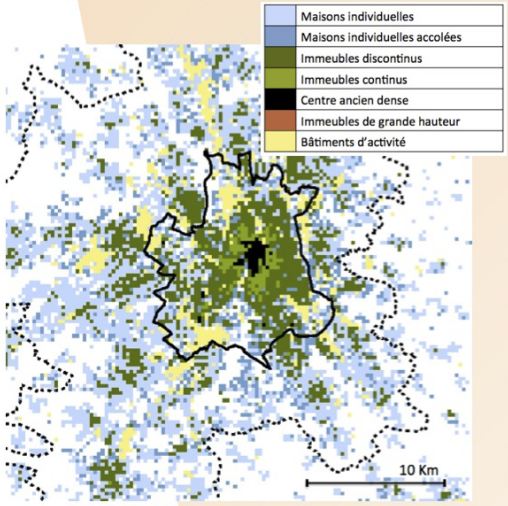
En 2040

• L'évolution démographique se poursuit, avec un fort gain de population (+ 44% de ménages depuis 2010)

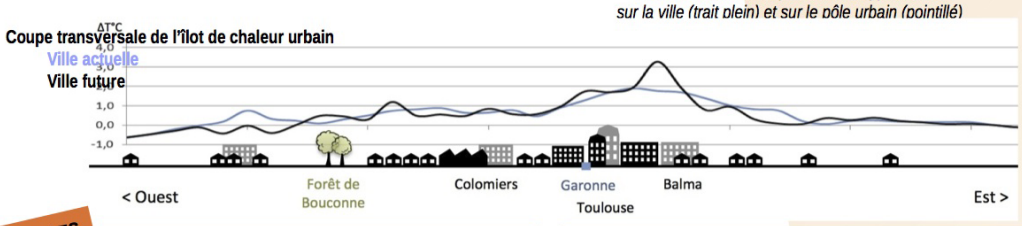
• L'urbanisation atteint 85230 ha, soit 11% du territoire. La politique volontariste progressivement mise en place pour favoriser des formes urbaines plus compactes, dans le respect des corridors écologiques, permet de limiter le mitage et de polariser peu à peu l'urbanisation. Des formes d'habitat plus compactes sont désormais privilégiées : +815% de maisons individuelles en bande et +100% de petits collectifs entre 2010 et 2040.

• Les zones urbanisées sont fortement végétalisées et s'associent aux corridors écologiques pour préserver la biodiversité et la gestion naturelles des eaux.

• L'appropriation de la question énergétique est concrète : une rénovation qui s'organise et s'appuie sur des procédés innovants, des comportements plus économes, permettent des gains énergétiques importants (-50%).



Toulouse en 2100 : répartition des types d'îlots sur la ville (trait plein) et sur le pôle urbain (pointillé)



IDEES CLES

Une ville archipel qui limite l'étalement
Une population en forte croissance
Habitat pavillonnaire et petit collectifs se côtoient

Des gains énergétiques importants
Un îlot de chaleur limité
Une ville confortable

Étude réalisée dans le cadre du projet de recherche **ACCLIMAT** *Adaptation au Changement CLIMatique de l'Agglomération Toulousaine* .

ACCLIMAT a bénéficié d'une aide de la Fondation de Coopération Scientifique **STAE Toulouse**.

Contact :Valéry Masson, Météo France : valery.masson@meteo.fr

Partenaires :
Météo France - *coordinateur scientifique*
auaT *agence d'urbanisme et d'aménagement Toulouse aire urbaine*
CERFACS *Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique*
CIRED *Centre International de Recherche sur l'Environnement et le Développement*

GEODE *Géographie de l'Environnement*
LRA *Laboratoire de Recherche en Architecture*
IMT *Institut de Mathématiques de Toulouse*
ONERA *Office National d'Études et de Recherches Aérospatiales*

Version 1.3 du 17/10/2013

Récit d'un scénario à l'horizon 2100 pour l'agglomération toulousaine

Scénario N°5 : « Ville en crise »

2010 - 2040

ECONOMIE

Territoire attractif

L'économie se porte bien, structurée autour d'un **secteur dominant et performant**. L'agglomération toulousaine reste un **territoire attractif**, où la population ne cesse d'augmenter. Les revenus moyens par ménage augmentent.

AMENAGEMENT DU TERRITOIRE

Étalement urbain et mitage

Malgré le SCoT, le développement de la métropole toulousaine n'est pas vraiment régulé, les politiques publiques peinent à converger : la **varicelle urbaine se poursuit**, sous forme de **maisons individuelles**, et s'accompagne de nouvelles grandes artères routières rapidement engorgées, mettant à mal tout principe de densité et de structuration autour des réseaux de transports collectifs.

La protection des espaces agricoles et naturels passe au second plan.

BATI ET ENERGIE

Politique publique à *minima* et peu d'initiatives individuelles

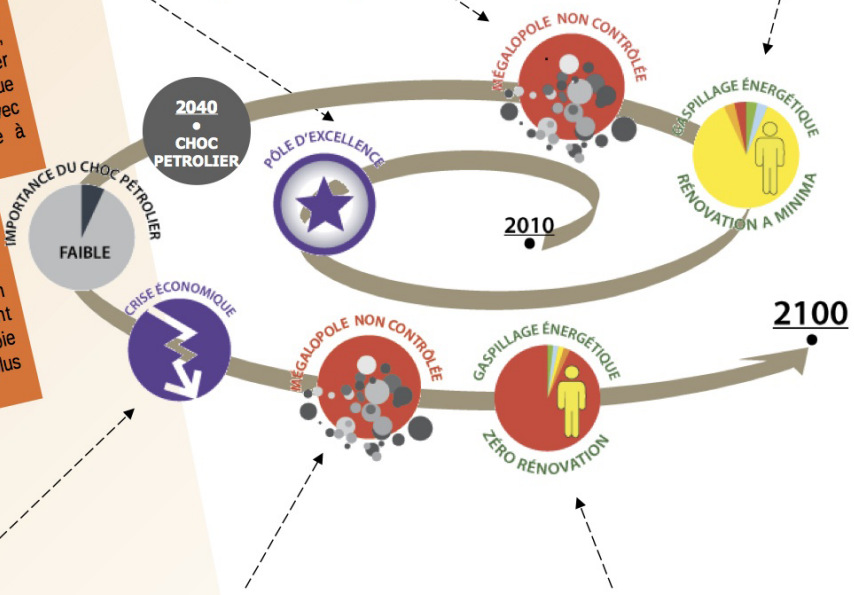
En matière énergétique, la politique locale reste tributaire des tendances nationales, ce qui fragilise fortement le territoire. **La réglementation évolue lentement.**

Les **préoccupations énergétique et environnementale sont peu présentes** : les comportements n'évoluent pas, et ne favorisent pas l'innovation.

2040

La décarbonisation de l'économie, initiée dès 2020, conduit à un choc pétrolier limité. Le prix du baril continue néanmoins à augmenter, avec une très forte croissance à partir de 2060.

Les décideurs ne voient donc pas la nécessité en 2040 de remettre en cause le système économique en place et ne s'engagent aucunement dans une voie "écologiquement" plus vertueuse.



2040 - 2100

ECONOMIE

Crise économique

L'agglomération toulousaine est touchée de plein fouet par la crise mondiale : l'industrie aéronautique est fragilisée par la crise mondiale, et les collectivités locales n'ont **pas anticipé de politique énergétique**.

Le territoire perd de son attractivité : **la population chute**, vieillit et **s'appauvrit**.

Les inégalités socio-économiques des communes et intercommunalités renforcent les tensions.

AMENAGEMENT DU TERRITOIRE

Expansion toujours non maîtrisée

L'étalement urbain devient **tentaculaire** poursuivant les tendances passées (mitage prononcé). Le SCoT a échoué, les collectivités locales se faisant concurrence pour le développement urbain.

Le modèle culturel de la **maison individuelle** se maintient fermement et fait disparaître progressivement tout espace agricole.

BATIE ET ENERGIE

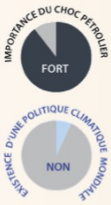
Rénovation énergétique inexistante

Les difficultés économiques affectent la réglementation et les modes de production et de consommation énergétiques. La **réglementation, peu exigeante** en matière de performances, ne favorise ni l'émergence ni l'appropriation d'innovations. Les **rénovations sont stoppées**, les **comportements restent énergivores.**

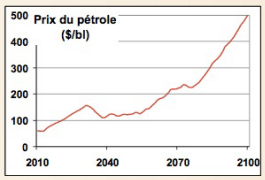
1

Mots clés du scénario — Mise en œuvre dans la plateforme

Économie mondiale



- **Faible impact du choc pétrolier en 2040** malgré un prix du baril élevé
- Bonne transition vers les énergies décarbonnées
- **Pas** de politique **climatique volontariste**



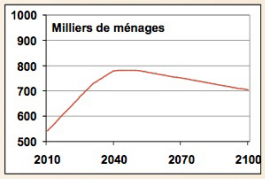
Faible choc pétrolier

Économie locale

2010 — 2040 — 2100

- Toulouse **pôle d'excellence : très attractive**
- Faible taux de chômage
- Revenus des ménages élevés

- **Crise économique**
- Diminution de la population
- Revenus inférieurs à la moyenne nationale



Chute de la démographie

Territoire

2010 — 2100

- Poursuite des **tendances actuelles** dans les modes d'urbanisation
- **Ville étalée et dispersée**
- Expansion **non contrôlée**

2010 - 2100

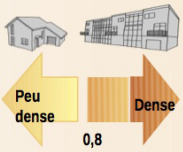
Faibles contraintes d'urbanisation (en blanc)

Quartiers

2010 — 2100

- Poursuite des **tendances actuelles** en terme de production d'habitat
- **Maisons individuelles** majoritaires
- **Végétation urbaine non favorisée**

Les maisons individuelles continuent à apparaître dans les nouveaux quartiers.



Les espaces publics sont peu végétalisés : places et parkings sont minéralisés, les jardins constituent la majorité de la végétation urbaine.

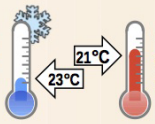
Énergétique du bâti

2010 — 2040 — 2100

- Poursuite des **tendances actuelles**
- **Faible innovation énergétique**
- **Faible taux de rénovation**
- **Usage non économe** du chauffage et de la climatisation

- **Arrêt des rénovations énergétiques**
- Poursuite d'un mode de consommation **sans préoccupation environnementale et énergétique**

Usage non économe de la climatisation



Usage non économe du chauffage

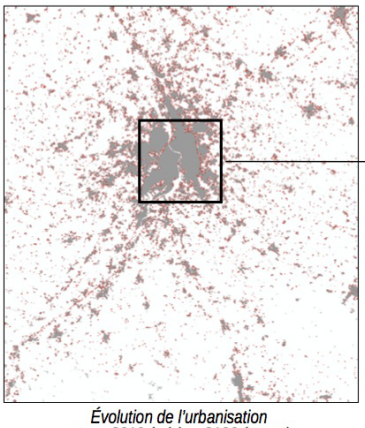
Aucune nouvelle technologie n'est mise en place pour réduire les consommations.

*Avant 2040, les **taux de rénovation annuels** restent faibles.*
Après 2040, le faible impact du choc pétrolier n'incite pas à pas à la sobriété énergétique.
Il n'y a plus de rénovation du bâti.

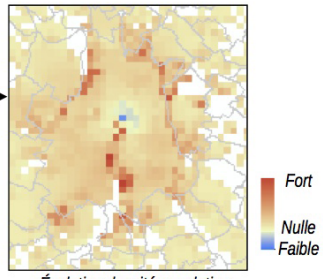
Habitat : **1% puis 0%**
Tertiaire : **3% puis 0%**

Impacts calculés

Scénario N°5 : « Ville en crise »



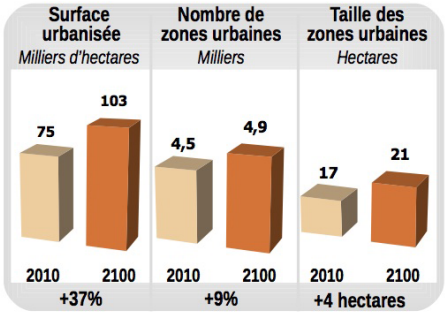
Évolution de l'urbanisation entre 2010 (gris) et 2100 (rouge)



Évolution densité population (2010-2100)

Distribution de la population

- Le centre ville de Toulouse se dépeuple en raison des coûts des loyers trop élevés par rapport aux revenus.
- L'évolution du coût du pétrole ne constitue pas un frein à habiter en proche ou lointaine périphérie comparativement au coût des loyers.



Surface urbanisée

La surface urbanisée augmente jusqu'en 2040 poursuivant les tendances démographiques puis stagne suite à la diminution de population (situation post-crise économique).

Forme urbaine

- L'absence de politiques de maîtrise de l'urbanisation a engendré une poursuite des tendances. Cela se traduit par un fort mitage (+8% de zones urbaines), qui reste limité en raison d'une faible croissante démographique inhérente à la crise économique.

Transports

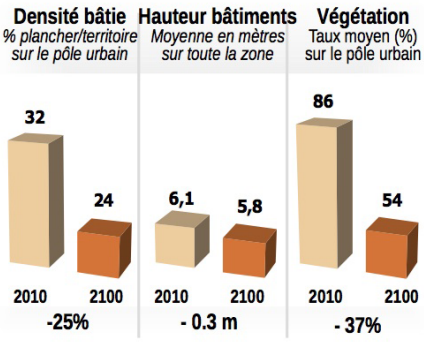
Distance parcourue chaque mois par personne entre domicile et travail.

En 2100
639 km
+53 % depuis 2010

Architecture

- On construit énormément de maisons individuelles entre 2010 et 2050. Après cette date, la crise économique freine les nouvelles constructions.
- La population se répartit majoritairement dans de l'habitat individuel isolé (78% des m² bâtis). L'étalement urbain par des formes de type habitat individuel se traduit par une diminution de la hauteur moyenne des bâtiments.
- La **végétation** en zone urbanisée n'est pas favorisée. Le taux de végétation moyen sur le pôle urbain diminue.

Répartition des m² de plancher par types de quartier

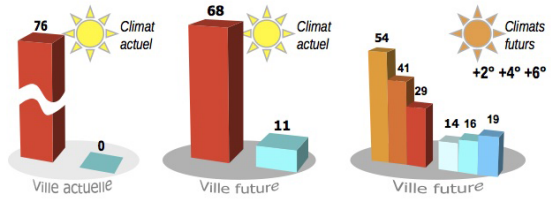


Énergie du bâti

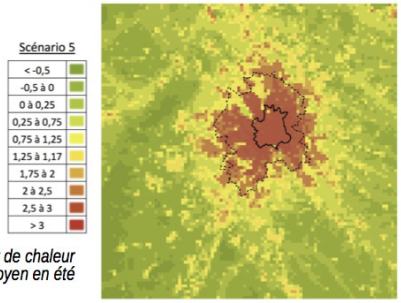
- La consommation de chauffage reste en moyenne similaire à l'actuelle du fait du manque de rénovation total dans l'ancien (malgré les bâtiments neufs qui sont eux performants)
- Le réchauffement climatique diminue cette demande de chauffage.
- Bien que le chauffage reste majoritaire, la climatisation devient un poste significatif, surtout en cas de réchauffement climatique fort.

•Climat et confort urbain

- L'îlot de chaleur augmente fortement par rapport à la période actuelle, malgré une faible croissance de population.
- En été, les rejets de climatisation contribuent à accentuer les températures extérieures, l'îlot de chaleur et l'inconfort thermique.
- En hiver, l'îlot de chaleur atteint couramment 4.5°C au lieu de 4°C.



Consommation de chauffage (rouge) et climatisation (bleu) en Kwh/m2/an pour la ville actuelle (2010) et pour la ville future (2100)



Îlot de chaleur Moyen en été

3

Images de la ville et analyse

Scénario N°5 : « Ville en crise »

En 2010

•L'urbanisation couvre une superficie de 75 000 ha, soit 9% du territoire. Elle est caractérisée par un fort étalement où le mitage est très présent, le pavillonnaire étant la forme d'urbanisation dominante. Les territoires agricoles périurbains constituent toujours une réserve foncière à l'urbanisation.

• L'aéronautique et le spatial constituent le principal secteur d'activité, même la santé et l'agro-alimentaire émergent doucement.

• La population, majoritairement jeune, totalise 540 000 ménages.

• La voiture constitue le principal mode de transport, l'engorgement du réseau routier est déjà quotidiennement marqué.

• Le tertiaire et le résidentiel consomment environ 1250 ktep d'énergie, dont environ 950ktep en chauffage.

• L'îlot de chaleur urbain atteint en moyenne 2°C, 4°C en conditions favorables, et jusqu'à 5°C quelques jours dans l'année.

En 2040

• L'évolution démographique se poursuit, avec un fort gain de population (+ 44% de ménages depuis 2010)

• L'urbanisation, très peu contrainte, poursuit son étalement : la ville se disperse sous forme d'un fort mitage de plus en plus loin du centre-ville. Elle atteint 91432 ha, soit 12% du territoire et une augmentation de 18% par rapport à 2010. Les maisons individuelles sont toujours majoritaires (79% des m² bâtis).

•L'accroissement de la population, l 'étalement urbain et l'inertie en terme de rénovation du bâti entraînent un accroissement de la consommation énergétique (+11 % de chauffage). L'apparition de la climatisation dans les consommations est importante (100ktep).

• L'îlot de chaleur se renforce.

En 2100

• La crise énergétique s'accompagne d'une crise économique, touchant particulièrement le territoire toulousain et entraînant un tassement de l'évolution démographique (-4% de ménages entre 2040 et 2070; -10% entre 2040 et 2100).

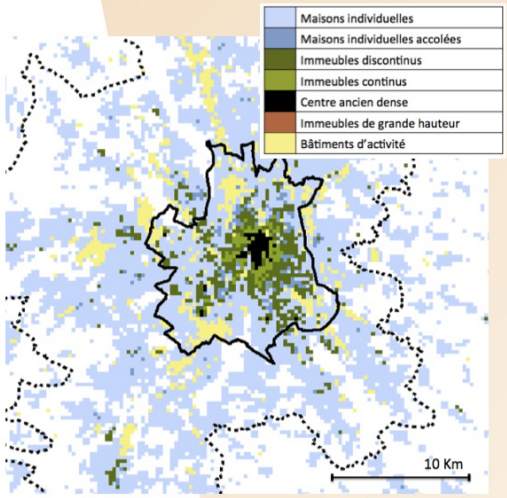
• L'urbanisation ralentit sa croissance (+9612 ha entre 2040 et 2070; +2218 ha entre 2070 et 2100). La crise a ainsi pour effet de limiter la varicelle urbaine tout en dépeuplant le centre-ville.

• Les formes urbaines, plus dispersées, se caractérisent par une augmentation des maisons individuelles isolées : +12% entre 2040 et 2100, alors que très peu de maisons en bande ou de petits collectifs ne sont construits.

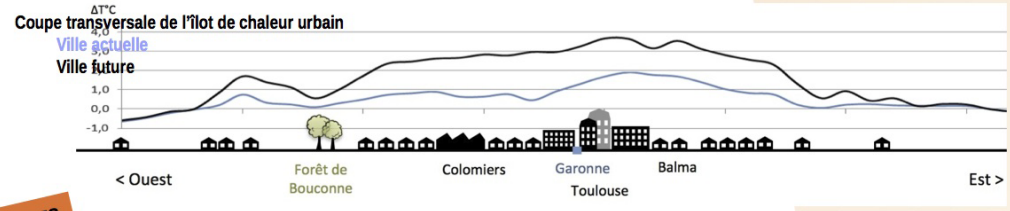
• Le taux de végétation reste faible avec seulement 54% du territoire du pôle urbain occupé par de la végétation.

• La consommation énergétique reste plus forte qu'aujourd'hui (+6%), en baisse par rapport à 2040 uniquement du fait du déplacement de population du centre-ville vers une banlieue pavillonnaire plus récente.

• Le réchauffement climatique diminue fortement les besoins en chauffage, mais la consommation de climatisation atteind 200 ktep.



Toulouse en 2100 : répartition des types d'îlots sur la ville (trait plein) et sur le pôle urbain (pointillé)



IDEES CLES

Toulouse plus touchée économiquement que le reste de la France du fait sa spécificité aéronautique /spatiale.

Une agglomération étalée, règne de la maison individuelle, dont l'étalement a été limité par la crise. Consommation énergétique en hausse.

Étude réalisée dans le cadre du projet de recherche **ACCLIMAT** *Adaptation au Changement CLIMatique de l'Agglomération Toulousaine* .

ACCLIMAT a bénéficié d'une aide de la Fondation de Coopération Scientifique **STAE Toulouse**.

Contact :Valéry Masson, Météo France : valery.masson@meteo.fr

Partenaires :
Météo France - *coordinateur scientifique*
auaT *agence d'urbanisme et d'aménagement Toulouse aire urbaine*
CERFACS *Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique*
CIRED *Centre International de Recherche sur l'Environnement et le Développement*

GEODE *Géographie de l'Environnement*
LRA *Laboratoire de Recherche en Architecture*
IMT *Institut de Mathématiques de Toulouse*
ONERA *Office National d'Études et de Recherches Aérospatiales*

Récit d'un scénario à l'horizon 2100 pour l'agglomération toulousaine

N°6 : « Passif »

2010 - 2040

ECONOMIE

Territoire attractif & diversifié

L'économie se porte bien, une diversification économique s'amorce autour des secteurs de la bio-santé et de l'agroalimentaire. Le **territoire reste attractif**, la population ne cesse d'augmenter, les revenus moyens par ménage augmentent.

2040

La décarbonisation de l'économie, initiée dès 2020, conduit à un choc pétrolier limité. Le prix du baril continue néanmoins à augmenter, avec une très forte croissance à partir de 2060.

Les décideurs ne voient donc pas la nécessité en 2040 de remettre en cause le système économique en place et ne s'engagent aucunement dans une voie "écologiquement" plus vertueuse.

2040 - 2100

ECONOMIE

Territoire attractif & diversifié

La **très bonne santé** des différents secteurs économiques toulousains n'est pas touchée : le **territoire reste attractif** et la population continue d'augmenter.

Pas d'initiative énergétique

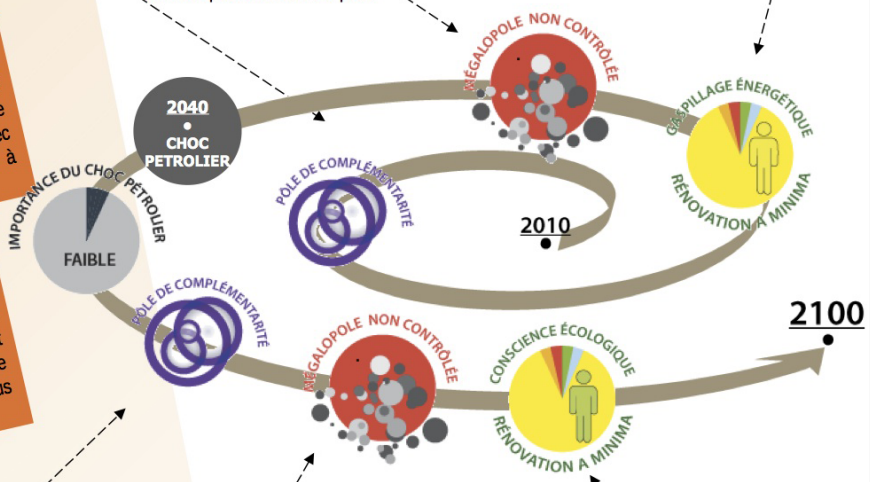
Les décideurs ne voient pas de nécessité de s'engager dans une voie « écologiquement » plus vertueuse.

AMENAGEMENT DU TERRITOIRE

Étalement urbain et mitage

Malgré le SCoT, le développement de la métropole toulousaine n'est pas vraiment régulé, les politiques publiques peinent à converger : la **varicelle urbaine se poursuit**, sous forme de **maisons individuelles**, et s'accompagne de nouvelles grandes artères routières rapidement engorgées, mettant à mal tout principe de densité et de structuration autour des réseaux de transports collectifs.

La protection des espaces agricoles et naturels passe au second plan.



AMENAGEMENT DU TERRITOIRE

Expansion toujours non maîtrisée

L'étalement urbain devient **tentaculaire** poursuivant les tendances passées (mitage prononcé). Le SCoT a échoué, les collectivités locales se faisant concurrence pour le développement urbain.

Le modèle culturel de la **maison individuelle** se maintient fermement et fait disparaître progressivement tout espace agricole.

BATI ET ENERGIE

Politique publique à *minima* et peu d'initiatives individuelles

En matière énergétique, la politique locale reste tributaire des tendances nationales, ce qui fragilise fortement le territoire. **La réglementation évolue lentement.**

Les **préoccupations énergétique et environnementale sont peu présentes** : les comportements n'évoluent pas, et ne favorisent pas l'innovation.

BATI ET ENERGIE

Des initiatives individuelles

La réglementation énergétique, peu exigeante, évolue toujours très lentement, entraînant **peu d'innovations** et aucune prise de conscience collective sur les questions énergétique et climatique.

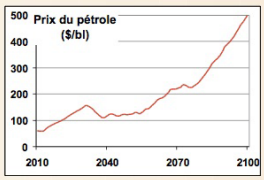
Une **conscience écologique** des citoyens et une volonté d'économie énergétique apparaissent : l'individu est le ferment d'une **culture forte de l'innovation**, qui favorise l'apparition de techniques nouvelles dans le neuf ou l'existant et permet d'améliorer confort et qualité de vie.

1

Mots clés du scénario — Mise en œuvre dans la plateforme

Économie mondiale

- **Faible impact du choc pétrolier en 2040** malgré un prix du baril élevé
- Bonne transition vers les énergies décarbonnées
- **Pas** de politique **climatique volontariste**



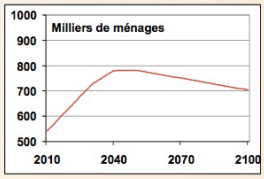
Faible choc pétrolier

Économie locale

2010 — 2040 — 2100

- Toulouse **pôle d'excellence : très attractive**
- Faible taux de chômage
- Revenus des ménages élevés

- **Crise économique**
- Diminution de la population
- Revenus inférieurs à la moyenne nationale



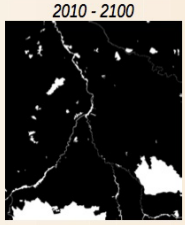
Chute de la démographie

Territoire

2010 — 2100

- Poursuite des **tendances actuelles** dans les modes d'urbanisation
- **Ville étalée et dispersée**
- Expansion **non contrôlée**

2010 - 2100



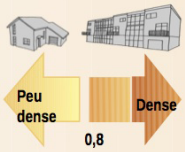
Faibles contraintes d'urbanisation (en blanc)

Quartiers

2010 — 2100

- Poursuite des **tendances actuelles** en terme de production d'habitat
- **Maisons individuelles** majoritaires
- **Végétation urbaine non favorisée**

Les maisons individuelles continuent à apparaître dans les nouveaux quartiers.



Les espaces publics sont peu végétalisés : places et parkings sont minéralisés, les jardins constituent la majorité de la végétation urbaine.

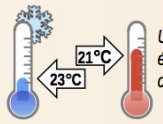
Énergétique du bâti

2010 — 2040 — 2100

- Poursuite des **tendances actuelles**
- **Faible innovation énergétique**
- **Faible taux de rénovation**
- **Usage non économe** du chauffage et de la climatisation

- **Arrêt des rénovations énergétiques**
- Poursuite d'un mode de consommation **sans préoccupation environnementale et énergétique**

Usage non économe de la climatisation



Usage non économe du chauffage

Aucune nouvelle technologie n'est mise en place pour réduire les consommations.

*Avant 2040, les **taux de rénovation annuels** restent faibles.*
Après 2040, le faible impact du choc pétrolier n'incite pas à pas à la sobriété énergétique.
Il n'y a plus de rénovation du bâti.

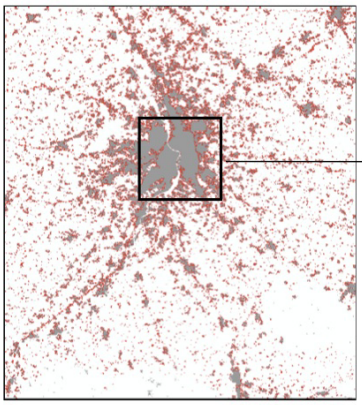
Habitat : **1% puis 0%**
Tertiaire : **3% puis 0%**

Version 1.3 du 17/10/2013

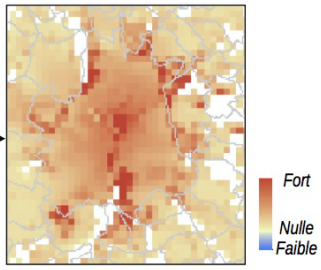
2

Impacts calculés

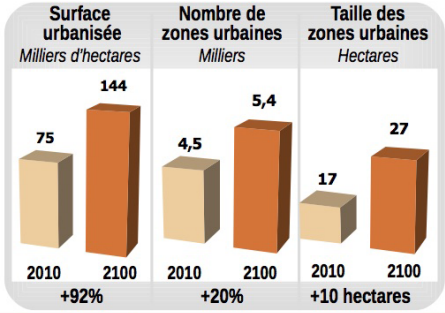
Scénario N°6 : « Passif »



Évolution de l'urbanisation entre 2010 (gris) et 2100 (rouge)



Évolution de la densité de population (2010-2100)



Surface urbanisée

La surface urbanisée augmente jusqu'en 2100. L'anticipation du choc pétrolier a conduit à la diversification des activités économiques dès 2010 ayant pour conséquence un doublement des surfaces urbanisées (+92% par rapport à 2010).

Forme urbaine

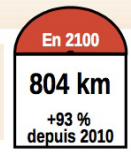
L'absence de politiques de maîtrise de l'urbanisation a engendré une poursuite des tendances. Cela se traduit par un fort mitage (+20% de zones urbaines) dans la lointaine périphérie et la conurbation en proche périphérie et le long des principaux axes routiers.

Distribution de la population

- Le centre ville de Toulouse ainsi que les proches périphéries se densifient.
- La population augmente très sensiblement en lointaine périphérie, dans toutes les communes et plus particulièrement dans celles situées le long des axes routiers principaux.

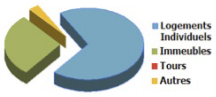
Transports

Distance parcourue chaque mois par personne entre domicile et travail.

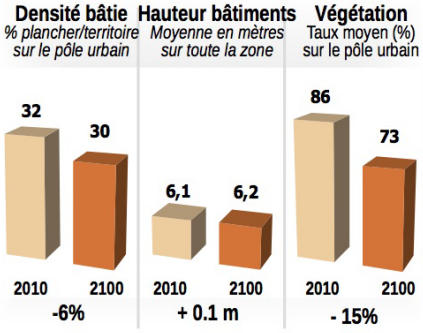


Architecture

- On construit énormément de maisons individuelles de manière régulière entre 2010 et 2100.
- La population se répartit majoritairement dans de l'habitat individuel isolé (81% des m² bâtis). L'étalement urbain par des formes de type habitat individuel se traduit par une diminution de la hauteur moyenne des bâtiments.
- La **végétation** en zone urbanisée n'est pas favorisée. Le taux de végétation moyen sur le pôle urbain diminue.

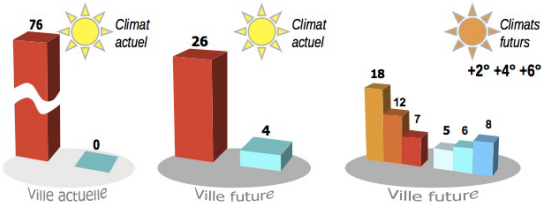


Répartition des m² de plancher par types de quartier



Énergie du bâti

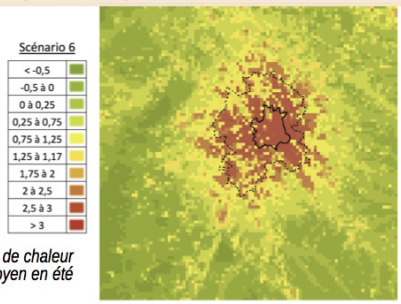
- La consommation de chauffage diminue d'un facteur 3 du seul fait de la meilleure isolation et de la politique de rénovation volontariste
- Le réchauffement climatique diminue encore plus le chauffage.
- La climatisation augmente en ville future, du fait principalement de la généralisation des équipements dans le résidentiel.
- L'usage économe de la climatisation permet de limiter l'impact du réchauffement climatique sur la consommation en été.



Consommation de chauffage (rouge) et climatisation (bleu) en Kwh/m2/an pour la ville actuelle (2010) et pour la ville future (2100)

•Climat et confort urbain

- L'îlot de chaleur augmente fortement par rapport à la période actuelle, à cause à la fois de la forte croissance de population et de l'étalement urbain. Cet effet est plus sensible en centre-ville.
- En hiver, l'îlot de chaleur ne diminue que légèrement, malgré la meilleure qualité thermique des bâtiments.



Îlot de chaleur Moyen en été

Images de la ville et analyse

N°6 : « Passif »

En 2010

•L'urbanisation couvre une superficie de 75 000 ha, soit 9% du territoire. Elle est caractérisée par un fort étalement où le mitage est très présent, le pavillonnaire étant la forme d'urbanisation dominante. Les territoires agricoles périurbains constituent toujours une réserve foncière à l'urbanisation.

• L'aéronautique et le spatial constituent le principal secteur d'activité, même la santé et l'agro-alimentaire émergent doucement.

• La population, majoritairement jeune, totalise 540 000 ménages.

• La voiture constitue le principal mode de transport, l'engorgement du réseau routier est déjà quotidiennement marqué.

• Le tertiaire et le résidentiel consomment environ 1250 ktep d'énergie, dont environ 950ktep en chauffage.

• L'îlot de chaleur urbain atteint en moyenne 2°C, 4°C en conditions favorables, et jusqu'à 5°C quelques jours dans l'année.

• L'absence de maîtrise publique de l'urbanisation est flagrante : l'agglomération toulousaine continue de s'étendre, sous forme de mitage et de conurbation, gagnant +68 609 ha, soit +92% par rapport à 2010 ! Tous les territoires gagnent en population, du centre-ville de Toulouse aux communes éloignées, faisant croître la distance moyenne parcourue entre domicile et lieu de travail (+93% par rapport à 2010). La bonne santé économique du territoire attire des activités diversifiées, la population augmente (+20% depuis 2040) et les revenus sont supérieurs à la moyenne nationale.

• Les formes d'habitat n'évoluent pas : la maison individuelle isolée reste majoritaire (81%) et gagne en surface, faisant diminuer d'autant la densité bâtie du territoire (-25%) et la hauteur moyenne des bâtiments (-0,3 m).

• La question énergétique est toujours absente des politiques publiques. Une prise de conscience citoyenne émerge néanmoins : des comportements individuels plus vertueux permettent de gagner en confort tout en limitant les dépenses énergétiques (-58% de chauffage par rapport à 2040).

• En cas de réchauffement climatique très fort, la consommation d'énergie sera maximum en été. L'îlot de chaleur atteint 2°C

• L'agglomération reste très attractive et accueille une population toujours plus nombreuse (+ 44% de ménages)

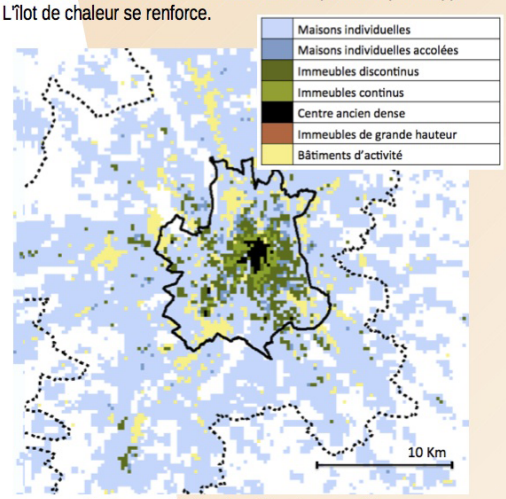
• Sans contrainte et avec une diversification des activités économiques, la tache urbaine poursuit son étalement, atteignant 92 696 ha, soit presque 12% du territoire. Les maisons individuelles isolées continuent de se déployer, mitant le territoire (+ 91% entre 2010 et 2040, soit 93% des nouveaux logements).

•Les zones urbanisées sont faiblement végétalisées et l'étalement urbain restreint la biodiversité et la gestion naturelles des eaux.

• La question énergétique n'est pas au cœur des préoccupations publiques et citoyennes : la réglementation évolue peu, l'innovation est faible, les comportements restent énergivores.

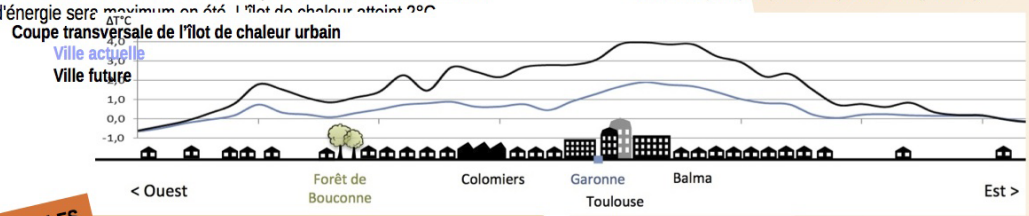
• L'accroissement de la population, l 'étalement urbain et l'inertie en terme de rénovation du bâti entraînent un accroissement de la consommation énergétique (+8 % de chauffage). L'apparition de la climatisation dans les consommations est importante (100ktep).

• L'îlot de chaleur se renforce.



Toulouse en 2100 : répartition des types d'îlots sur la ville (trait plein) et sur le pôle urbain (pointillé)

Coupe transversale de l'îlot de chaleur urbain



IDEES CLES

Une ville étalée et dispersée
Une population en croissance
Un habitat pavillonnaire toujours largement dominant

Des gains énergétiques limités
Un confort thermique qui se détériore
La climatisation pourrait dépasser le chauffage

Étude réalisée dans le cadre du projet de recherche **ACCLIMAT** *Adaptation au Changement CLIMatique de l'Agglomération Toulousaine* .

ACCLIMAT a bénéficié d'une aide de la Fondation de Coopération Scientifique **STAE Toulouse**.

Contact :Valéry Masson, Météo France : valery.masson@meteo.fr

Partenaires :
Météo France - *coordinateur scientifique*
auaT *agence d'urbanisme et d'aménagement Toulouse aire urbaine*
CERFACS *Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique*
CIRED *Centre International de Recherche sur l'Environnement et le Développement*

GEODE *Géographie de l'Environnement*
LRA *Laboratoire de Recherche en Architecture*
IMT *Institut de Mathématiques de Toulouse*
ONERA *Office National d'Études et de Recherches Aérospatiales*

Récit d'un scénario à l'horizon 2100 pour l'agglomération toulousaine

N°7 : « Néfaste »

2010 - 2040

ECONOMIE

Territoire attractif & diversifié

L'économie se porte bien, une diversification économique s'amorce autour des secteurs de la bio-santé et de l'agroalimentaire. Le **territoire reste attractif**, la population ne cesse d'augmenter, les revenus moyens par ménage augmentent.

AMENAGEMENT DU TERRITOIRE

Étalement urbain et mitage

Malgré le SCoT, le développement de la métropole toulousaine n'est pas vraiment régulé, les politiques publiques peinent à converger : la **varicelle urbaine se poursuit**, sous forme de **maisons individuelles**, et s'accompagne de nouvelles grandes artères routières rapidement engorgées, mettant à mal tout principe de densité et de structuration autour des réseaux de transports collectifs.

La protection des espaces agricoles et naturels passe au second plan.

BATI ET ENERGIE

Politique publique à *minima* et peu d'initiatives individuelles

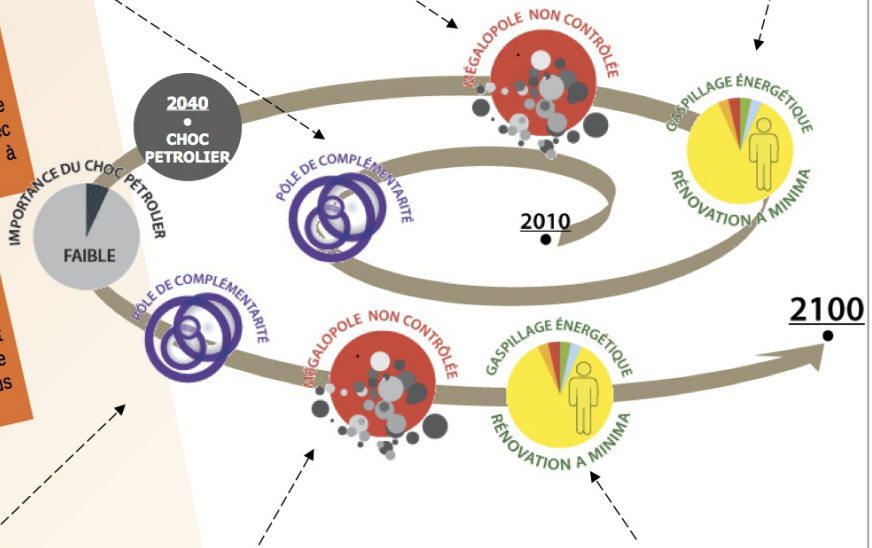
En matière énergétique, la politique locale reste tributaire des tendances nationales, ce qui fragilise fortement le territoire. **La réglementation évolue lentement.**

Les **préoccupations énergétique et environnementale sont peu présentes** : les comportements n'évoluent pas, et ne favorisent pas l'innovation.

2040

La décarbonisation de l'économie, initiée dès 2020, conduit à un choc pétrolier limité. Le prix du baril continue néanmoins à augmenter, avec une très forte croissance à partir de 2060.

Les décideurs ne voient donc pas la nécessité en 2040 de remettre en cause le système économique en place et ne s'engagent aucunement dans une voie "écologiquement" plus vertueuse.



2040 - 2100

ECONOMIE

Territoire attractif & diversifié

La **très bonne santé** des différents secteurs économiques toulousains n'est pas touchée : le **territoire reste attractif** et la population continue d'augmenter.

Pas d'initiative énergétique

Les décideurs ne voient pas de nécessité de s'engager dans une voie « écologiquement » plus vertueuse.

AMENAGEMENT DU TERRITOIRE

Expansion toujours non maîtrisée

L'étalement urbain devient **tentaculaire** poursuivant les tendances passées (mitage prononcé). Le SCoT a échoué, les collectivités locales se faisant concurrence pour le développement urbain.

Le modèle culturel de la **maison individuelle** se maintient fermement et fait disparaître progressivement tout espace agricole.

BATI ET ENERGIE

Des initiatives individuelles

La réglementation énergétique, peu exigeante, évolue toujours très lentement, entraînant **peu d'innovations** et aucune prise de conscience collective sur les questions énergétique et climatique.

Les **préoccupations individuelles énergétique et environnementale sont peu présentes** : les comportements n'évoluent pas.

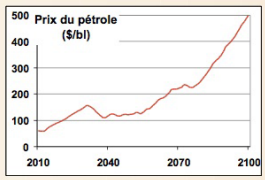
1

Mots clés du scénario

Mise en œuvre dans la plateforme

Économie mondiale

- **Faible impact du choc pétrolier en 2040** malgré un prix du baril élevé
- Bonne transition vers les énergies décarbonnées
- **Pas** de politique **climatique volontariste**



Faible choc pétrolier

Économie locale

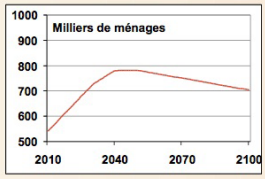
2010

- Toulouse **pôle d'excellence : très attractive**
- Faible taux de chômage
- Revenus des ménages élevés

2040

- **Crise économique**
- Diminution de la population
- Revenus inférieurs à la moyenne nationale

2100



Chute de la démographie

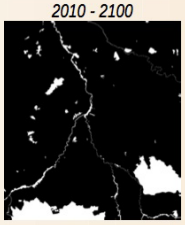
Territoire

2010

- Poursuite des **tendances actuelles** dans les modes d'urbanisation
- **Ville étalée et dispersée**
- Expansion **non contrôlée**

2100

2010 - 2100



Faibles contraintes d'urbanisation (en blanc)

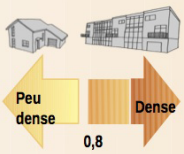
Quartiers

2010

- Poursuite des **tendances actuelles** en terme de production d'habitat
- **Maisons individuelles** majoritaires
- **Végétation urbaine non favorisée**

2100

Les maisons individuelles continuent à apparaître dans les nouveaux quartiers.



Les espaces publics sont peu végétalisés : places et parkings sont minéralisés, les jardins constituent la majorité de la végétation urbaine.

Énergétique du bâti

2010

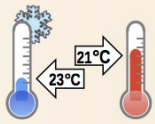
- Poursuite des **tendances actuelles**
- **Faible innovation énergétique**
- **Faible taux de rénovation**
- **Usage non économe** du chauffage et de la climatisation

2040

- **Arrêt des rénovations énergétiques**
- Poursuite d'un mode de consommation **sans préoccupation environnementale et énergétique**

2100

Usage non économe de la climatisation



Usage non économe du chauffage

Aucune nouvelle technologie n'est mise en place pour réduire les consommations.

*Avant 2040, les **taux de rénovation annuels** restent faibles.*
Après 2040, le faible impact du choc pétrolier n'incite pas à pas à la sobriété énergétique.
Il n'y a plus de rénovation du bâti.

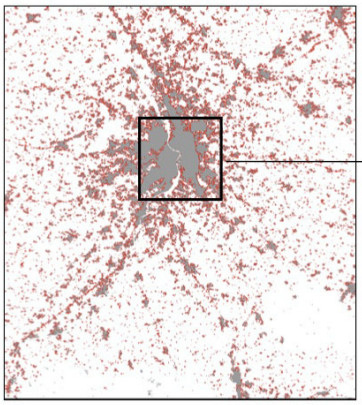
Habitat : **1% puis 0%**
Tertiaire : **3% puis 0%**

Version 1.3 du 17/10/2013

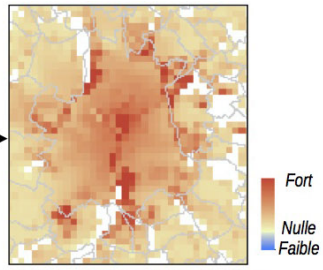
2

Impacts calculés

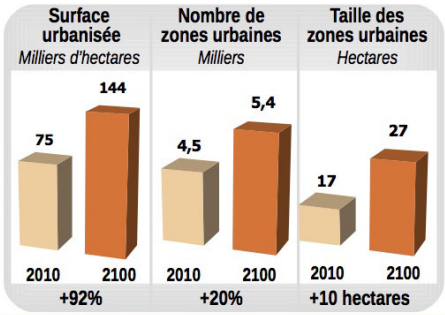
Scénario N°7 : « Néfaste »



Évolution de l'urbanisation entre 2010 (gris) et 2100 (rouge)



Évolution de la densité de population (2010-2100)



Surface urbanisée

La surface urbanisée augmente jusqu'en 2100. L'anticipation du choc pétrolier a conduit à la diversification des activités économiques dès 2010 ayant pour conséquence un doublement des surfaces urbanisées (+92% par rapport à 2010).

Forme urbaine

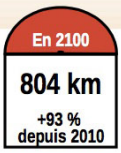
L'absence de politiques de maîtrise de l'urbanisation a engendré une poursuite des tendances. Cela se traduit par un fort mitage (+20% de zones urbaines) dans la lointaine périphérie et la conurbation en proche périphérie et le long des principaux axes routiers.

Distribution de la population

- Le centre ville de Toulouse ainsi que les proches périphéries se densifient.
- La population augmente très sensiblement en lointaine périphérie, dans toutes les communes et plus particulièrement dans celles situées le long des axes routiers principaux.

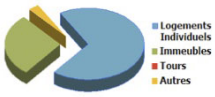
Transports

Distance parcourue chaque mois par personne entre domicile et travail.

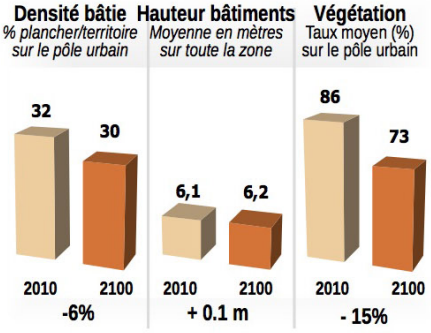


Architecture

- On construit énormément de maisons individuelles de manière régulière entre 2010 et 2100.
- La population se répartit majoritairement dans de l'habitat individuel isolé (81% des m² bâtis). L'étalement urbain par des formes de type habitat individuel se traduit par une diminution de la hauteur moyenne des bâtiments.
- La **végétation** en zone urbanisée n'est pas favorisée. Le taux de végétation moyen sur le pôle urbain diminue.

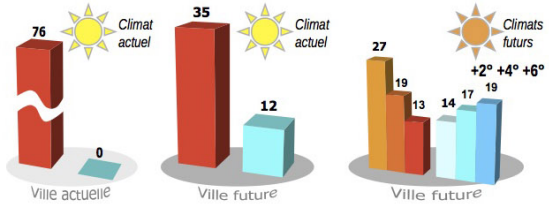


Répartition des m² de plancher par types de quartier



Énergie du bâti

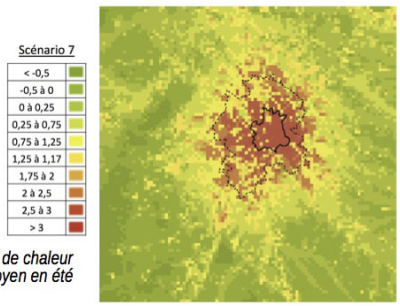
- Une rénovation régulière mais pas particulière volontariste ne permet que de diminuer, à climat constant, la consommation de chauffage que de moitié.
- La rénovation a par contre peu d'effet sur la climatisation, qui devient fortement consommatrice du fait d'un usage intensif (consigne à 23°C).
- Ainsi, dès un réchauffement climatique de +4°C , la consommation due à la climatisation devient majoritaire par rapport au chauffage.



Consommation de chauffage (rouge) et climatisation (bleu) en Kwh/m2/an pour la ville actuelle (2010) et pour la ville future (2100)

•Climat et confort urbain

- L'îlot de chaleur augmente fortement par rapport à la période actuelle, à cause à la fois de la forte croissance de population et de l'étalement urbain. Cet effet est plus sensible en centre-ville.
- En hiver, l'îlot de chaleur reste stable, avec compensation entre les effets liés à la rénovation (lente) de l'isolation et à l'étalement urbain.



Îlot de chaleur Moyen en été

3

Images de la ville et analyse

N°7 : « Néfaste »

En 2010

•L'urbanisation couvre une superficie de 75 000 ha, soit 9% du territoire. Elle est caractérisée par un fort étalement où le mitage est très présent, le pavillonnaire étant la forme d'urbanisation dominante. Les territoires agricoles périurbains constituent toujours une réserve foncière à l'urbanisation.

• L'aéronautique et le spatial constituent le principal secteur d'activité, même la santé et l'agro-alimentaire émergent doucement.

• La population, majoritairement jeune, totalise 540 000 ménages.

• La voiture constitue le principal mode de transport, l'engorgement du réseau routier est déjà quotidiennement marqué.

• Le tertiaire et le résidentiel consomment environ 1250 ktep d'énergie, dont environ 950ktep en chauffage.

• L'îlot de chaleur urbain atteint en moyenne 2°C, 4°C en conditions favorables, et jusqu'à 5°C quelques jours dans l'année.

En 2100

• L'absence de maîtrise publique de l'urbanisation est flagrante : l'agglomération toulousaine continue de s'étendre, sous forme de mitage et de conurbation, gagnant +68 609 ha, soit +92% par rapport à 2010 ! Tous les territoires gagnent en population, du centre-ville de Toulouse aux communes éloignées, faisant croître la distance moyenne parcourue entre domicile et lieu de travail (+93% par rapport à 2010). La bonne santé économique du territoire attire des activités diversifiées, la population augmente (+20% depuis 2040) et les revenus sont supérieurs à la moyenne nationale.

• Les formes d'habitat n'évoluent pas : la maison individuelle isolée reste majoritaire (81%) et gagne en surface, faisant diminuer d'autant la densité bâtie du territoire (-25%) et la hauteur moyenne des bâtiments (-0,3 m).

• La question énergétique reste absente des politiques publiques : la rénovation peine à avancer; l'innovation est minime. C'est largement insuffisant pour atteindre un facteur 4 (seulement -40% de chauffage par rapport à 2010), sans compter que l'utilisation de la climatisation explose : 150ktep à 250ktep.

• Ainsi, même pour un réchauffement climatique modéré, l'énergie consommée sera maximum en été. L'îlot de chaleur atteint 2°C.

En 2040

• L'agglomération reste très attractive et accueille une population toujours plus nombreuse (+ 44% de ménages)

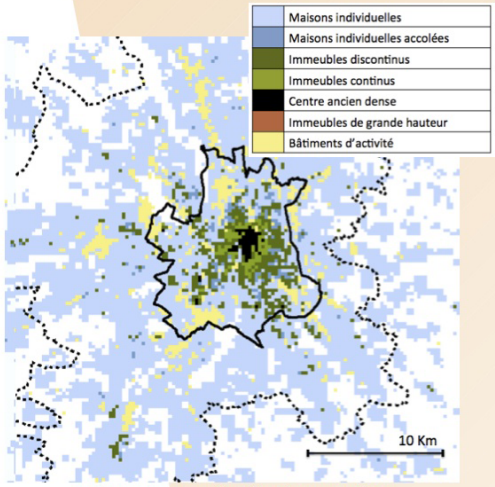
• Sans contrainte et avec une diversification des activités économiques, la tache urbaine poursuit son étalement, atteignant 92 696 ha, soit presque 12% du territoire. Les maisons individuelles isolées continuent de se déployer, mitant le territoire (+ 91% entre 2010 et 2040, soit 93% des nouveaux logements).

•Les zones urbanisées sont faiblement végétalisées et l'étalement urbain restreint la biodiversité et la gestion naturelles des eaux.

• La question énergétique n'est pas au cœur des préoccupations publiques et citoyennes : la réglementation évolue peu, l'innovation est faible, les comportements restent énergivores.

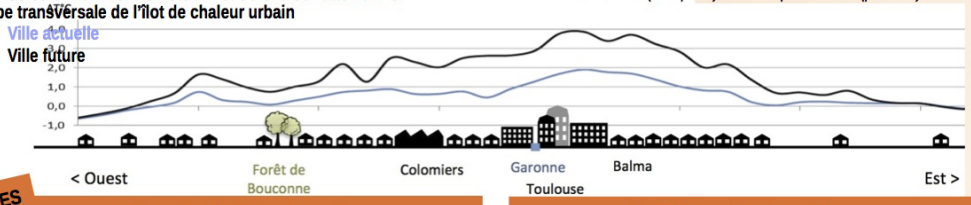
• L'accroissement de la population, l 'étalement urbain et l'inertie en terme de rénovation du bâti entraînent un accroissement de la consommation énergétique (+8 % de chauffage). L'apparition de la climatisation dans les consommations est importante (100ktep).

• L'îlot de chaleur se renforce.



Toulouse en 2100 : répartition des types d'îlots sur la ville (trait plein) et sur le pôle urbain (pointillé)

Coupe transversale de l'îlot de chaleur urbain



IDEES CLES

Une ville étalée et dispersée
Une population en croissance
Un habitat pavillonnaire toujours largement dominant

De faibles gains énergétiques
Un confort thermique qui se détériore
La climatisation dépasse le chauffage

Étude réalisée dans le cadre du projet de recherche **ACCLIMAT** *Adaptation au Changement CLIMatique de l'Agglomération Toulousaine* .

ACCLIMAT a bénéficié d'une aide de la Fondation de Coopération Scientifique **STAE Toulouse**.

Contact :Valéry Masson, Météo France : valery.masson@meteo.fr

Partenaires :
Météo France - *coordinateur scientifique*
auaT *agence d'urbanisme et d'aménagement Toulouse aire urbaine*
CERFACS *Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique*
CIRED *Centre International de Recherche sur l'Environnement et le Développement*

GEODE *Géographie de l'Environnement*
LRA *Laboratoire de Recherche en Architecture*
IMT *Institut de Mathématiques de Toulouse*
ONERA *Office National d'Études et de Recherches Aérospatiales*

Annexe 10 : Méthode ELECTRE III

La méthode Electre III mise en œuvre est destinée à illustrer une perspective possible au travail réalisé dans le cadre du projet ACCLIMAT. Il ne s'agit en aucun cas d'une étude complète car aucun décideur n'a été consulté pour la définition des hypothèses. De plus, seul le classement final a été calculé. Il n'a pas été réalisé de classement pessimiste ou optimiste comme le prévoit normalement la méthode. Il est donc impossible d'identifier les scénarios incomparables.

Matrice de performance

	Consommations +4°C	Intensité ICU sur la commune	Étalement urbain	Taux de végétalisation du pôle urbain	Taux d'habitat individuel
1 – Ville réactive	16	1,51	0,59	0,8	0,47
2 – Ville réfléchie	16	1,49	0,55	0,9	0,46
3 – Ville dynamique	16	2,07	0,53	0,5	0,58
4 – Ville verte	17	1,48	0,47	0,7	0,49
5 – Ville en crise	57	3,27	0,59	0,5	0,64
6 – Ville passive	18	3,22	0,67	0,5	0,69
7 – Ville climatiquement néfaste	36	3,07	0,67	0,5	0,69

Hypothèses définies par le décideur

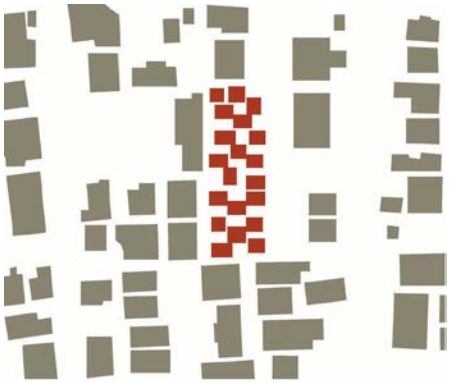
	Consommations +4°C	Intensité ICU sur la commune	Étalement urbain	Taux de végétalisation du pôle urbain	Taux d'habitat individuel
Pondération	20	20	20	20	20
Indifférence	0,5	0,05	0,05	0,05	0,05
Préférence	10	0,5	0,4	0,9	0,8
Véto	50	4	0,7	0,4	0,3

Annexe 11 : Exemples d'habitat intermédiaire

Cette annexe est un extrait du rapport de stage de Greta Parisi effectué au LRA dans le cadre de ses études à l'école polytechnique de Milan et ayant pour thème la densité perçue.

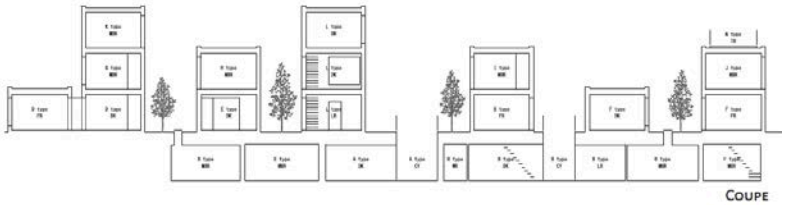
Seijo Town House, Sanaa 2007, Tokyo

Le projet est un complexe résidentiel particulier, développé de manière transversale et composé par 20 petits bâtiments qui correspondent à 14 unités résidentielles. L'objectif du projet est de créer à Tokyo, une des villes les plus dense du monde, un nouveau modèle urbain de petite taille, capable de réunir les avantages de la maison individuelle avec les avantages de l'habitat groupé. Cela est permis grâce a un assemblage type qui offre des jardins privés, des vues sans vis-à-vis et des petits passages tout en gardant un esprit de communauté et de vivre ensemble.



PLAN DE MASSE

PLAN REZ-DE.CHAUSSÉE

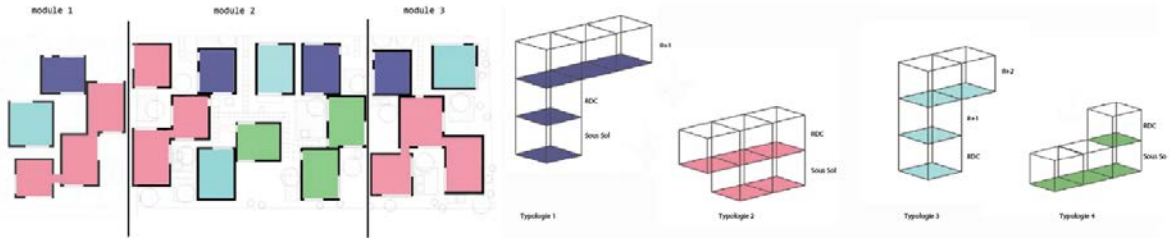


COUPE

Début du projet: 2006
Fin du projet: 2007
Surface par logement: 90m2, 120 m2
Nombre de Logements: 14
Architectes: Sanaa Kazuyo Sejima, Ryue Nishizawa, Sabrina Tschudi, Daniel Zuppiger

Organisation intérieure

Chaque logement prend la forme d'un assemblage de petits éléments. On retrouve trois différents modules qui se répètent, formés par 4 typologies d'assemblage. Cela crée une dynamique dans l'ensemble sans nuire à sa composition.
Les logements peuvent être sur 1, 2 ou 3 niveaux, parfois avec un sous-sol ouvert sur une cour intérieure très intime. Chaque logement possède un jardin ou une terrasse.
Une telle organisation crée une continuité entre toutes les pièces du logement, qui peut ainsi être aperçu entièrement d'un seul regard, en gagnant une unicité de laquelle émerge une certaine densité.



Rapport avec l'extérieur

Le 4 typologies sont composées par rapport aux vues, aux accès au nombre des pièces et en évitant les vis-à-vis entre les logements.
Les différentes hauteurs permettent d'avoir dans chaque logement des vues particulières et un dialogue constant avec l'extérieur. Ce lien est aussi permis par de grandes ouvertures qui garantissent un bon éclairage et une bonne ventilation dans les logements.
Les façades ont un revêtement en brique, dont la couleur, particulièrement claire est traitée de façon de réfléchir une lumière chaude dans les appartements. La transparence, thème caractéristique du projet, crée différentes relations spatiales, en gardant l'intimité des logements. En outre cela donne une clarté à l'ensemble, tant fonctionnelle que visuelle.
Les unités sont très proches les unes de autres, disposition qui permet de créer plusieurs lieux particuliers : des passages très étroits, des petits jardins semi-privés et privés, des parcours qui connectent les logements entre eux et qui donnent une unité d'ensemble et une mise en valeur des rapports entre espaces publics et espaces privés.

Zac Andromède, GGR Arch 2009, Toulouse Blagnac

Le quartier d'Andromède constitue le premier « éco-quartier » réalisé dans la zone urbaine de Toulouse. Le projet se situe sur les communes de Blagnac et Beauzelle, au cœur du projet Aéroconstellation. En ce qui concerne la ZAC Andromède, elle est conçue comme un ensemble urbain redécoupé en ilots investis par diverses équipes d'architectes.

PLAN DE MASSE

PLAN DE L'ILOT

FAÇADES SUD, VUE DEPUIS LA VENELLE PUBLIQUE

FAÇADES NORD, VUE DEPUIS L'ESPACE COMMUN

Début du projet : 2005
Fin du projet : 2009
Surface Total : 210 hectares
Nombre de Logements : 4000
Urbaniste-Architectes:
Treuttel, Gracias, Treutte

Cette analyse concerne en particulier l'un des ilots du quartier, L'ilot 21 traité par GGR. Il s'agit d'une parcelle rectangulaire de 75 m de large par 195 m de long. La parcelle a été redécoupée en différentes portions, séparées par des venelles d'accès divisant ainsi l'ilot en 3 zones distinctes.

Organisation de la parcelle

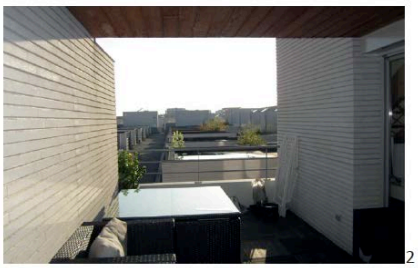
Cette parcelle se partage en trois zones différentes d'un point de vue fonctionnel. La première zone dispose de logements sociaux R+1/R+2 avec des jardins communs partiellement ouverts. La deuxième zone génère des maisons à patio en bandes le long d'une venelle d'accès centrale. Ces typologies sont très hermétiques et dialoguent peu avec leur environnement. Enfin la troisième zone propose du logement individuel groupé et du collectif autour d'un espace d'entrée commun mais non public.

VUE DEPUIS LA VENELLE CENTRALE

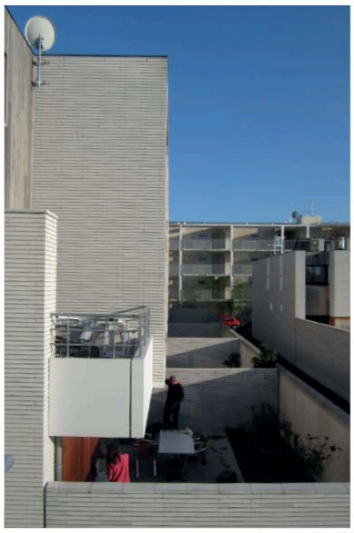
Les maisons à patio ont des ouvertures vers le Sud, au dessus des jardins (1). Pour deux logements sur quatre au 1er étage, la vue donne sur le pignon de la bande en face, en évitant le vis-à-vis (2).

COUR COMMUNE AUX LOGEMENTS GROUPÉS ET COLLECTIFS. TRAVERSÉE, PARTAGÉE MAIS NON PUBLIQUE

1



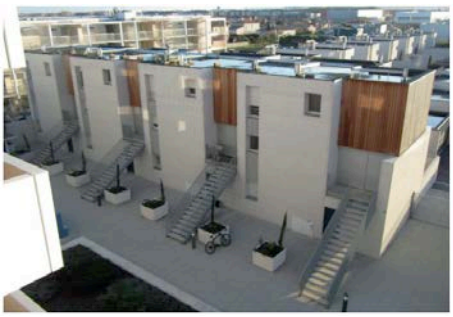
2



VUE SUR LA VENELLE OUEST, SÉPARATION ENTRE LES LOGEMENTS INDIVIDUELS ET LES LOGEMENTS GROUPÉS

Rapport avec l'extérieur : le rythme des façades

Les façades jouent un rôle fondamental dans le projet. Grâce a l'utilisation de 3 matériaux simples présents sur la façade de chaque logement un rythme et une unité d'ensemble sont crées. Les matériaux utilisés sont la brique, le métal et le bois. La brique blanche disposée horizontalement crée un lien avec le ciel. Le métal présent sur les ouvertures, crée le lien avec l'extérieur. Le bois, qui constitue les volumes en retrait, accentue la verticalité en donnant de la légèreté à la composition.



Annexe 12 : Utilisation de GENIUS pour l'évaluation du potentiel solaire

Une des applications de GENIUS est d'utiliser sa description simplifiée de la géométrie urbaine pour réaliser une évaluation globale de l'énergie solaire pouvant être produite à l'échelle urbaine. Bien que ce travail n'ait pas pu être codé dans GENIUS ni validé, il nous semble intéressant d'en présenter les bases.

1. Modèles simplifiés : revue de littérature

La première étape de notre travail a consisté à étudier les modèles simplifiés existant.

1.1. Rappels et nomenclature

Un rappel de la terminologie et de la théorie de l'ensoleillement semble nécessaire pour comprendre les modèles de calcul décrits ci-après.

1.1.1. Éléments de géométrie solaire

Nota : les variables suivies de (t) ont une valeur dépendant du temps.

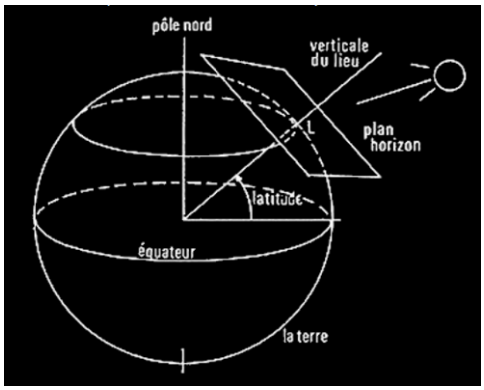


Figure 1 : Repérage des plans (CERMA, 1999)

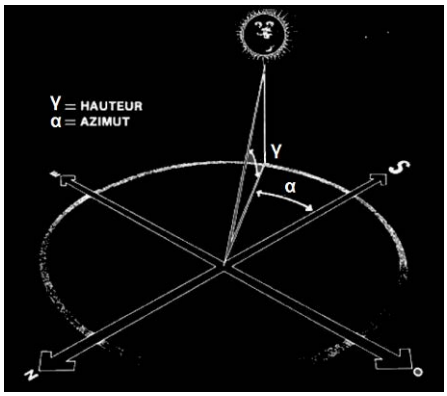


Figure 2 : hauteur et azimut (CERMA, 1999)

Repérage du soleil par rapport au plan horizontal (cf. figures 1 et 2) **:**

α (t) est l'azimut. C'est l'angle de la direction Nord-Sud avec la projection verticale de la direction du soleil [radian]

γ (t) est la hauteur. C'est l'angle de la direction du soleil avec sa projection sur le plan horizontal [radian]

Θ (t) est l'angle zénithal. C'est l'angle entre la verticale du lieu et la direction du soleil.

Repérage du plan de projection

On considère une surface (un capteur solaire ou une paroi réceptrice) inclinée d'un angle γ' par rapport au plan horizontal):

α' est l'angle de la projection horizontale de la normale au plan considéré avec l'axe Nord-Sud [radian]

γ' est l'angle de la normale au plan considéré avec le plan horizontal [radian]

ξ (t) est l'angle d'incidence du soleil sur le plan considéré [radian]

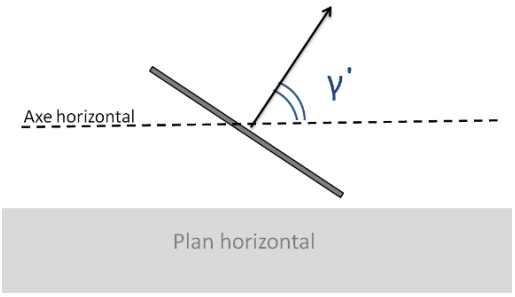


Figure 5 : γ'

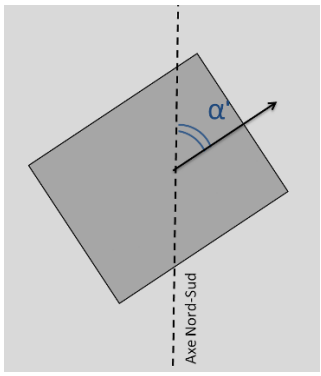


Figure 6 : α'

1.1.2. Éléments énergétiques

I : L'ensoleillement (ou éclairement énergétique) est le flux énergétique solaire reçu par unité de surface. Il s'exprime en W/m². L'équivalent anglais est « Irradiance ». L'ensoleillement compte trois composantes :

- I_b : L'ensoleillement direct, depuis le soleil,
- I_d : L'ensoleillement diffus, depuis l'ensemble de la voute céleste,
- I_ρ : L'ensoleillement réfléchi, depuis une surface externe d'albédo ρ (l'albédo d'une surface est la part de rayonnement réfléchi sur le rayonnement incident).

L'ensoleillement global horizontal est la somme des projections horizontales de I_b , I_d et I_ρ :

$$I_{G,h} = I_{b,h} + I_{d,h} + I_{\rho,h} \quad (5)$$

Pour une surface inclinée d'un angle γ' (cf. § 1.1.1), l'ensoleillement incident se calcule grâce à la formule :

$$I_{G,\gamma'} = I_{b,h} \times \cos \xi / \sin \gamma + I_{d,h} /2 \times [1 + \cos(\pi/2 - \gamma')] + I_{G,h} /2 \times \text{Albédo} \times [1 - \cos(\pi/2 - \gamma')] \quad (6)$$

En orange : composante directe

En bleu : composante indirecte

En vert : composante réfléchie

Remarque : Nomenclature relative à l'ensoleillement : $I_{composante, angle}$

composante	angle
b = directe (beam)	h = horizontal
d = diffuse	n = normal
ρ x = réfléchie	γ' x = incliné d'un angle γ'
G = globale	

x représente la surface considérés (Mur 1, 2, sol, U pour upper = la partie supérieure du mur, L pour lower = la partie inférieure du mur…)

R : La luminance énergétique est le flux énergétique par unité d'angle solide émis par une source étendue vers une direction donnée par unité d'aire dans cette direction. Il s'exprime en W/SR.m². L'équivalent anglais est « Radiance ».

1.1.3. Prise en compte des masques solaires

Ces formules ne sont valables que pour un bâtiment isolé. Dans la réalité, des obstacles vont masquer la lumière du jour et réduire l'ensoleillement incident sur nos surfaces d'étude.

La prise en compte des ces masques est complexe et fait l'objet de différentes approches qui seront détaillées ci-après.

On peut d'ores et déjà définir le facteur d'insolation σ qui est égal au quotient de la durée d'insolation sur la durée du jour :

σ = durée d'insolation / durée du jour [sans unité] (7)

1.2. Morphologic

La plateforme SIG Morphologic développée au LRA dans le cadre du projet SAGACités permet d'évaluer les consommations énergétiques intégrées à l'échelle d'un ou de plusieurs îlots en tenant compte simultanément des bâtiments, des espaces publics, des rues et de la végétation (Adolphe et al., 2002). Elle permet le croisement de données géométriques (emprise et hauteur des bâtiments, longueur des brins de rue..), topologiques (contigüité des bâtiments, façades sur rue, distance à arrêt de bus…), énergétiques (technologies choisies pour le chauffage, l'éclairage intérieur/extérieur…), et démographiques (nombre d'habitants par îlot…). Programmée dans un environnement Mapbasic autour du logiciel SIG, MapInfo, Morphologic peut être modifiée relativement facilement, notamment le type d'entrées ou de sorties pour l'adapter à nos projets.

Dans Morphologic, l'effet des masques solaires est pris en compte par un certain nombre d'indicateurs. Cela ne permet pas de calculer l'ensoleillement réellement reçu par une

surface ou un bâtiment mais cela permet d'évaluer de manière simplifiée l'effet de différentes morphologies sur le potentiel de captation solaire.

La notion de temporalité est réduite puisque l'on travaille avec des indicateurs moyens, indépendamment du l'heure ou du jour.

1.2.1. Admittance solaire

L'indicateur le plus pertinent est sans doute le facteur d'admittance solaire A_S. Il représente le potentiel des façades à capter le rayonnement solaire.

Cet indicateur est calculé empiriquement à partir de l'orientation des façades, de leur taux de contiguïté, d'un coefficient moyen de réduction du aux masques dits « lointains », et de l'albédo moyen du tissu considéré, ces deux derniers paramètres pouvant être empiriquement évalués à partir de la densité du bâti.

$$A_s = \frac{\sum_{parois} A_i * C_{contiguïté} * C_{orientation} * C_{ombrage}}{\sum_{parois} A_i} \quad \text{[sans unité]} \quad (8)$$

A_i [m²] est la surface de la paroi i,
$C_{contiguïté}$ [sans unité] est la part de la paroi non contiguë à d'autres bâtiments,
$C_{orientation}$ [sans unité] est un coefficient d'orientation forfaitaire (cf. méthode de la surface sud équivalente du CSTB) que l'on peut déduire du tableau ci-dessous :

Tableau 1 : Pondération des surfaces extérieures du bâtiment par un coefficient caractéristique de l'effet moyen de l'orientation et de l'inclinaison d'une paroi, sur la saison de chauffe

Paroi horizontale	0,8
Paroi verticale Sud	1
Paroi verticale Sud-est Nord-est	0,6
Paroi verticale Nord	0,2

$C_{ombrage}$ [sans unité] est un facteur d'ombrage moyen résultant des masques dits lointains (les autres bâtiments ou la végétation), évalué de manière approchée à partir de la densité du bâti. L'effet de l'albédo de l'environnement proche est intégré au facteur d'ombrage de manière forfaitaire à partir d'un calcul de la densité urbaine.

Tableau 2 : Détermination de C $_{ombrage}$ *en fonction du type de tissu et du type de paroi (verticale ou toiture)*

Tissu	Albédo	C ombre	F ombre	C ombretoit
Urbain dense	0,16	0.3	0.5 (1+alb)/2	0,8
Percée hausmannienne	0,19	0.4	0.5 (1+alb)2/3	0.9
Semi rural	0,22	0.5	0.5 (1+alb)4/5	0.95
Rural	0,25	0.6	0.5 (1+alb)	1

1.2.2. Autres indicateurs

D'autres indicateurs permettent de jauger le potentiel d'ensoleillement d'un ilot urbain.

Occlusivité :

L'occlusivité représente la moyenne du rapport périmètre construit sur périmètre non construit pour une série de coupes horizontales. Ce paramètre caractérise la distribution des périmètres construits en fonction de la hauteur par rapport au sol, calculés à partir d'une série de coupes dans le tissu urbain.

$$O_c = \frac{1}{N_{CoupeHoriz}} * \sum_{N_{CoupeHoriz}} \frac{P_{built}}{P_{unbuilt}}$$ [sans unité]

$$O_c = \frac{1}{H \bmod 3.5} * \sum_{N_{étages}} \frac{P_{built}}{P_{unbuilt}}$$ [sans unité] (9)

Où :
$N_{CoupeHoriz}$ est le nombre de coupes horizontales,
P_{built} est le périmètre construit de la coupe considérée,
$P_{unbuilt}$ est le périmètre non construit de la coupe considérée,
$N_{étages}$ est le nombre maximum d'étages,
H est la Hauteur maximum du bâtiment.

Prospect

Le prospect est le rapport de la hauteur moyenne des bâtiments d'une rue par sa Largeur.
P = Hm / Lm [sans unité] (10)

Facteur d'ombre au Sol

Ce facteur caractérise la portion de rue à l'ombre à un instant donné. Il n'a cependant pas été retenu dans la plateforme Morphologic car il est redondant avec l'usage simultané du prospect moyen, et de l'admittance solaire. De plus sa valeur est instantanée, ce qui va à l'encontre de l'usage souhaité d'indicateurs moyens.

$PSA = x / L = \cos \alpha / \tan \gamma \, . \, H/L$ [sans unité] (11)

Où :

α est l'azimut et γ est la hauteur solaire

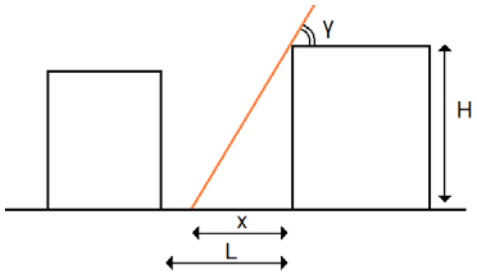


Figure 7 : calcul du facteur d'ombre au sol

1.2.3. Conclusion

Ces indicateurs ne nous permettent pas de calculer l'ensoleillement réel incident sur les surfaces étudiées mais de caractériser le potentiel solaire d'un quartier.

On peut envisager une étude paramétrique permettant d'établir une relation entre ce type d'indicateur et l'ensoleillement.

1.3. Modèle simplifié de rue Canyon – Ciel Isotrope

Les créateurs de SunTool (cf. §1.5) ont tout d'abord étudié un modèle simplifié où les masques urbains sont assimilés à une rue canyon équivalente (Robinson & Stone, 2004). La rue canyon est un problème en deux dimensions tel que représenté sur la figure 8, où le mur étudié est le mur n°1 et le mur lui faisant face est le mur n°2.

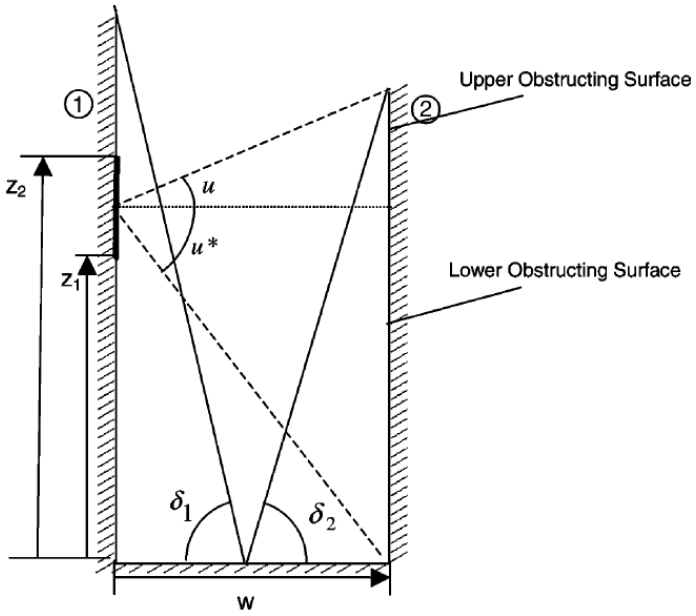


Figure 8 : Modèle de rue canyon

Par ailleurs, on considère dans ce modèle un ciel isotrope c'est-à-dire que la voute céleste a la même luminance énergétique quelque soit la direction.

On travaille ici heure par heure, pour chaque 15 du mois (jour supposé représentatif de chaque mois).

On suppose connu :

- L'ensoleillement direct Horizontal I_{bh} (et donc L'ensoleillement direct normal I_{bn})
- L'ensoleillement diffus Horizontal I_{dh}
- L'ensoleillement global Horizontal I_{gh}
- β_1 l'inclinaison du mur 1 = surface de réception*
- β_2 l'inclinaison du mur 2 faisant face*
- ρ_{sol} l'albédo du sol
- ρ_1 l'albédo du mur 1
- ρ_2 l'albédo du mur 2

* β est un angle d'inclinaison entre 0 et π tel que β est égal à 0 pour une surface horizontale tournée vers le haut, à π/2 pour une surface verticale et à π pour une surface horizontale tournée vers le bas.

On étudie l'ensoleillement sur un point précis d'une façade : son centre, le centre d'une baie, etc.

1.3.1. Assimilation des masques solaires à une rue canyon

On cherche à simplifier un paysage urbain complexe par une rue canyon représentée pas son angle u (cf. figure 8).

On obtient u en intégrant la géométrie urbaine sur une demi-sphère :

$$½ \cos(\beta + u) = 1/\pi \iint_S \cos \xi' \, . \, d\omega \qquad \text{[sans unité]} \qquad (11)$$

Où
ξ' est l'angle d'incidence d'un petit élément d'obstruction
dω est l'angle solide d'un petit élément d'obstruction

Une fois la géométrie urbaine simplifiée, on va chercher à déterminer les trois composantes de l'ensoleillement :

- L'ensoleillement diffus (§3.2)
- L'ensoleillement direct (§3.3)
- L'ensoleillement réfléchi (§3.4)

1.3.2. Calcul de l'Ensoleillement diffus sur la surface d'inclinaison β

- Sans prendre en compte l'effet des masques solaires :

Ensoleillement diffus sur la surface d'inclinaison β :

$$I_{d\,\beta\,\text{sans ombre}} = I_{dh}\,(1+\cos\beta)/2 \qquad [W/m^2] \qquad (12a)$$

- Avec l'effet des masques solaires :

Ensoleillement diffus sur la surface d'inclinaison β :

$$I_{d\,\beta} = I_{dh}\,[1+\cos(\beta + u)]/2 \qquad [W/m^2] \qquad (12b)$$

1.3.3. Calcul de l'Ensoleillement direct sur la surface d'inclinaison β

- Sans prendre en compte l'effet des masques solaires :

Ensoleillement direct sur la surface d'inclinaison β :

$$I_{b\,\beta\,\text{sans ombre}} = I_{b\,n} \times \cos\,\xi \qquad [W/m^2] \qquad (13a)$$

Où I_{bn} est l'ensoleillement direct normal,
ξ est l'angle d'incidence du rayonnement direct.

- Avec l'effet des masques solaires :

Ensoleillement direct sur la surface d'inclinaison β :

$I_{b\,\beta} = I_{b\,n} \times \sigma_t \times \cos\ \xi$ [W/m²] (13b)

Où σ_t est le ratio d'ensoleillement correspondant à la part de surface ensoleillée sur la surface totale (cf. §1.3.5).

1.3.4. Calcul de l'Ensoleillement réfléchi sur la surface d'inclinaison β

- Sans prendre en compte l'effet des masques solaires :

S'il n'y a pas de masque solaire, la seule réflexion à prendre en compte est celle du sol.

Ensoleillement global réfléchi depuis le sol sur la surface d'inclinaison β_1 :

$I_{\rho sol\ \beta\ 1\ sans\ masque} = I_{Gh} \times \rho_{sol} \times (1 - \cos \beta_1)/2$ [W/m²] (14)

- Avec l'effet des masques solaires : le soleil va être réfléchi depuis le mur 2 de la rue canyon et depuis le sol.

On doit connaitre l'ensoleillement global incident sur le mur opposé de la rue canyon : $I_{G\,\beta\,2}$.

$I_{G\,\beta\,2}$ = ensoleillement direct sur 2 (calculé à partir de (13b))

+ ensoleillement diffus sur 2 (calculé à partir de (12b))

+ ensoleillement réfléchi sur 2 depuis le sol et 1 (calculé avec les formules ci-dessous (17a) (17b) et (17c) avec la valeur de l'ensoleillement global de la façade 1 $I_{G\,\beta\,mur\,1}$)

De même, on doit connaitre l'ensoleillement global incident sur le sol de la rue canyon : $I_{G\,\beta\,sol}$.

= ensoleillement direct (calculé à partir de (13b))

+ ensoleillement diffus :

$I_{d\,\beta\,sol} = I_{dh} \times (\cos \delta_1 + \cos \delta_2)/2$ [W/m²] (15)

+ ensoleillement réfléchi :

$I_{\rho\,\beta\,sol} = \rho \times I_{G\,\beta\,mur\,1} \times (1-\cos \delta_1)/2 + \rho \times I_{G\,\beta\,mur\,2} \times (1-\cos \delta_2)/2)$ [W/m²] (16)

Comme on ne connait pas encore la valeur de l'ensoleillement global sur le mur 1, on va supposer une valeur de départ fausse, sans prendre en compte la réflexion (donc égale à $I_{d\,\beta} + I_{b\,\beta}$). On procèdera ensuite par itération comme indiqué sur la figure 9, jusqu'à atteindre la convergence

L'ensoleillement réfléchi reçu par la surface étudié se calcule alors avec les formules ci-dessous :

$I_{\rho U\,\beta\,1} = I_{G\,\beta\,2} \times \rho_2 \times [\cos\beta_1 - \cos(\beta_1+u)]/2$ (17a) pour la partie haute du mur opposé

$I_{\rho L\,\beta\,1} = I_{G\,\beta\,2} \times \rho_2 \times [\cos(\beta_1-u) - \cos\beta_1]/2$ (17b) pour la partie base du mur opposé

$I_{\rho sol\,\beta\,1} = I_{G\,\beta\,sol} \times \rho_{sol} \times [1 - \cos(\beta_1 - u)]/2$ (17c) pour le sol

On finir on a :

$I_{G\,\beta\,mur\,1} = I_{b\,\beta1} + I_{d\,\beta1} + I_{\rho U\,\beta\,1} + I_{\rho L\,\beta\,1} + I_{\rho G\,\beta\,sol}$

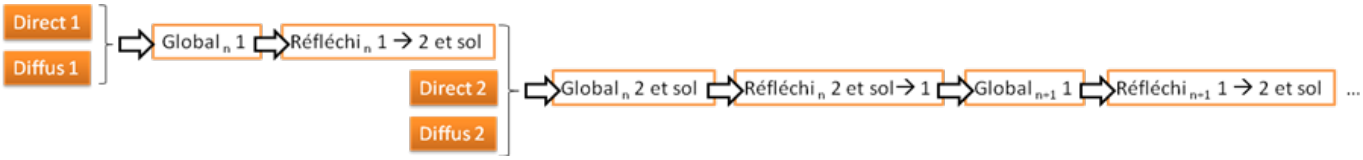


Figure 9 : Processus de calcul itératif

1.3.5. Détermination de σ t

Afin de prendre en compte les masques solaires dans le calcul de l'ensoleillement direct (13b), le ratio d'ensoleillement du mur 1 σ_t doit être calculé pour chaque heure du 15 du mois.

Pour cela, on discrétise la surface en une grille. Au centre de chaque cellule de cette grille, on va tester à intervalles de temps réguliers si le disque solaire et visible ou non. Pour chaque intervalle de temps (24 heures x 12 mois) on calcule le ratio de cellules où le soleil et visible sur le nombre total de cellules. On obtient une matrice σ_t.

1.3.6. Conclusion

Ce modèle permet de calculer l'ensoleillement incident sur une surface de manière assez rapide. Cependant, le modèle de ciel est très simplifié puisqu'il est exceptionnel que la luminance soit répartie de manière identique dans toute la voute céleste.

1.4. Modèle simplifié de la rue Canyon – Ciel Anisotrope

Afin de prendre en compte l'anisotropie du ciel, les créateurs de SunTool ont exploré un autre modèle de rue canyon (Robinson & Stone, 2004).

Cette méthode utilise également une rue canyon équivalente mais le modèle de ciel est plus réaliste puisqu'il s'agit d'un ciel anisotrope. La méthode du chapitre précédent est donc reprise à l'identique à l'exception des parties concernant l'ensoleillement diffus.

Le modèle de ciel défini par Perez donne l'ensoleillement diffus à partir de la formule suivante (Perez, Ineichen, Seals, Michalsky, & Stewart, 1990) :

$I_{d\,\beta} = I_{dh}\,[(1\text{-}F1) \times (1+\cos\beta)/2 + F1 \times a_0/a_1 + F2 \sin\beta]$ [W/m²] (18)

Dans laquelle les trois termes entre crochets correspondent :

- Au rayonnement diffus isotrope de fond i
- Au degré d'anisotropie autour du soleil ii
- Au degré d'anisotropie à l'horizon iii

Afin de prendre en compte l'effet de masque, on modifie les trois termes :

- i est réduit en fonction de l'angle u masqué par le canyon
- ii est multiplié par un opérateur Booléen B ou par une fraction représentative du facteur d'insolation
- iii est multiplié par un facteur S

$I_{d\,\beta} = I_{dh}\,[(1\text{-}F1) \times (1+\cos\beta+u)/2 + B \times F1 \times a_0/a_1 + S \times F2 \sin\beta]$ [W/m²] (19)

Dans ce modèle le ciel est supposé isotrope sauf autour du soleil et à l'horizon. Or, en milieu urbain, l'horizon est très souvent masqué. Les concepteurs de SUNTool se sont donc tournés vers un modèle plus précis (cf. §1.5).

1.5. SUNTool

SUNTool est un logiciel de modélisation urbaine qui simule, entre autres, l'énergie consommée et produite, le niveau de confort et les consommations d'eau.
En termes d'ensoleillement, l'objectif des concepteurs de SUNTool était d'obtenir des résultats équivalents à la méthode de ray tracing avec un algorithme plus simple permettant de modéliser une centaine de bâtiments (Robinson & Stone, 2004; Robinson et al., 2007).

Données d'entrée :

- Géométrie simplifiée
- Modèle de ciel anisotrope
- Localisation géographique du projet

1.5.1. Modèle de ciel

Le ciel est considéré comme un demi-hémisphère au centre duquel se trouve le bâtiment étudié. Ce demi-hémisphère est découpé en p portions. On utilise ici le découpage proposé par Tregenza et Sharples (1993) dans lequel on compte 145 portions d'angle solide équivalents.
A chaque portion est associées :

- un angle solide Φ_p [Sr] = $\Delta\alpha_p$ x (sin $\gamma_{p\,max}$ - sin $\gamma_{p\,min}$)
- une valeur de luminance énergétique R_p [W/m²/Sr]

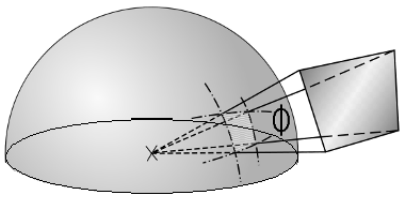


Figure 10 : Angle solide

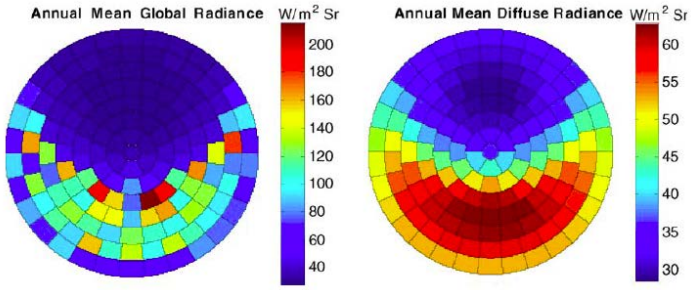


Figure 11 : Luminance énergétique annuelle pour Londres (Robinson & Stone, 2004)

En fonction de la géométrie urbaine et du bâtiment étudié on calcule pour chacune des portions p :

- σ_p : la part de la portion de ciel p vue depuis la surface de réception étudiée (entre 0 et 1) [sans unité]
- ξ_p : l'angle d'incidence entre la portion de ciel p et la surface de réception étudiée [radian]

$\cos \xi_p = \cos (\gamma_{\text{centre p}}) \times \cos (\alpha'_{\text{centre p}}) \times \sin \beta + \sin (\gamma_{\text{centre p}}) \times \cos \beta$ [sans unité] (20)

Avec :

$\gamma_{\text{centre p}}$ = altitude du centre de la part visible de la portion de ciel p

$\alpha'_{\text{centre p}}$ = azimut entre le centre de la part visible de la portion de ciel p et la normale de la surface d'étude

β = inclinaison de la surface de réception considérée

1.5.2. Procédure

Les calculs étant réalisés toutes les heures de l'année pour les 145 portions de ciel on peut préparer les caractéristiques de la voute céleste dans des matrices de dimension 8760 x 145 :

- [R]

Et pour chacune des j surfaces étudiées on peut calculer les matrices de mêmes dimensions :

- [Φ]
- [ξ]
- [σ]

Calcul de σ_p

On divise chaque portion de ciel en grille de 10 x 10. Pour les 100 cellules on détermine les n cellules depuis lesquelles on peut voir le ciel. On a alors :

$\sigma_p \times \cos \xi_p = [\text{somme}_{\text{de j = 1 à n}} (\cos \xi j)]/100$ [sans unité] (21a)

De la même manière, on peut calculer la part de portions de ciel cachées depuis la surface étudiée. Celle-ci sera utilisée pour calculer l'ensoleillement réfléchi par les masques.

$(1 - \sigma_p) \times \cos \xi_p = [\text{somme}_{\text{ de j = n+1 à 100}} (\cos \xi j)]/100$ [sans unité] (21b)

On peut alors calculer l'ensoleillement diffus et direct :

Calcul de l'ensoleillement diffus :

$I_{d\,\beta} = \text{somme}_{\text{ de p = 1 à 145}} (R_p \times \Phi_p \times \sigma_p \times \cos \xi_p)$ [sans unité] (22)

Calcul de l'ensoleillement direct :

$I_{b\,\beta} = \text{somme}_{\text{ de p = 1 à 145}} (I_{b\,n\,p} \times \sigma_p \times \cos \xi_p)$ [sans unité] (23)

Calcul de l'ensoleillement réfléchi par les masques :

- Au dessus de l'horizontale

$I_{\rho U,\beta} = \text{somme}_{\text{ de p = 1 à 145}} [(I_{G\beta\ \text{masque}} \times \rho_{\text{masque}}/\pi)_p \times \Phi_p (1- \sigma_p) \times \cos \xi_p]$ [sans unité] (24a)

- Et en dessous de l'horizontale (on considère un demi-hémisphère identique – cf. figure 12)

$I_{\rho L,\beta} = \text{somme}_{\text{ de p = 1 à 145}} [(I_{G\beta\ \text{masque}} \times \rho_{\text{masque}}/\pi)_p \times \Phi_p \times \cos \xi_p]$ [sans unité] (24b)

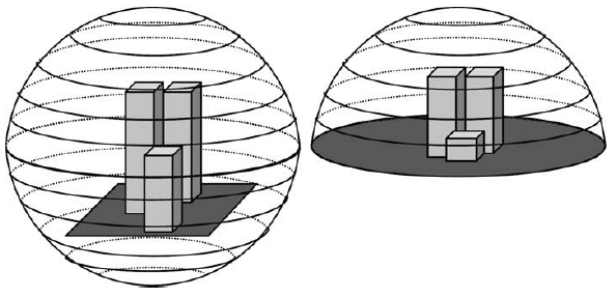


Figure 12 : Réflexion depuis un demi-hémisphère supérieur et un demi-hémisphère inférieur (Robinson & Stone, 2004)

Il nous manque l'ensoleillement incident sur les masques $I_{G\beta\ \text{masque}}$.
Pour le calculer, on fait l'hypothèse que l'ensoleillement sera égal, pour toutes les façades, à l'ensoleillement de la surface représentant le masque le plus important.

On procède ensuite par itération comme cela a été présenté au chapitre 3.

1.5.3. Précision pour des surfaces hétérogènes

Les calculs décrits ci-avant sont réalisés pour une façade donnée (au centre plus précisément). Or, dans une géométrie urbaine, une façade peut avoir des facteurs de vue du ciel très variables selon le point considéré (et par conséquent une grande variation de σ_p).

On défini donc une grille pour chaque façade. Pour chaque cellule de la grille, on calcule de manière grossière la portion de vue du ciel $\sigma_{approximatif}$ (résolution de 45°).

L'algorithme découpe ensuite la façade en zones de $\sigma_{approximatif}$ homogène :

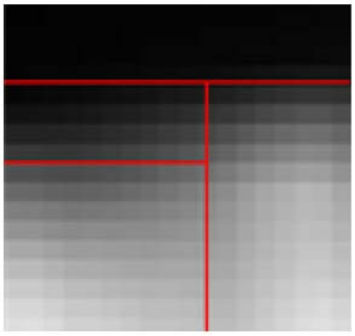


Figure 13 : Découpage de la façade selon les valeurs de $\sigma_{approximatif}$ (Robinson & Stone, 2004)

Nuances de gris : niveaux de σ pour chaque cellule de la grille de façade
En rouge : découpage en zones homogènes

L'algorithme calcule ensuite le rayonnement reçu au centre de chaque nouvelle zone.

1.5.4. Conclusion

Les résultats obtenus pour cet algorithme sont très proches de ceux obtenus par les méthodes de ray tracing, tout en restant relativement peu consommateurs en temps de compilation.

Ce modèle reste cependant difficile à intégrer dans notre projet étant donné la complexité des calculs graphiques mis en œuvre.

1.6. TRNSYS

TRNSYS est un logiciel de simulation thermique dynamique reconnu. Initialement conçu pour un bâtiment isolé, TRNSYS a été enrichi par des modules additionnels. En particulier, TRNSHD permet de prendre en compte les masques extérieurs et les masques du bâtiment sur lui-même (Hiller, Beckman, & Mitchell, 2000).

Tout comme SUNTool, TRNSHD est basé sur un modèle de ciel anisotrope.

Les données d'entrée sont les suivantes :

- Géométrie du bâtiment et des masques
- Modèle de ciel
- Localisation géographique du projet

1.6.1 Ensoleillement direct

La position du soleil est calculée heure par heure pour un jour représentatif de chaque mois. Le jour représentatif de chaque mois est déterminé selon la méthode de Klein (Klein, 1997). Le logiciel détermine pour chaque heure :

- L'angle zénithal
- L'azimut

1.6.2. Ensoleillement diffus

L'ensoleillement diffus est divisé en plusieurs ensoleillements directs.

La voute céleste est un demi hémisphère divisé en 12 x 6 portions (découpage de 30° pour l'azimut et 15° pour l'angle zénithal). On détermine la position du centre de chaque portion par l'azimut et l'angle zénithal.

On considère que les portions de ciels sont suffisamment lointaines et petites pour que l'ensoleillement diffus émanant de chacune soit traité comme un ensoleillement parallèle allant du centre de la portion de ciel au centre de l'hémisphère.

1.6.3. Calculs géométriques

Tous les murs extérieurs du bâtiment sont étudiés un par un comme potentiellement ombragés.
Pour chaque mur, on écarte d'abord les obstacles qui se trouvent derrière le mur car ils ne produiront pas d'ombre.
La deuxième étape consiste à répartir obstacles restant en 4 groupes. Chaque groupe correspond à un quadrant solaire (dans le système de coordonnées du mur) dans lequel le soleil peut se trouver. On réduit ainsi par 4 les calculs pour une position donnée du soleil.

Le logiciel suit ensuite un algorithme itératif :

a) Le mur étudié est-il éclairé ?

Si c'est le cas, le problème est ensuite réduit à un modèle 2D par projection des ombres portées sur la surface du mur. Pour cela, on ne projette que les surfaces à l'ombre des volumes extérieurs

b) Les projections en dehors de la surface d'étude sont éliminées.

c) Une procédure détermine alors la limite entre la surface éclairée et la surface à l'ombre à partir d'une méthode vectorielle.

On en déduit la fraction d'ensoleillement direct.

$f_{direct} = A_{éclairé} / A_{total}$ [sans unité] (25)

Où $A_{éclairé}$ est l'aire éclairée

A_{total} est l'aire du mur étudié

d) On peut ensuite calculer la fraction d'ensoleillement diffus :

$f_{diffus} = somme_{de\ k=1\ à\ n} (cos\alpha'_k \times \Delta\omega_k \times f_{direct,\ k}) / somme_{de\ k=1\ à\ n} (cos\alpha'_k \times \Delta\omega_k)$ [sans unité] (26)

Avec :

n : nombre de portions de ciel visibles depuis la surface d'étude

α'_k : angle entre la normale de la surface étudiée et la portion de ciel k

$\Delta\omega_k = \sin \Theta_{Z,\ k} \times \Delta\Theta_Z \times \Delta\omega_Z \times \Delta\gamma$

$\Delta\Theta_{Z,\ k}$: variation de l'angle zénithal sur la portion de ciel k

$\Delta\omega_Z$: variation de l'angle solide sur la portion de ciel k

$\Delta\gamma$: variation de l'azimut sur la portion de ciel k

$f_{direct,\ k}$: fraction d'ensoleillement pour la portion de ciel k, calculée comme précédemment pour le rayonnement direct en remplaçant la position du soleil par la positon de la portion de ciel k.

On peut alors calculer l'ensoleillement global comme une somme de l'ensoleillement direct depuis le soleil et d'ensoleillements directs depuis les portions de ciel.

1.6.4. Conclusion

Ce modèle rajoute une simplification à celui de SUNTool : On ne prend pas en compte l'ensoleillement réfléchi. On peut donc en conclure que ce modèle concerne plus particulièrement les bâtiments implantés en milieu peu dense, où les réflexions entre bâtiment sont réduites.

1.7. Conclusion

Pour conclure on peut identifier plusieurs niveaux de simplification dans les modèles présentés :

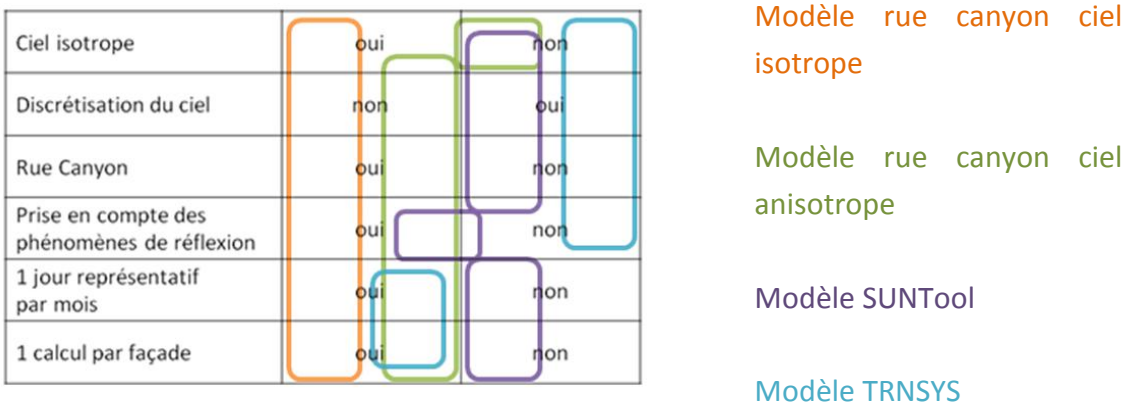


Figure 14 : Comparaison des niveaux de simplification des modèles

Notre étude de l'énergie solaire produite à l'échelle de la ville entière nous conduit a appliquer l'ensemble de ces simplifications. Nous allons donc proposer une méthode qui se rapproche de celle de la rue canyon.

2. Méthode proposée

Nous nous sommes limité dans un premier temps à l'évaluation du potentiel solaire thermique. Il s'agit donc de panneaux situées en toitures et pour lesquels nous avons besoin de connaître le ration d'ensoleillement heure par heure pour une journée donnée.

2.1. Évaluation du ratio d'ensoleillement des toitures

Le ratio d'ensoleillement est entendu au sens de Robinson (Robinson & Stone, 2004). Il s'agit, pour un instant donné, de la portion de toiture qui reçoit un ensoleillement direct. Pour l'évaluer, nous allons ramener notre géométrie tri-dimensionnelle à une rue canyon.

L'azimut solaire et l'orientation des bâtiments sont pour l'instant écartés de ce modèle simplifié. En effet, nos études ont montré que dans les villes de Paris et Toulouse, aucune orientation n'est privilégiée. Ainsi, en supprimant ces paramètres on suppose que les probabilité d'orientation du soleil par rapport au bâtiment sont toutes égales. En revanche, l'angle zénithal va avoir une grande influence sur le ratio d'ensoleillement des toitures.

2.1.1. Assimilation de la géométrie à une rue canyon

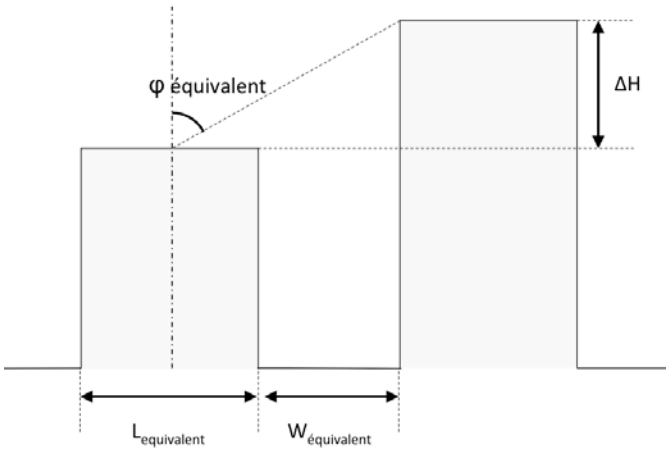


Figure 15 : Rue canyon

On cherche à simplifier un paysage urbain complexe par une rue canyon représentée pas son angle équivalent $\varphi_{équivalent}$. Pour cela, nous nous sommes inspiré d'une méthode présentée par Robinson (Robinson & Stone, 2004). D'après cet article, on obtient u, le complémentaire de l'angle équivalent en intégrant la géométrie urbaine en coordonnées polaires :

$$\frac{1}{2} \times \cos(\beta + u) = \frac{1}{\pi} \iint_S \cos \xi' \, . \, d\omega$$

Où :

dω est l'angle solide d'un petit élément d'obstruction

ξ' est l'angle d'incidence d'un petit élément d'obstruction tel que : $\cos \xi' = \vec{n} \cdot \overrightarrow{OM} = \cos \alpha' \times \cos \gamma'$

Où :

α' est l'azimut d'un petit élément d'obstruction

γ' est la hauteur angulaire d'un petit élément d'obstruction

On choisi de ne pas utiliser cette formule et d'utiliser des calculs simplifié pouvant être codés dans un modèle informatique.

Le principe de notre modèle est le suivant : On va chercher à ce que la surface apparente de la géométrie urbaine réelle corresponde à la surface apparente qu'aurait la rue canyon en deux dimensions (c'est-à-dire une rue infinie où le bâtiment faisant face aurait une hauteur constante).

Le calcul de la surface apparente se fait par une projection des volumes sur une demi-sphère de rayon R quelconque.

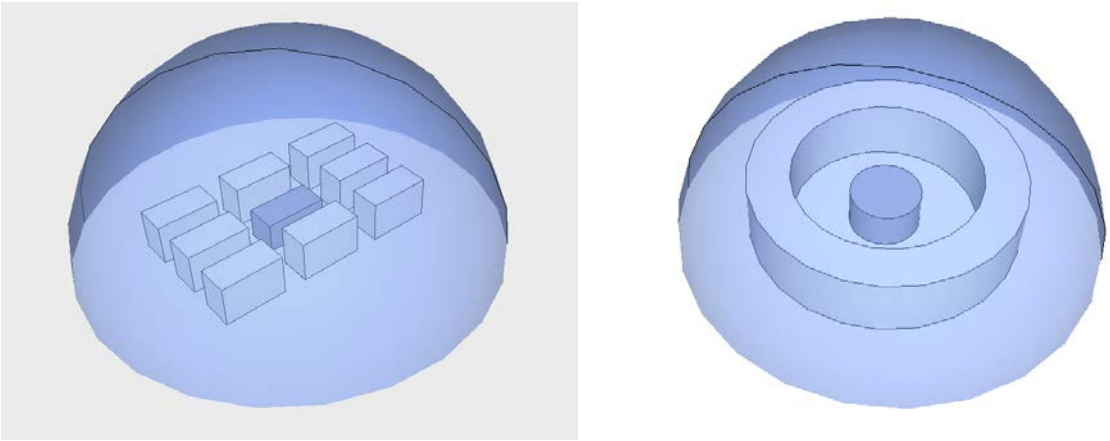


Figure 16 : Méthode de transformation de la géométrie simplifiée vers la géométrie de la rue canyon

Étape 1 : détermination des coordonnées sphériques des sommets des masques solaires

Afin de calculer la projection des masques solaires sur une sphère on doit avant tout déterminer les coordonnées sphérique des sommets de ces masques.

Le schéma ci-dessous représente la zone d'étude en plan de masse. On se concentrera sur 1 seul quart de cette zone d'étude puisque les autres quarts sont identiques. On n'a donc besoin de calculer les coordonnées que pour 8 points repérés sur le schéma.

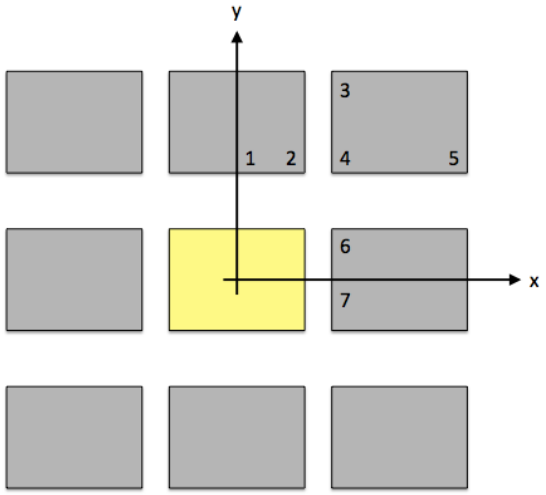


Figure 17 : Sommets de la géométrie simplifiée

Coordonnées cartésiennes des sommets :

$$P_1\left(0\ ;\ \frac{L_y}{2}+W_y\right)$$
$$P_2\left(\frac{L_x}{2}\ ;\ \frac{L_y}{2}+W_y\right)$$
$$P_3\left(\frac{L_x}{2}+W_x\ ;\ \frac{3}{2}L_y+W_y\right)$$
$$P_4\left(\frac{L_x}{2}+W_x\ ;\ \frac{L_y}{2}+W_y\right)$$
$$P_5\left(\frac{3}{2}L_x+W_x\ ;\ \frac{L_y}{2}+W_y\right)$$
$$P_6\left(\frac{L_x}{2}+W_x\ ;\ \frac{L_y}{2}\right)$$
$$P_7\left(\frac{L_x}{2}+W_x\ ;\ 0\right)$$

On calcule les coordonnées sphériques :

$$r_1=\sqrt{\left(\frac{L_y}{2}+W_y\right)^2+\Delta H^2}$$
$$\theta_1=90°$$
$$\varphi_1=arcos\frac{\Delta H}{r_1}$$

`

$$r_2=\sqrt{\left(\frac{L_X}{2}\right)^2+\left(\frac{L_y}{2}+W_y\right)^2+\Delta H^2}$$
$$\theta_2=\text{acos}\left(\frac{L_x/2}{\sqrt{\left(\frac{L_x}{2}\right)^2+\left(\frac{L_y}{2}+W_y\right)^2}}\right)$$

$$\varphi_2 = arcos\frac{\Delta H}{r_2}$$

$$r_3 = \sqrt{\left(\frac{L_x}{2} + W_x\right)^2 + \left(\frac{3L_y}{2} + W_y\right)^2 + \Delta H^2}$$

$$\theta_3 = \text{acos}\left(\frac{\frac{L_x}{2} + W_x}{\sqrt{\left(\frac{L_x}{2} + W_x\right)^2 + \left(\frac{3L_y}{2} + W_y\right)^2}}\right)$$

$$\varphi_3 = arcos\frac{\Delta H}{r_3}$$

$$r_4 = \sqrt{\left(\frac{L_x}{2} + W_x\right)^2 + \left(\frac{L_y}{2} + W_y\right)^2 + \Delta H^2}$$

$$\theta_4 = \text{acos}\left(\frac{L_x/2 + W_x}{\sqrt{\left(\frac{L_x}{2} + W_x\right)^2 + \left(\frac{L_y}{2} + W_y\right)^2}}\right)$$

$$\varphi_4 = arcos\frac{\Delta H}{r_4}$$

$$r_5 = \sqrt{\left(\frac{3L_x}{2} + W_x\right)^2 + \left(\frac{L_y}{2} + W_y\right)^2 + \Delta H^2}$$

$$\theta_5 = \text{acos}\left(\frac{3L_x/2 + W_x}{\sqrt{\left(\frac{3L_x}{2} + W_x\right)^2 + \left(\frac{L_y}{2} + W_y\right)^2}}\right)$$

$$\varphi_5 = arcos\frac{\Delta H}{r_5}$$

$$r_6 = \sqrt{\left(\frac{L_x}{2} + W_x\right)^2 + \left(\frac{L_y}{2}\right)^2 + \Delta H^2}$$

$$\theta_6 = \text{acos}\left(\frac{L_x/2 + W_x}{\sqrt{\left(\frac{L_x}{2} + W_x\right)^2 + \left(\frac{L_y}{2}\right)^2}}\right)$$

$$\varphi_6 = arcos\frac{\Delta H}{r_6}$$

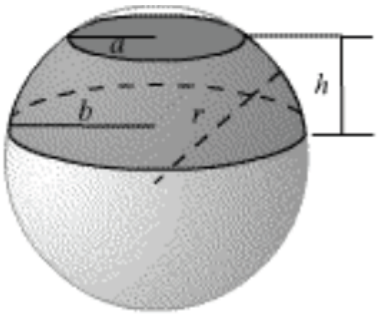
$$r_7 = \sqrt{\left(\frac{L_x}{2} + W_x\right)^2 + \Delta H^2}$$

$$\theta_7 = 0$$

$$\varphi_7 = arcos\frac{\Delta H}{r_7}$$

Étape 2 : Calcul de la surface apparente

Afin de calculer la surface apparente des masques solaires, on va considérer la projection de chaque façade comme une portion d'une zone sphérique.



Zone sphérique :
C'est la partie de la surface d'une sphère comprise entre deux plans parallèles.
La distance des deux plans est appelée hauteur de la zone.

$$Aire\ de\ la\ zone\ sphérique\ =\ 2\,\pi\,R\,h$$

Figure 18 : Calcul d'une zone sphérique

Où h vaut $sin\varphi \times R$

$$Sa_{1-2} = \frac{(2\pi)^2 \times R^2 \times \sin\frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2}}{\theta_1 - \theta_2}$$

$$Sa_{3-4} = \frac{(2\pi)^2 \times R^2 \times \sin\frac{\varphi_3 + \varphi_4}{2}}{\theta_3 - \theta_4}$$
$$Sa_{4-5} = \frac{(2\pi)^2 \times R^2 \times \sin\frac{\varphi_4 + \varphi_5}{2}}{\theta_4 - \theta_5}$$
$$Sa_{6-7} = \frac{(2\pi)^2 \times R^2 \times \sin\frac{\varphi_6 + \varphi_7}{2}}{\theta_7 - \theta_6}$$

D'où une surface apparente totale de :

$$Sa = (Sa_{1-2} + Sa_{3-4} + Sa_{4-5} + Sa_{6-7}) \times 4$$

Notre surface équivalente peut aussi etre exprimée comme :

$$Sa = \pi^2 \times R^2 \times \sin\varphi_{équivalent}$$

On a donc :

$$\varphi_{équivalent} = \text{asin}\left(\frac{Sa}{2\pi \times R^2}\right)$$

$$\varphi_{équivalent} = \text{asin}\left(\left(\frac{\sin\frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2}}{\theta_1 - \theta_2} + \frac{\sin\frac{\varphi_3 + \varphi_4}{2}}{\theta_3 - \theta_4} + \frac{\sin\frac{\varphi_4 + \varphi_5}{2}}{\theta_4 - \theta_5} + \frac{\sin\frac{\varphi_6 + \varphi_7}{2}}{\theta_7 - \theta_6}\right) \times 2\pi\right)$$

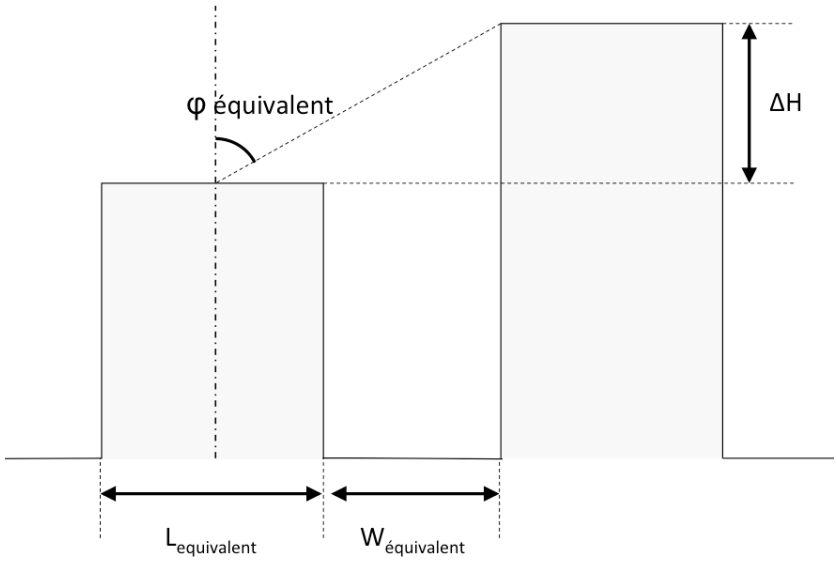


Figure 17 : Rue canyon

Dans cette configuration, la largeur de bâtiment équivalente correspond au diamètre d'un cercle qui aurait la même emprise que le bâtiment étudié :

$$\pi \times {L_{équivalent}}^2 = Lx \times Ly$$

D'où :

$$L_{équivalent} = \sqrt{\frac{Lx \times Ly}{\pi}}$$

D'après la figure ci-dessus on a :

$$\tan \varphi_{équivalent} = \frac{W_{équivalent} + L_{équivalent}/2}{\Delta H}$$

D'où :

$$W_{équivalent} = \Delta H \times \tan \varphi_{équivalent} - \frac{L_{équivalent}}{2}$$

$$W_{équivalent} = \Delta H \times \tan \varphi_{équivalent} - \sqrt{\frac{Lx \times Ly}{4\pi}}$$

On cherche maintenant à déterminer la longueur l représentant la partie de la toiture à l'ombre. Comme on peut le voir sur la figure ci-après :

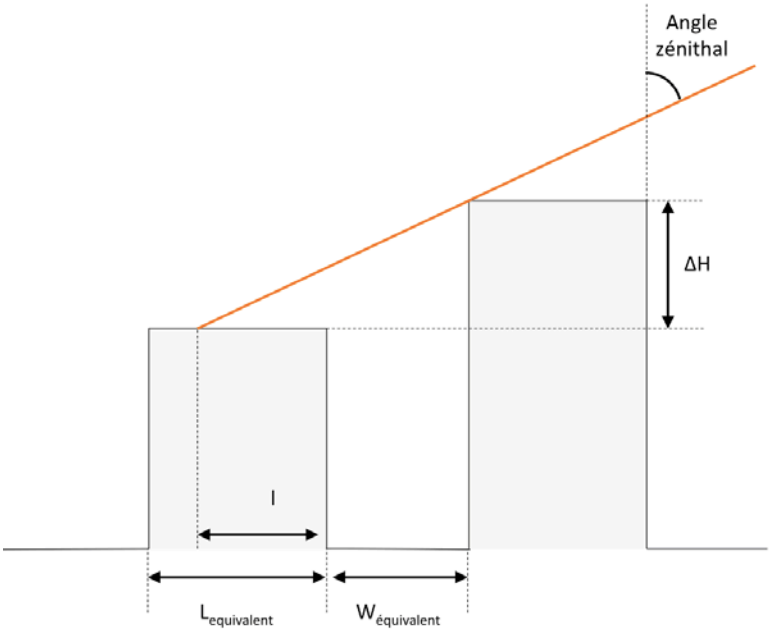


Figure 17 : Rue canyon – ratio d'ensoleillement de la toiture

$$\tan(Angle\ zénithal) = \frac{W_{équivalent} + l}{\Delta H}$$

D'où :

$$l = \Delta H \times \tan(Angle\ zénithal) - W_{équivalent}$$

$$l = \Delta H \times \tan(Angle\ zénithal) - \Delta H \times \tan \varphi_{équivalent} + \sqrt{\frac{Lx \times Ly}{4\pi}}$$

On peut alors calculer le ratio d'ensoleillement de la toiture : $\sigma = l/L_{équivalent}$

Nota : Comme nous n'avons pas les hauteurs exactes dans une maille mais un ΔH correspondant à un écart type, il y a 50% de chance que le bâtiment étudié soit plus haut que son voisin. Dans ce cas, σ vaut 100%. On va donc calculer σ' = σ*0,5.

2.2. Évaluation du potentiel de production d'énergie par des panneaux solaire thermique pour l'ECS

On ne considère ici que les panneaux solaires pour la production d'ECS. On pose l'hypothèse que ceux-ci ne s'installent que sur les toitures.

On élimine les bâtiments où la toiture est à l'ombre de 10h à 14h plus de 6 mois dans l'année c'est-à-dire où σ est inférieur à 50% de 10h à 14h plus de 6 mois dans l'année (Nota : Ce ratio est extrait de la méthode du bureau d'étude AXENNE pour la détermination du potentiel solaire du Grand Lyon, (Bureau d'études AXENNE, 2007).

Les besoins énergétiques se calculent ainsi (ADEME, 2002):
B = 1,16. Vecs . ΔT [Wh/jour]

Vecs [l/jour] est le volume d'eau chaude consommée égal à 32 litres/jour/personne

ΔT est la différence de température entre l'eau chaude (60°) et l'eau froide du réseau. On prendra les valeurs moyennes annuelles issues du tableau ci-dessous soient :
ΔT = 44,3° pour Toulouse
ΔT = 45,4° pour Paris

Température de l'eau froide d'après Tecsol (méthode ESM 2 + 3°C - (Bourges, 1991))

T° eau froide	Janv	Fev	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec	Moy
Toulouse	11,6	12,2	14	15,1	16,8	18,7	19,7	19,7	18,5	16	13,6	12	12,7
Paris	10,83	11,69	12,94	13,84	15,94	17,44	18,34	18,84	16,59	14,88	12,38	11,13	11,6

La production annuelle est égale à (ADEME, 2002) :

P = CS . B . 365 [Wh/an]

> CS est le taux de couverture solaire annuel. Il est issu d'un calcul complexe mais on peut le fixer à 50% dans le cadre de notre calcul simplifié.

Pour atteindre cette production annuelle il faut une surface de toiture suffisante. Sur ces toitures on considère que sont installés des panneaux solaires pour l'ECS à raison de 1 m² par personne (ratio moyen d'après (QUALITEL, 2008; J.-P. Traisnel & Maïzia, 2004)).

Finalement :

Si (nombre de personne) > Stoiture * 0,5 on considère qu'on produit P
P = 6,77*nb personne* ΔT [kWh/an]

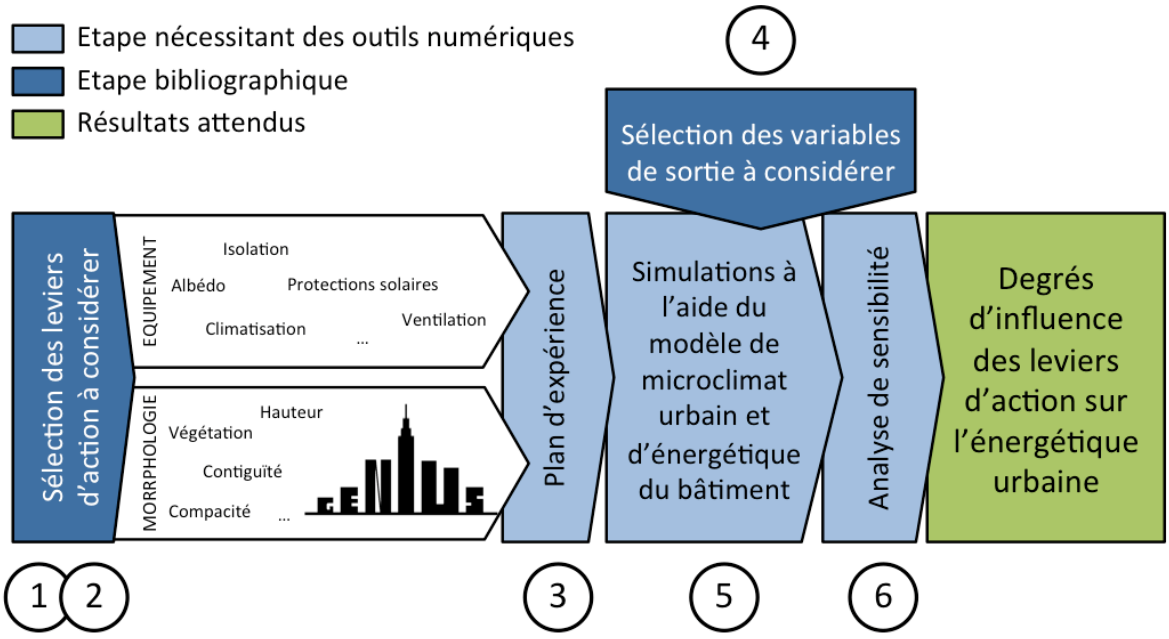
Sinon
P = 6,77*nb personne* ΔT * (Sidéal/Stoiture*0,5) [kWh/an]

Conclusion

Seule la dernière partie de ce travail a été mis en œuvre dans le projet en utilisant l'ensoleillement calculé par TEB. Ce dernier ne tient cependant pas compte des ombres portées sur la toiture.

En ce qui concerne notre méthode de détermination du taux d'ensoleillement de la toiture, il reste à la coder et à la valider. Elle peut cependant servir de départ à un travail ultérieur.

Annexe 13 : Méthode du projet EPICURE



Méthode générale du projet EPICURE (illustration de l'auteur)

Première et deuxièmes étape : identification des variables d'entrées dont on souhaite évaluer l'importance ainsi que de leurs plages de variations

La première étape de ce projet a consisté à identifier des indicateurs de morphologie urbaine et de caractéristiques techniques du bâtiment susceptibles d'avoir une influence en terme de potentiel d'économie d'énergie, d'îlot de chaleur urbain et de niveaux d'inconfort thermique intérieur et extérieur. Lors de cette étape nous nous sommes basés à la fois sur une revue de littérature et sur la prise en compte des paramètres d'entrée du modèle TEB. In fine, nous avons sélectionnés près de 60 paramètres. Une majorité de ces indicateurs sont continus, mais une partie, comme par exemple la composition des parois, sont définis par des valeurs discrètes.

Le **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** présente une partie des variables retenues. À celles-ci il faut ajouter une variable primordiale concernant la structure globale de la ville. Il s'agit d'une variable discrète à sept niveaux et qui détermine la répartition des types de quartier dans la ville. Les sept niveaux correspondent aux différents scénarios d'évolution de la ville présentés au chapitre 2.2 et appliqués à l'agglomération parisienne : ville actuelle, ville réactive, ville réfléchie, ville dynamique, ville verte, ville en crise, ville passive.

Tableau : Exemple de variables d'entrées parmi les 60 sélectionnées

Thème	Variable
Forme urbaine	Coefficient d'emprise au sol
	Taux de végétation
	Hauteur moyenne des bâtiments
	Contiguïté
	…
Description de l'enveloppe	Albédo des toits / murs
	Composition des toits / murs / planchers
	Épaisseur de chaque couche
	Capacité calorifique de chaque couche
	Conductivité thermique de chaque couche
	…
Description des fenêtres	Ratio surface du vitrage sur surface des murs
	Conductivité thermique des fenêtres
	Facteur solaire des fenêtres
	Facteur solaire des protections solaires
	…
Système de chauffage / refroidissement / ventilation	Température de consigne du chauffage
	Température de consigne de la climatisation
	Coefficients de performance des systèmes de refroidissement et de chauffage
	Apport de chaleur interne W/m2
	Débit de ventilation
	Débit d'infiltration
	…
…	

Troisième étape : définition des plages de variation des variables d'entrée

Par la suite, pour chacun des indicateurs continus retenus, nous avons établi des plages de variations. De même, nous avons défini pour chaque paramètre discret différents niveaux. Ces plages de variations et niveaux ont été définis pour chaque type de quartier, afin de pouvoir prendre en compte l'influence de la typologie sur l'énergétique urbaine. Pour beaucoup de ces paramètres, GENIUS statique a servi de base à la définition des plages de variations.

Quatrième étape : plan d'expérience et simulations

La troisième étape est la génération d'un plan d'expérience. L'objectif est que les scénarios de ville à modéliser soient suffisamment variés pour évaluer l'impact des différents paramètres morphologiques indépendamment les uns des autres, mais également de réduire le nombre de simulations à réaliser. Nous avons donc écarté un plan factoriel complet qui nécessiterait 60 puissance 60 simulations.

Cette tâche a été confiée à Jenny Santiago, recrutée pour un post-doctorat d'un an pour ce projet, qui a proposé et initié un plan d'expérience du type hypercube latin - en raison de sa popularité dans le domaine de la simulation numérique (Santiago, 2013). Ce plan d'expérience est caractérisé par une répartition uniforme des points dans l'espace de variation des variables d'entrée. Chaque point défini par le plan d'expériences représente une combinaison donnée des variables d'entrée et une simulation à réaliser. Ainsi, pour 60 variables continues on estime qu'au moins 600 simulations sont nécessaires.

A partir de ce plan d'expérience, une matrice de simulation sera générée. Celle-ci contiendra les valeurs des 60 paramètres pour chaque simulation à réaliser. Cette étape ainsi que le lancement des 1800 simulations ont été automatisés grâce au logiciel R.

Cinquième étape : sélection des variables de sortie

Il est nécessaire de sélectionner un nombre limité de variables parmi les nombreuses sorties du modèle TEB, car pour chacune d'elle il faudra réaliser une analyse de sensibilité spécifique. Nous avons sélectionné les sorties suivantes : les consommations moyennes de chauffage et de climatisation par m^2 et par an, l'ilot de chaleur urbain moyen estival sur la commune de Paris et les indices de conforts (indices UTCI à l'intérieur, à l'extérieur à l'ombre et à l'extérieur au soleil).

Sixième étape : analyse de sensibilité

L'analyse de sensibilité est actuellement en cours. Une analyse de sensibilité permet d'identifier les variables d'entrée les plus influentes par rapport à une variable de sortie donnée. Dans cet objectif, Jenny Santiago a proposé la méthode du test de Fisher. La première étape est de postuler un modèle sous la forme d'une fonction des variables d'entrée ayant pour résultat la variable de sortie considérée. Il est d'usage de commencer par un polynôme de degrés 1, puis 2, puis 3, etc. jusqu'à l'obtention d'un modèle qui

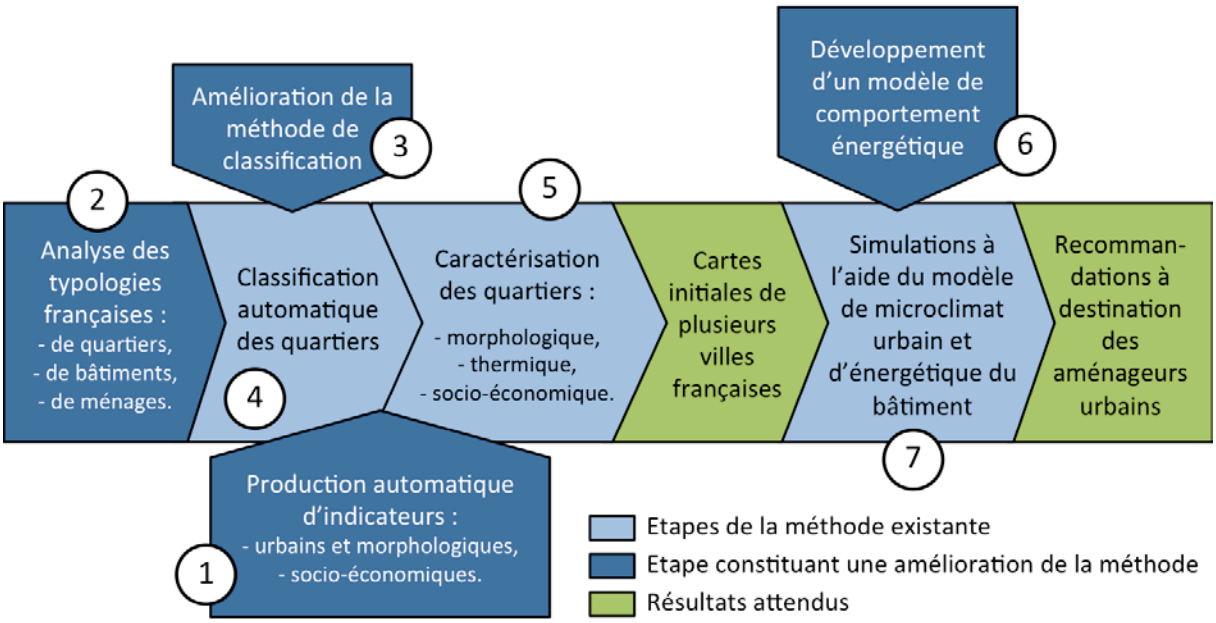
reproduise de manière satisfaisante le comportement du système (ce modèle n'étant pas obligatoirement polynomial). Le test de Fisher permet alors de déterminer si la présence d'une variable d'entrée dans l'équation est importante et nécessaire (Santiago, 2013).

En ce qui concerne les variables discrètes, cette méthode ne peut pas être appliquée. Une analyse préliminaire permet cependant de déterminer la sensibilité de la variable de sortie aux variables discrètes. Il s'agit de la méthode ANOVA (analyse de variance) qui permet de savoir si des différences significatives sont perceptibles selon les différents niveaux. S'il s'avère qu'une ou plusieurs de ces variables discrètes sont influentes, il est nécessaire de réaliser autant de plans d'expériences qu'il y a de combinaisons possibles des niveaux de variables discrètes (Santiago, 2013).

In fine, une liste des dispositifs permettant d'agir sur l'énergétique urbaine sera créée. Ces mesures seront classées en fonction de leur degré d'influence. Il pourra s'agir de mesures liées au comportement des occupants (températures de consigne, etc.), à la matérialité de la ville (isolation thermique du bâti, albédo des surfaces, végétalisation, etc.), à la morphologie urbaine (type de quartier, densité, prospect, etc.), aux équipements techniques des bâtiments (rendement et type de climatiseurs, etc.), etc.

Cette liste permettra aux décideurs urbains de prioriser leurs actions. Dans un contexte où ce type de réglementation peut être long à mettre en œuvre, couteux et difficilement accepté par les usagers, il est en effet primordial de donner la priorité aux actions les plus efficaces (Molina, 2012).

Annexe 14 : Méthode du projet MApUCE



Méthode générale du projet MApUCE (illustration de l'auteur)

Première étape : production automatique des indicateurs

La méthode GENIUS a déjà mis en place un calcul automatique des indicateurs sur un maillage orthogonal. Sous la responsabilité de membres de l'IRSV, ces calculs seront portés sur leur logiciel SIG ORBISGIS (Bocher & Petit, 2012). Notons qu'une partie de ces calculs sont déjà automatisés sous ORBISGIS. Ce portage permettra de fiabiliser la production des indicateurs sur un plus large territoire (plusieurs villes françaises) et à un niveau de détail plus fin (celui de la parcelle).

En particulier, une qualification et un nettoyage des bases de données seront réalisés de manière automatique. En effet, les variables peuvent être lacunaires ou aberrantes (superpositions, dédoublements ou autres erreurs de topologie sur les données vectorielles) et doivent être prétraitées.

L'ensemble des indicateurs concernant le bâtiment ou le découpage parcellaire sera calculé à l'échelle de la parcelle. Ces indicateurs seront ensuite réaffectés à un découpage plus large (maille carrée ou division cadastrale*). Pour finir, ce découpage sera enrichi par les indicateurs qui n'auront pas pu être calculés à l'échelle de la parcelle, en particulier ceux liés aux routes.

* Voir glossaire

Pour finir, des indicateurs socio-économiques issus des bases de données de l'INSEE seront ajoutés à notre système. Ceux-ci permettront une connaissance plus fine des quartiers et de leurs habitants. Ils constitueront également une base pour la définition des comportements énergétiques.

Deuxième étape : analyse des bâtiments et des quartiers de France

L'objectif de cette étape est de généraliser la définition des typologies réalisées pour Paris et Toulouse à l'ensemble du territoire français. Nous allons pour cela procéder de la même manière que dans le chapitre 2 de la deuxième partie : au travers d'un étude bibliographique et par consultation d'experts de l'urbanisme localisés dans différentes régions de France.

En complément de la morphologie urbaine, il est nécessaire, pour évaluer le microclimat urbain ou encore les consommations d'énergie d'une ville, de disposer d'informations sur la matérialité, les équipements techniques et les usages des îlots urbains. Notre objectif est donc d'élargir les hypothèses précédemment définies pour Paris et Toulouse à l'ensemble des villes françaises en tenant compte des spécificités constructives et climatiques locales. Nous souhaitons également travailler sur la forme des données de manière à constituer une base de données solide et évolutive.

Troisième et quatrième étapes : amélioration de la méthode de classification des quartiers

Une fois cette typologie établie, une méthode d'identification automatique sera mise en place. Jusqu'à présent, notre travail se basait sur une méthode statistique de classification. L'analyse était donc menée sur l'ensemble des individus (quartiers) et permettait de les répartir en sept classes. Ce travail est long et complexe à mener sur plusieurs villes. On souhaite donc mettre en place une méthode d'affectation (ou classification supervisée). Les méthodes de classification supervisées sont caractérisées par une phase d'apprentissage qui consiste à établir des règles de classification à partir des connaissances disponibles a priori. On peut ensuite affecter tout nouvel individu à une classe ou à une autre.

En se basant sur les indicateurs urbains extraits des bases de données retenues, on testera plusieurs méthodes d'affectation des îlots. L'objectif est d'augmenter la précision de la classification tout en prenant en compte des règles expertes issues des entretiens menés auprès des professionnels de l'urbanisme. Une étude comparative permettra de déterminer si cette méthode est applicable à l'ensemble des villes françaises ou si des seuils différentiés doivent être appliqués au cas par cas.

En utilisant cette méthode, des cartes typologiques des différentes villes françaises étudiées seront générées.

Cinquième étape : caractérisation des quartiers

Comme cela avait été fait précédemment (voir chapitre 2.5 de la deuxième partie du mémoire), chaque maille sera caractérisée d'un point de vue morphologique et énergétique en fonction du type de quartier et de son âge et des paramètre calculés pour la maille. Des informations socio-économiques concernant les ménages vivant dans chaque quartier seront également définis.

Sixième étape : développement d'un modèle de comportement énergétique

Cette étape se base sur les précédents travaux du laboratoire LAVUE qui ont conduits au développement d'un modèle de comportement énergétique des ménages intégrant les modes de vie ainsi que les caractéristiques des ménages et des logements (LAVUE et al., 2012). Nous nous appuierons sur ce modèle en faisant l'hypothèse que les comportements énergétiques des ménages sont univoques sur le territoire national dès lors qu'ils ont le même profil sociodémographique et économique et qu'ils habitent des types de logement identiques.

Les données disponibles localement (recensements à l'échelle de l'IRIS) ne fournissent aucune information sur les modes de vie énergétiques et sur l'intensité des consommations domestiques. En revanche, elles permettent de dresser des typologies associant les ménages au logement qu'ils occupent. Sur cette base, nous utiliserons ces relations pour estimer l'intensité des consommations et les comportements énergétiques.

En ce qui concerne les consommations énergétiques des immeubles tertiaires, une revue de littérature permettra de dresser un état de l'art de la recherche dans ce domaine. Elle devrait permettre d'établir un lien entre les structures des bâtiments, leur usage et leur appropriation, les innovations technologiques et leur impact sur l'obsolescence architecturale et fonctionnelle, les normes et les comportements.

Les règles de comportement identifiées seront intégrées à la simulation énergétique de la ville (par exemple, la rénovation énergétique du bâti, l'usage des protections solaires et la température de consigne pour le chauffage peuvent être différents selon la typologie de ménage).

Septième étape : simulation intégrées avec le modèle TEB

Pour finir, plusieurs simulations intégrées seront menées sur différentes villes françaises. Une étude de sensibilité permettra de tirer des conclusions des résultats obtenus.

Avis des rapporteurs et rapport du jury

RAPPORT SUR LES TRAVAUX DE
Madame Marion BONHOMME
EN VUE DE LA SOUTENANCE
D'UNE THESE DE DOCTORAT DEVANT
L'Université de Toulouse
Ecole Doctorale Mécanique, Energétique, Génie Civil & Procédés
Laboratoire MDC (Insa Toulouse) et LRA (ensa Toulouse)

Par Marjorie MUSY,
Ingénieure de Recherche, CERMA – UMR CNRS 1563, école nationale supérieure d'architecture de nantes
Directrice adjointe de l'IRSTV – FR CNRS 1563

Le mémoire présenté par Madame Marion BONHOMME est intitulé **«Contribution à la génération de bases de données multi-scalaires et évolutives pour une approche pluridisciplinaire de l'énergétique urbaine»**.

Le travail de recherche est essentiellement méthodologique. Il contribue à un thème de recherche important, la mise en place des données nécessaires à l'évaluation des stratégies urbaines de développement durable.

En plus de l'introduction (3p.) et de la conclusion (6p.), le mémoire est structuré en trois grandes parties :

I. Contexte et problématique (102 p.)
II. Développement de GENIUS pour la génération de bases de données multi-scalaires (104 p.)
III. Les applications de GENIUS, des contributions à l'énergétique urbaine (164 p.)

Il y a également de nombreuses annexes.
Ce découpage met en évidence la principale contribution de la candidate, qui réside dans la partie « Développement de GENIUS pour la génération de bases de données multi-scalaires». Cependant, le développement de la première partie, pour l'éclairage soigneux de l'état de l'art qu'il donne, et la dernière partie, pour la méthodologie d'analyse qui est appliquée, constituent également des contributions importantes.

Le contexte de la thèse est rapidement donné dans l'**introduction** ainsi que le plan de la thèse.

La première partie, « Contexte et problématique» est divisée en deux chapitres. Elle a pour objectif de présenter la problématique générale de la thèse.
Le premier chapitre, **« La ville, le climat, l'énergie »** fait un état de l'art des recherches sectorielles, ou interdisciplinaires sur ces trois sujets. Il se termine sur une analyse des données nécessaires pour évaluer les impacts énergétiques et climatiques de la ville (vue comme consommatrice et productrice d'énergie).

Le second chapitre **« Energétique et morphologies urbaines : les densités de la ville »** discute les différents impacts de la densité urbaine sur les différentes consommations ou productions d'énergie, pour aboutir à la mise en évidence du paradoxe énergétique urbain : c'est-à-dire l'impossibilité de conclure a priori sur la relation densité-efficacité énergétique. En effet, pour cela, il est nécessaire d'avoir une approche large, pluridisciplinaire incluant les divers usages de l'énergie et les possibilités de production.
Le troisième chapitre **« Bases de données multi-scalaires pour les études énergétiques et microclimatiques à l'échelle urbaine »** met en évidence la nécessité de construire une base de données qui permette d'aborder la question énergétique urbaine d'une manière pluridisciplinaire.
On arrive ainsi à la construction de la problématique de a thèse. Notons que l'enjeu de proposer une méthodologie d'élaboration d'une telle base de donnée est non seulement spatial, avec différentes échelles du bâtiment à la ville, mais aussi temporel car il s'agit d'aborder des perspectives à long terme et donc de faire évoluer la modélisation de la ville. La problématique est posée très adroitement et la stratégie de réponse est déjà préconstruite.

La deuxième partie**, «Développement de GENIUS pour la génération de bases de données multi-scalaires»** présente les outils développés par la candidate.
Le premier chapitre **« Objectifs et méthode »** affine le positionnement du travail et le cahier des charges de l'outil. La base de la méthode est d'établir une cartographie actuelle de la ville qui devra ensuite être documentée, c'est la modélisation « synchronique ». Ensuite, l'objectif est de faire évoluer cette modélisation pour étudier des scénarios d'évolution, c'est l'approche « diachronique ». En premier lieu, il s'agit de décrire la structure urbaine, ce qui passe par une typologie.
Dans le second chapitre **« Modélisation synchronique – Une base de données urbaines multi-scalaire »,** Madame BONHOMME, après avoir fait l'inventaire des méthodes permettant de définir les typologies trouvées dans un tissu urbain, propose une méthode mixte, dont les classes sont identifiées à partir des connaissances de l'architecture puis la détection des types sur l'ensemble de la ville est fait par une méthode statistique à partir des caractéristiques des classes. Notons que pour faire cette classification sur la ville, la question du maillage le mieux adapté se pose et la candidate y répond par une étude de sensibilité. La question des paramètres permettant au mieux de caractériser les types se pose également, et encore, la candidate après avoir recensé les très nombreux paramètres utilisés dans la bibliographie, identifie ceux qui permettent de discriminer les classes. La méthode proposée est testée et validée sur Paris. Au final, la méthode est jugée satisfaisante, même si des améliorations sont proposées.
Dans le troisième chapitre, **« Modélisation diachronique – Une base de données urbaines évolutive** », il s'agit de proposer des modèles d'évolution de la ville. Pour cela, Madame Bonhomme s'appuie sur la bibliographie et s'oriente vers l'utilisation d'un modèle existant, SLEDUM, qu'elle couple avec son propre modèle. Cela lui permet de faire évoluer des quartiers, en les faisant si nécessaire changer de type. La méthode est validée en simulant l'évolution de Paris entre 1962 et 2008.

La troisième partie **« Les applications de GENIUS, des contributions à l'énergétique urbaine »** expose comment le modèle a été utilisé dans deux projets auxquels la candidate a participé. Après une présentation des projets, Madame BONHOMME explique comment les scénarios ont été construits puis donne les résultats des simulations d'évolution sur Toulouse. L'évolution des paramètres morphologiques est étudiée afin de vérifier la cohérence du modèle. Pour l 'évaluation des impacts énergétiques (chauffage et climatisation), des caractéristiques thermiques futures des bâtiments sont données. Les simulations climatiques et énergétiques ont été réalisées par les partenaires du projet. L'étude permet de conclure que quel que soit le scénario, l'ICU conduira à une baisse globale de la consommation énergétique surfacique.
La candidate tente ensuite de réaliser une analyse multicritères des scénarios pour dégager le plus plus performant. En dehors d'un cadre réel de décision, cet exercice s'avère délicat et peu concluant.

La conclusion fait une synthèse claire des apports de la thèse en termes de méthodologies proposées et des résultats produits. De nombreuses perspectives sont données dans des projets en cours, démontrant l'intérêt réel de l'outil proposé.

La bibliographie est très abondante, bien construite et pertinente.

La lecture du document m'amène à faire quelques remarques et à poser quelques questions :

- L'analyse de l'historique de construction (à travers l'analyse de l'évolution du cadastre) de la ville n'aurait-elle pas pu être mise à profit pour affiner les typologie ?
- Si les biais des méthodes proposées par la candidate sont bien étudiés, on ne sait pas quels sont les biais induits par TEB et SURFEX.
- On ne sait pas comment les caractéristiques thermiques actuelles des bâtiments ont été attribuées.
- Nous n'avons que les U des futurs bâtiments mais ne savons pas à quelles techniques d'isolation cela correspond. Or, il a été montré que l'ITE, très préconisée actuellement car permettant de réduire les ponts thermiques, favoriserait la formation d'ICU. Il est donc important de savoir si c'est ce type de technique qui a été étudiée.
- Il me semble difficile d' évaluer si un scénario répond aux engagement du facteur 4 à partir de consommations énergétiques par m^2.

Synthèse des principaux commentaires et avis du rapporteur

Points forts :

- Le sujet abordé est un sujet d'importance.
- La quantité des notions traitées et articulées est grande.
- La méthodologie présentée est rigoureuse et bien maîtrisée.
- Le projet est mené à un aboutissement qui permet de démontrer sa validité .
- La candidate a su intégrer son travail à plusieurs projets en cours, travailler avec d'autres équipes. Il est important de noter que son travail semble être un maillon très important de ces projets.
- L'apport de la thèse par rapport aux autres contributions des projets est bien distingué. De même la candidate signale les développements qui n'ont pas été faits par elle.
- La thèse est très bien rédigée.

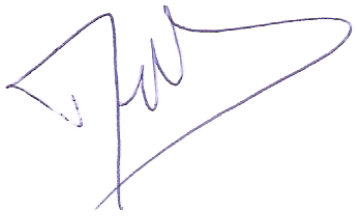
Point faible :

Outre les commentaires faits et questions posées ci-dessus, il me semble que si la réussite de la mise en place de la méthode proposée est indéniable, la question de la caractérisation thermique des bâtiments en ville , nécessaire à une évaluation correcte des scénarios reste inachevée. En cela, si les bases de la méthode sont données, il reste un travail supplémentaire assez conséquent. Il me semble qu'il s'agit là d'une perspective importante à signaler.

Conclusion

Compte tenu de l'importance du travail présenté et de sa très bonne qualité d'ensemble, je donne un avis très favorable pour que Madame Marion BONHOMME soutienne sa thèse devant un jury.
Je tiens par ailleurs à la féliciter pour la rédaction rigoureuse et efficace de sa thèse, la prise en main de nombreuses méthodes, qui démontrent des qualités certaines de chercheur.

Nantes, le 20 novembre 2013



UNIVERSITÉ LAVAL

Faculté d'aménagement,
d'architecture, d'art de design
École d'architecture

Rapport d'évaluation d'une thèse de doctorat

Nom de l'étudiant :__Marion BONHOMME_____ Date : _20 novembre 2013___

Nom du membre du jury : __André Potvin_____

Signature : ___ _____

JUGEMENT D'ENSEMBLE

[X] **La thèse est acceptable, j'en recommande la soutenance et je la considère :**

[X] excellente [ ] très bonne [ ] bonne [ ] passable

La thèse répond aux objectifs d'une thèse de doctorat. Elle ne comporte pas de déficiences sur le plan scientifique ou dans sa présentation qui en invalident la démarche ou dont la correction nécessiterait la refonte de l'une ou de l'autre de ses parties. *Dans ce cas, le candidat devra apporter à sa thèse, les corrections mineures demandées par les membres du jury, après la soutenance.*

[ ] **La thèse ne sera acceptable qu'après révision satisfaisante.**

La thèse requiert des améliorations ou corrections importantes énumérées dans le rapport détaillé. La soutenance est donc recommandée avec réserves. La Faculté des études supérieures et postdoctorales, après consultation des membres du jury, pourra imposer au candidat d'apporter des modifications majeures à sa thèse avant la soutenance.

[ ] **La thèse est inacceptable.**

La thèse ne répond pas aux exigences d'une thèse de doctorat. Elle comporte des déficiences sur le plan scientifique ou dans sa présentation qui l'invalident totalement; elle ne peut être admise à la soutenance. Une rencontre des membres du jury sera convoquée pour décider des suites à donner. Si le candidat se voit alors accorder un droit de reprise, la thèse sera normalement réévaluée par les mêmes membres du jury.

RAPPORT DÉTAILLÉ

Première section – Valeur scientifique

Originalité du sujet; cohérence dans la structure de la thèse et l'articulation des parties; utilisation correcte de la documentation pertinente; méthodologie appropriée; rigueur dans l'argumentation et le traitement des sources et des données ainsi que dans l'analyse des résultats et leur interprétation; portée et caractère novateur des résultats et des conclusions.

L'objectif de cette thèse est de développer une méthode de génération de bases de données multi-scalaires afin de permettre le croisement de différentes disciplines et de faire évoluer ces données afin de tenir compte des différentes échelles temporelles impliquées dans des études pluridisciplinaires. L'originalité du sujet réside dans la création du modèle GENIUS convoquant plusieurs disciplines pour rendre compte des interactions complexes entre systèmes urbains.

Cette thèse est structurée en trois parties présentant le contexte et problématique, la méthodologie de développement du modèle GENIUS, et la contribution possible de GENIUS à l'énergétique urbaine par une étude de cas. Cette structure très cohérente permet à l'auteure de faire une démonstration efficace de l'applicabilité du modèle développé tout en identifiant clairement les limites de la recherche. La première partie dresse un portrait exhaustif de l'état de la connaissance des interrelations ville, climat et énergie par une revue de littérature des ouvrages clés dans le domaine. L'auteure conclue en l'existence d'un véritable 'paradoxe énergétique' où la densité de la ville peut à la fois réduire les consommations énergétiques mais aussi contraindre les apports solaires. Ce paradoxe nécessite de nouveaux modèles d'investigation multi-scalaires de la densité construite au regard de la problématique énergétique conciliant les différentes échelles disciplinaires ainsi que les échelles temporelles séculaires.

La deuxième partie présente les méthodes dites synchronique et diachronique développée dans le modèle GENIUS. La modélisation synchronique permet ainsi de générer des données aux échelles de la ville, du quartier et du bâtiment compatibles avec les capacités de calcul des modèles énergétiques actuels et constitue déjà une contribution réelle au développement de la recherche en énergétique urbaine. Bien que générique, la méthode nécessiterai quand même une adaptation pour tenir compte des typologies locales d'un cas d'étude. Le maillage orthogonal mériterait aussi d'être adaptable pour tenir compte de la complexité géométrique des tissus urbains traditionnels. L'auteure identifie bien ces limites imposées par les bases de données existantes et propose quelques pistes de solutions tel que le recours les classifications supervisées ou procédés statistiques d'affectation.

Quant à GENIUS diachronique, l'auteure démontre bien les capacités d'évolution temporelle de bases de données générées par le modèle. Ici, la limitation la plus inquiétante de GENIUS, dépendante des limites du modèle SLEDUM, est sa capacité très limitée de faire évoluer les bâtiments de bureaux et les bâtiments d'activités. Ce côté prospectif à long terme de l'outil croise la méthode *forecasting* du moyen terme aux scénarios d'experts élaborés pour le long terme jusqu'en 2100. La méthode des scénarios d'experts est particulièrement bien adaptée à l'évaluation énergétique prospective de politiques énergétiques à différentes échelles, du bâtiment, au quartier, à la communauté entière. Cependant, c'est dans le domaine de l'étude des microclimats urbains que GENIUS semble contribuer le plus selon moi à l'avancement des connaissances. La précision de données générées par GENIUS telles que la forme des bâtiments, matérialité, usage, équipements techniques et présence de végétation permet d'augmenter significativement la validité des simulations microclimatiques et d'espérer des résultats plus spécifiques que les typologies des LCZ.

La troisième partie présente une étude de cas de sept scénarios systémiques pour la ville de Toulouse. Ces scénarios permettent de bien démontrer l'efficacité du modèle proposé à simuler l'impact des règlementations dans les villes à faible croissance, l'importante des activités de rénovation dans la performance thermique, l'intérêt de la ville multipolaire dans le contrôle de l'étalement urbain comparativement à la ceinture verte ainsi que la compatibilité de la végétalisation et de la densité bâtie. Cette dernière découverte est certainement très contre-intuitive et illustre à elle-seule la portée du modèle GENIUS à forcer le statut quo de la réglementation urbaine dans une approche pluridisciplinaire de l'énergétique urbaine. La végétalisation et la densité bâtie sont aussi déterminantes de la qualité des microclimats urbains qui transcendent bien entendu la question purement énergétique. Le modèle semble aussi très prometteur dans l'étude prospective de l'effet d'ilot de chaleur urbain et de ses conséquences sur l'énergétique urbaine. Il permet dès maintenant de quantifier la performance de chacun des scénarios proposés. Ici encore, GENIUS confirme que la rénovation énergétique volontaire du parc immobilier constitue un élément clé pour l'économie des consommations de chauffage pour contrer l'inertie de la ville.

Quant aux consommations de climatisation, l'auteure conclue que le comportement des usagers semble être la variable clé. Sans entrer dans le détails, l'auteure souligne à raison la sous représentation des critères sociaux-culturels dans la version actuelle de son modèle. J'inviterais l'auteure à consulter les nouvelles publications sur le *rebound effect* déjà bien connu dans le domaine de l'économie. Le *rebound effect* stipule tout simplement que plus un système est efficace, plus les gens l'utiliseront. Dans le contexte de l'énergétique urbaine, il faudrait donc être très critique par rapport à l'économie réelle des rénovations énergétiques. Plus récemment, des campagnes de relevés in situ ont même révélé l'existence d'un *prebound effect* dans lequel les usagers de bâtiments très peu conservateurs auront naturellement tendance à diminuer la température du point de consigne, modifiant considérablement les consommations simulées selon un point de consigne standard. Ces effets sont particulièrement associés aux vieux bâtiments ou aux bâtiments de première couronne souvent de très faible qualité de construction.

Deuxième section – Qualité de la présentation

Précision et clarté du style; correction de la langue (s'il y a lieu, portez en annexe la liste des incorrections de langue et des erreurs typographiques); qualité des illustrations et tableaux; références bibliographiques.

La qualité de présentation générale de la thèse est excellente. L'auteure démontre sa maitrise de la langue française dans un argumentaire structuré et rigoureux. Cette thèse de 545 pages peut paraitre au premier coup d'œil beaucoup trop volumineuse mais le style synthétique, factuel et parfaitement adapté aux propos en fait une lecture captivante. Attention cependant à l'usage abusif d'acronymes complexes souvent difficiles à comprendre pour le non-Européen.

Les illustrations, tableaux et schémas sont utilisés de manière efficace et toujours pertinente au propos. Elles sont pour la plupart réalisées ou adaptées par l'auteure, ce qui ajoute une cohérence graphique au document. Les schémas originaux vulgarisant la structure du module de simulation ainsi que les scénarios systémiques sont particulièrement réussies et utiles dans la compréhension de la portée du travail. Le glossaire est une agréable addition au document et témoigne du souci de l'auteure dans la définition rigoureuse d'une terminologie très spécialisée. Le choix et le format de présentation détaillée des Annexes complémente et appuie le texte principal et permet de l'alléger

considérablement.

La bibliographie est exhaustive et représente bien l'état de la connaissance actuelle des différents domaines de connaissances de thèse pluridisciplinaire. Les références bibliographiques sont exactes mais la référence précise aux pages de l'ouvrage cité aurait été appréciée pour fin de vérification des sources par l'examinateur ou un futur chercheur.

Troisième section – Commentaires généraux

Étant issu du domaine de l'architecture et de la bioclimatique, donc essentiellement un néophyte dans le domaine très spécialisé des SIG et de l'analyse multicritère, j'ai beaucoup appris à la lecture de cette thèse. L'auteure a démontré de manière magistrale la contribution du modèle GENIUS à la génération de bases de données multi-scalaires et évolutives dans une approche pluridisciplinaire de l'énergétique urbaine.

Cette thèse démontre l'excellente capacité de l'auteure à poursuivre des recherches originales dans le domaine de l'énergétique urbaine. Compte tenu de la nature pluridisciplinaire de ce domaine et de la complexité des variables à considérer, l'auteure est parvenu à extraire des informations disparates, à les intégrer dans un modèle évolutif de *forecasting* et à produire des résultats souvent inédits sur les déterminants de la performance énergétique des villes du futur. La contribution de cette thèse sur le fameux paradoxe de la densification urbaine mérite d'être salué.

Dans le contexte actuel de changements climatiques réels ou appréhendés, les professionnels et décideurs doutent souvent de leur capacité réelle à prévoir et/ou mesurer les performances environnementales futures de la ville. Cette thèse propose une méthode rigoureuse d'évaluation pour faire tomber les idées préconçues et le fameux *greenwashing* trop souvent présent en pratique professionnelle et en politique. Les dimensions sociaux-culturelles complexes inhérentes à la ville devront cependant être intégrées ou à tout le moins abordées plus systématiquement pour supporter les résultats de telles études prospectives. À la lecture de cette thèse, je me suis pris à imaginer les possibilités d'adaptation du modèle au contexte climatique très sévère d'une ville nordique telle que Québec dominée par les besoins de chauffage. Comment en effet, la densité bâtie issue d'une culture de conservation énergétique s'adaptera-t-elle aux changements climatiques?

Cette thèse constitue sans aucun doute l'une des meilleures qu'il m'ait été donné d'évaluer et je souhaite la meilleure des chances à Madame Bonhomme dans ses projets de recherche et/ou professionnels futurs. Je lui accorde donc la mention 'excellent'.

André Potvin, M.Arch., Ph.D.
École d'architecture
Université Laval

RAPPORT SUR LA SOUTENANCE DU DIPLOME DE DOCTORAT DE L'UNIVERSITE DE TOULOUSE DELIVRE PAR L'INSA DE TOULOUSE A MARION BONHOMME.

TOULOUSE, LE 11/12/13.

Spécialité : Génie civil
Prénom Nom : Marion Bonhomme
Date de soutenance : mercredi 11 décembre 2013
Président du jury : André Potvin, Professeur, Université de Laval, Canada
Constitution du jury : Christiane Weber, Luc Adolphe, Fréderic Bonneaud, Valéry Masson, Jean-Luc Salagnac, Marjorie Musy.

Madame Marion Bonhomme a brillamment présenté son travail, sur un domaine d'étude imposant des analyses croisées relevant de diverses disciplines (architecture, urbanisme, énergétique, climatologie, sociologie, économie), ce domaine étant fortement lié à l'actualité. La dimension prospective de son travail apparaît d'un grand intérêt pour l'avenir des villes.

Le jury a retrouvé pendant la soutenance les qualités indéniables du manuscrit : clarté, rigueur, souci d'expliciter la portée et les limites des hypothèses et des résultats, enthousiasme, ceci dans un style direct, convaincant, soutenu par une expression orale dynamique non dénuée d'humour. Il tient à relever la très grande maturité de la candidate par rapport à un travail interdisciplinaire complexe. Elle a su le restituer de manière lucide et démonstrative. Les réponses aux questions ont confirmé l'honnêteté intellectuelle et l'humilité de Marion Bonhomme qui reconnaît et explicite les limites de sa contribution, tout en défendant son point de vue avec pertinence. La candidate a montré dans le manuscrit comme à l'oral des qualités pédagogiques certaines. `

La candidate a su s'intégrer dans des équipes pluridisciplinaires élargies, par ses qualités personnelles mais surtout par son travail qui a joué un rôle fédérateur dans le cadre de deux ambitieux projets de recherche interdisciplinaire (ANR-MUSCADE et ACCLIMAT traitant tous deux de l'adaptation des villes aux effets du changement climatique). Elle a produit ce travail de manière fort efficace en très peu de temps compte tenu de la complexité et de la portée des domaines d'étude. Elle a su y rendre compatibles des approches théoriques et méthodologiques avec la production de connaissances explicites, appropriées et exploitables par les aménageurs.

Marion Bonhomme a présenté des perspectives étayées et claires de son travail, montrant à la

fois le recul qu'elle a su prendre par rapport à la problématique de la modélisation énergétique de la ville (et celles des nombreuses sciences en interaction avec celle-ci), et sa volonté de faire avancer efficacement une approche scientifique de qualité appropriable par les acteurs urbains.
Cette thèse est dans le prolongement de la double formation de Marion Bonhomme et on y retrouve à la fois une thèse d'architecture, qui aborde les enjeux urbains en intégrant bien les questions de forme, de processus de fabrication de la ville, et une thèse ancrée dans les sciences pour l'ingénieur, comme le démontre la manipulation rigoureuse que la candidate a fait des modèles et résultats issus des outils de simulation. Cette double compétence s'est également bien retrouvée dans les réponses aux questions pointues d'un jury au sein duquel étaient représentées plusieurs des disciplines mobilisées pendant ces projets.

Fort de ces éléments, le jury a décidé d'attribuer à Marion Bonhomme le titre de Docteur de l'Université de Toulouse dans la spécialité Génie civil. En l'absence de mention et de félicitations, le jury tient à féliciter à l'unanimité Marion Bonhomme et lui recommande de faire valoir au mieux son travail de thèse, notamment à travers les publications internationales qu'il suscite encore, et en candidatant à des prix de thèses régionaux ou nationaux.

André POTVIN | Christiane WEBER | Luc ADOLPHE

Jean-Luc SALAGNAC | Marjorie MUSY | Frédéric BONNEAUD | Valéry MASSON

Contribution à la génération de bases de données multi-scalaires et évolutives pour une approche pluridisciplinaire de l'énergétique urbaine

Résumé : Depuis plusieurs années, la recherche tente de considérer les questions de la ville, du climat et de l'énergie dans toute leur complexité : consommations des ressources, pollution, microclimat, production et consommation d'énergie, usage, etc. Cependant, rares sont les travaux qui convoquent suffisamment de disciplines pour rendre compte des interactions complexes entre systèmes urbains. L'une des raisons à cela réside dans le manque de bases de données adaptées à ces multiples domaines. Dans cette thèse, nous nous proposons de développer une méthode et un outil générant des bases de données urbaines multi-scalaires. Le modèle que nous avons conçu a été baptisé GENIUS, pour GENérateur d'Ilots UrbainS.

Le premier objectif de GENIUS est de produire des données adaptées aux différentes échelles spatiales de l'énergétique urbaine. Pour cela, nous choisissons une représentation typologique de la ville permettant de couvrir un large territoire tout en fournissant un niveau de détail élevé. Une analyse statistique des bâtiments sur deux cas d'études, Paris et Toulouse, nous permet d'identifier, de localiser et de caractériser sept types de quartiers. Nous attribuons ensuite des caractéristiques techniques aux bâtiments de ces villes en fonction de leur date de construction et du type de quartier dans lequel ils se situent.

Le deuxième objectif de GENIUS est de faire évoluer ces données dans le temps afin de tenir compte des différentes échelles temporelles impliquées dans toute étude pluridisciplinaire. Nous avons pour cela fait le choix de coupler notre modèle à un modèle prospectif existant afin d'y apporter de la précision en terme de forme urbaine. Notre travail consiste ainsi en une descente d'échelle à partir, d'une part, des données produites par ce modèle prospectif et, d'autre part, de mécanismes d'évolutions des morphologies urbaines.

Finalement, nous présenterons des applications de GENIUS et en particulier, deux projets de recherche, MUSCADE et ACCLIMAT, ayant pour objet les interactions entre changement climatique et développement urbain. Dans le cadre de ces projets prospectifs et pluridisciplinaires, GENIUS a permis de faire communiquer des modèles travaillant sur des échelles de temps et d'espaces différentes, et de simuler les évolutions possibles des formes urbaines et leur impact sur l'énergétique urbaine.

Mots clés : urbanisme, énergie, bases de données urbaines, prospective, interdisciplinarité, descente d'échelles

Contribution to the generation of multiscalar and evolutionary databases for a multidisciplinary approach to urban energy

Abstract: For many years, research projects attempt to address the issues of city, climate and energy throughout their disciplinary complexity: resources consumption, pollution, microclimate, energy production and consumption, use, etc. However, there are few works that combine enough disciplines to assess the complex interactions of urban systems. One of the reasons of this situation is the lack of databases adapted to the multiple purposes of these fields. Therefore, in this thesis, we propose to develop a method and a tool to generate multi-scalar urban databases. The model we designed is GENIUS (GENerator of Interactive Urban blockS).

The first goal of GENIUS is to produce data that are accurate for different spatial scales involved in urban energy. Thus, we choose a typological representation of the city to cover a large area while providing a high level of detail. A statistical analysis of the buildings of two case studies, Paris and Toulouse, allows us to identify, locate and characterize seven types of neighbourhoods. The technical characteristics of buildings are defined according to their ages and types of neighbourhood.

The second goal of GENIUS is to enable these data to evolve over time to combine the different time scales involved in any multidisciplinary study. We chose to couple our model to an existing urban expansion model, our model being complementary in terms of urban form. We must operate a downscaling based on the data produced by this urban expansion model and on mechanisms of urban morphologies evolutions.

Finally, we present applications of GENIUS and in particular, two research projects, MUSCADE and ACCLIMAT, that address interactions between climate change and urban development. In these projects, GENIUS allows communication among models working at various time and space scales, and simulates possible changes in urban form and their impacts on urban energy.

Keywords: urban planning, urban modelling, energy, urban databases, prospective, multidisciplinarity, downscaling